

Mécanique des fluides

COURS • P11 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	8
Méthodes et pièges	9
Vers le PASS	9
Exercices	9
Corrigés	11

Ce que tu dois savoir faire

- Définir et calculer une masse volumique et une densité, en convertissant correctement les volumes (L, mL, cm^3 , m^3).
- Définir la pression, relier force pressante, pression et surface, et convertir les unités usuelles (Pa, hPa, bar, mmHg).
- Énoncer et exploiter la loi fondamentale de la statique des fluides pour un fluide incompressible au repos.
- Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède, en donner les caractéristiques (direction, sens, valeur) et l'utiliser pour étudier la flottaison.
- Définir le débit volumique, le relier à la section et à la vitesse moyenne d'écoulement, et passer au débit massique.
- Exploiter la conservation du débit volumique pour un fluide incompressible en écoulement permanent.
- Énoncer la relation de Bernoulli avec ses conditions de validité et l'appliquer entre deux points d'une ligne de courant.
- Expliquer l'effet Venturi et l'exploiter pour mesurer une vitesse ou un débit.
- Repérer les limites du modèle du fluide parfait (viscosité, turbulence) dans une situation concrète.

Cours

1. Le fluide, sa masse volumique et sa densité

Un **fluide** est un milieu matériel qui se déforme et s'écoule sous l'effet de forces même faibles, et qui épouse la forme du récipient qui le contient. Les liquides et les gaz sont des fluides. À l'échelle microscopique, un fluide est formé d'entités (molécules, atomes, ions) en mouvement désordonné permanent. À l'échelle macroscopique, on le décrit par des grandeurs moyennes définies en chaque point : masse volumique, pression, température, vitesse d'écoulement.

La **masse volumique** ρ d'un échantillon de masse m occupant un volume V est :

$$\rho = m / V, \text{ avec } m \text{ en kg, } V \text{ en m}^3 \text{ et } \rho \text{ en kg}\cdot\text{m}^{-3}.$$

Ordres de grandeur à connaître : eau liquide $1,00 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; eau de mer environ $1,03 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; sang environ $1,06 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; mercure $13,6 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; glace $917 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; air à 20°C et sous 1 bar environ $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Un gaz est environ mille fois moins dense qu'un liquide, car ses entités sont beaucoup plus espacées.

Conversions utiles : $1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$; $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$; $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} = 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} = 1 \text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$.

La **densité** d d'un liquide ou d'un solide est le rapport de sa masse volumique à celle de l'eau : $d = \rho / \rho(\text{eau})$. C'est un nombre sans unité. Une densité supérieure à 1 signifie que le corps est plus dense que l'eau.

Un fluide est dit **incompressible** si sa masse volumique ne dépend pas de la pression. Les liquides sont très peu compressibles et seront toujours modélisés ainsi dans ce chapitre. Les gaz sont compressibles, mais sur des hauteurs de quelques mètres et pour des vitesses modérées, leur masse volumique varie peu et on peut aussi les traiter comme incompressibles.

2. La pression et la force pressante

Un fluide au contact d'une paroi exerce sur elle une action mécanique répartie. Sur une petite surface plane d'aire S , cette action se modélise par une **force pressante** $\vec{F}$:

- perpendiculaire à la surface ;
- orientée du fluide vers la paroi ;
- de valeur $F = P \times S$.

La **pression** P est donc la valeur de la force pressante par unité de surface :

$$P = F / S, \text{ avec } F \text{ en N, } S \text{ en m}^2 \text{ et } P \text{ en pascal (Pa). } 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}.$$

Unités usuelles : $1 \text{ hPa} = 10^2 \text{ Pa}$; $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$; la pression atmosphérique normale vaut $P(\text{atm}) = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1\,013 \text{ hPa}$; 1 mmHg (millimètre de mercure) vaut environ $133,3 \text{ Pa}$, donc 760 mmHg correspondent à $1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$. Le mmHg reste l'unité de la pression artérielle en médecine.

Interprétation microscopique. La pression résulte des innombrables chocs des entités du fluide sur la paroi. Chaque choc transfère une petite quantité de mouvement ; la somme de ces transferts par unité de temps et de surface est la pression. Plus les entités sont nombreuses par unité de volume et rapides (donc plus la température est élevée), plus la pression est grande.

Pression absolue et pression relative. La pression définie ci-dessus est la pression absolue. Beaucoup d'appareils (manomètre de pneu, tensiomètre) mesurent une **pression relative**, c'est-à-dire l'écart à la pression atmosphérique : $P(\text{relative}) = P - P(\text{atm})$. Une pression artérielle « de 120 mmHg » est une pression relative : la pression absolue du sang vaut alors $760 + 120 = 880 \text{ mmHg}$.

Une pression est une grandeur scalaire, définie en chaque point du fluide, indépendante de l'orientation de la surface qu'on y place. C'est la force pressante, elle, qui est un vecteur.

Exemple court : la pression atmosphérique exerce sur une feuille A4 posée à plat ($S = 0,210 \text{ m} \times 0,297 \text{ m} = 6,24 \times 10^{-2} \text{ m}^2$) une force $F = 1,013 \times 10^5 \times 6,24 \times 10^{-2} \approx 6,3 \times 10^3 \text{ N}$, soit le poids d'une masse de plus de 600 kg. La feuille ne s'envole ni ne s'écrase, car l'air exerce une force égale et opposée sur sa face inférieure.

3. La loi fondamentale de la statique des fluides

Énoncé. Dans un fluide incompressible de masse volumique ρ , au repos, dans le champ de pesanteur uniforme g , la pression en deux points 1 et 2 d'altitudes z_1 et z_2 (axe Oz vertical orienté vers le haut) vérifie :

$$P_2 - P_1 = \rho \times g \times (z_1 - z_2)$$

On l'écrit aussi $P + \rho g z = \text{constante}$ dans tout le fluide. Si l'on repère plutôt la profondeur h sous la surface libre, où règne la pression $P(\text{atm})$, alors $P(h) = P(\text{atm}) + \rho g h$.

Démonstration. On isole par la pensée un cylindre de fluide vertical, de section S , compris entre les altitudes z_2 (base) et z_1 (sommet), avec $z_1 > z_2$. Ce cylindre est au repos : la somme des forces qui s'exercent sur lui est nulle (principe d'inertie). Les forces sont :

- son poids, vertical vers le bas, de valeur $m g = \rho S (z_1 - z_2) g$;
- la force pressante sur la face supérieure, vers le bas, de valeur $P_1 S$;
- la force pressante sur la face inférieure, vers le haut, de valeur $P_2 S$;
- les forces pressantes sur la paroi latérale, horizontales, qui se compensent deux à deux.

En projection sur l'axe vertical orienté vers le haut : $P_2 S - P_1 S - \rho S (z_1 - z_2) g = 0$, d'où $P_2 - P_1 = \rho g (z_1 - z_2)$. La pression augmente donc quand on descend.

Conséquences.

- Deux points d'un même fluide au repos situés à la même altitude ont la même pression : les surfaces isobares sont des plans horizontaux. La surface libre d'un liquide au repos est horizontale.
- Dans des **vases communicants** contenant un même liquide, les surfaces libres sont au même niveau, quelle que soit la forme des récipients.
- Dans l'eau, une profondeur d'environ 10 m ajoute une pression d'environ 1 bar : $\rho g h = 1,00 \times 10^3 \times 9,81 \times 10,0 = 9,81 \times 10^4 \text{ Pa}$.
- Toute variation de pression imposée en un point d'un liquide incompressible au repos se transmet intégralement en tout point : c'est le principe de Pascal, utilisé dans les freins et les vérins hydrauliques.
- Dans un gaz, ρ est si faible que la pression varie très peu sur quelques mètres : dans l'air, 10 m de dénivelé changent la pression d'environ $1,2 \times 9,81 \times 10 \approx 1,2 \times 10^2 \text{ Pa}$, soit à peine plus d'un millième de bar. On considère donc la pression uniforme dans un récipient de gaz de taille ordinaire.

Le baromètre de Torricelli. Un tube rempli de mercure, retourné sur une cuve de mercure, se vide partiellement : au-dessus du mercure règne un quasi-vide ($P \approx 0$). La loi fondamentale entre la surface de la cuve ($P(\text{atm})$) et le sommet de la colonne donne $P(\text{atm}) = \rho(Hg) g h$, soit $h = 1,013 \times 10^5 / (13,6 \times 10^3 \times 9,81) \approx 0,759 \text{ m}$. C'est l'origine de l'unité mmHg.

Le manomètre en U. Un tube en U contenant un liquide de masse volumique ρ , relié d'un côté à un gaz à la pression P et ouvert de l'autre à l'air, présente une dénivellation h telle que $P - P(\text{atm}) = \rho g h$. Mesurer h revient à mesurer la pression relative.

Loi fondamentale en pratique

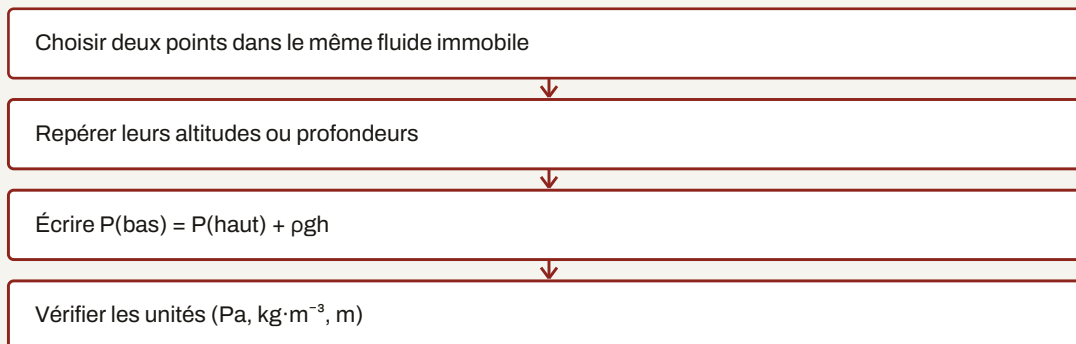


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

4. La poussée d'Archimède

Énoncé. Tout corps immergé, totalement ou partiellement, dans un fluide au repos subit de la part de ce fluide une force appelée **poussée d'Archimède** $\vec{\Pi}$, qui est :

- verticale, dirigée vers le haut ;
- de valeur égale au poids du fluide déplacé : $\Pi = \rho(\text{fluide}) \times V(\text{immergé}) \times g$;
- appliquée au centre de la partie immergée (centre de poussée).

Vectoriellement : $\vec{\Pi} = - \rho(\text{fluide}) \times V(\text{immergé}) \times \vec{g}$.

Attention : ρ est la masse volumique du FLUIDE, et V le volume de la partie IMMERGÉE du corps, pas son volume total s'il flotte.

Origine. La poussée d'Archimède est la résultante des forces pressantes exercées par le fluide sur toute la surface du corps. Pour un cylindre vertical de section S et de hauteur H totalement immergé, les forces latérales se compensent ; la face du bas, plus profonde de H , subit une pression plus grande que la face du haut. La résultante vaut $(P(\text{bas}) - P(\text{haut})) \times S = \rho g H \times S = \rho V g$, vers le haut. On retrouve exactement le poids du fluide qui occuperait ce volume. Ce raisonnement se généralise à une forme quelconque. Pour un liquide incompressible, la poussée ne dépend donc pas de la profondeur à laquelle se trouve un corps totalement immergé.

Flotter ou couler. Un corps de masse volumique $\rho(\text{corps})$, lâché sans vitesse et totalement immergé, subit son poids $\rho(\text{corps}) V g$ et la poussée $\rho(\text{fluide}) V g$:

- si $\rho(\text{corps}) > \rho(\text{fluide})$, le poids l'emporte : le corps coule ;
- si $\rho(\text{corps}) < \rho(\text{fluide})$, la poussée l'emporte : le corps remonte puis flotte en partie émergé ;
- si $\rho(\text{corps}) = \rho(\text{fluide})$, le corps reste en équilibre à toute profondeur (cas recherché par un plongeur bien lesté ou par un poisson grâce à sa vessie natatoire).

Équilibre de flottaison. À l'équilibre, poids et poussée se compensent : $\rho(\text{corps}) V(\text{total}) g = \rho(\text{fluide}) V(\text{immergé}) g$. La **fraction immergée** vaut donc :

$$V(\text{immergé}) / V(\text{total}) = \rho(\text{corps}) / \rho(\text{fluide}).$$

Exemple : un iceberg ($\rho = 917 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) dans l'eau de mer ($\rho = 1\,025 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) est immergé à $917 / 1\,025 \approx 0,895$, soit environ 89 % de son volume ; seule une partie d'environ 11 % dépasse.

Dans l'air, la poussée d'Archimède existe aussi, mais elle est en général négligeable devant le poids d'un solide ou d'un liquide (rapport de l'ordre de $1,2 / 1\,000$). Elle devient décisive pour les ballons gonflés à l'hélium ou à l'air chaud, dont la masse volumique moyenne est inférieure à celle de l'air environnant.

Poids apparent. Un corps immergé suspendu à un dynamomètre semble plus léger : le dynamomètre indique $P(\text{apparent}) = P - \Pi$. Cette mesure permet de déterminer le volume d'un objet de forme irrégulière, donc sa masse volumique.

5. Écoulement d'un fluide : débit et conservation du débit

On étudie maintenant un fluide **en mouvement**. On se limite à un **écoulement permanent** (ou stationnaire) : en chaque point fixe de l'espace, la vitesse, la pression et la masse volumique ne dépendent pas du temps. Les **lignes de courant** sont des lignes tangentes en chaque point au vecteur vitesse du fluide ; en régime permanent, elles coïncident avec les trajectoires des particules de fluide. Un faisceau de lignes de courant s'appuyant sur un contour fermé forme un **tube de courant**, que le fluide ne traverse pas latéralement. Une canalisation en est un exemple.

Débit volumique. Le débit volumique $D(v)$ à travers une section est le volume de fluide qui la traverse par unité de temps :

$$D(v) = V / \Delta t, \text{ en } m^3 \cdot s^{-1}.$$

Si le fluide traverse une section droite d'aire S à la vitesse moyenne v (perpendiculaire à la section), le volume qui passe pendant Δt est celui d'un cylindre de base S et de longueur $v \Delta t$. D'où :

$$D(v) = S \times v$$

Débit massique. $D(m) = m / \Delta t = \rho \times D(v)$, en $kg \cdot s^{-1}$.

Conservation du débit. En régime permanent, la masse de fluide contenue dans une portion de canalisation entre deux sections 1 et 2 ne varie pas : la masse qui entre pendant Δt est égale à celle qui sort. Le débit massique se conserve : $\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$. Si de plus le fluide est incompressible ($\rho_1 = \rho_2$), c'est le débit volumique qui se conserve :

$$S_1 \times v_1 = S_2 \times v_2$$

Conséquence : là où la canalisation se rétrécit, le fluide accélère ; là où elle s'élargit, il ralentit. Si le diamètre est divisé par 2, la section est divisée par 4 ($S = \pi d^2 / 4$) et la vitesse est multipliée par 4. On le constate en pinçant l'extrémité d'un tuyau d'arrosage.

S'il y a des ramifications, le débit entrant est égal à la somme des débits sortants. Dans l'appareil circulatoire, le débit cardiaque (environ $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ au repos) traverse l'aorte puis se répartit entre des milliards de capillaires. Leur section totale étant bien plus grande que celle de l'aorte, le sang y circule beaucoup plus lentement, ce qui laisse le temps aux échanges.

Section de la canalisation

Elle diminue : la vitesse augmente

Elle augmente : la vitesse diminue

Repères complémentaires, sans séquence causale

6. La relation de Bernoulli

Conditions de validité. On considère un **fluide parfait** (sa viscosité, c'est-à-dire ses frottements internes, est négligée), **incompressible**, en **écoulement permanent**, dans le champ de pesanteur. Alors, le long d'une ligne de courant :

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = \text{constante}$$

Entre deux points 1 et 2 d'une même ligne de courant :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2$$

avec P en Pa, ρ en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, v en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, z en m (axe vertical vers le haut), g en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Sens physique. Chaque terme est homogène à une pression, c'est-à-dire à une énergie par unité de volume ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2} = 1 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$) :

- $\frac{1}{2} \rho v^2$ est l'énergie cinétique par unité de volume (on l'appelle pression dynamique) ;
- $\rho g z$ est l'énergie potentielle de pesanteur par unité de volume ;
- P représente le travail des forces de pression par unité de volume.

La relation de Bernoulli traduit donc la **conservation de l'énergie mécanique** d'un volume de fluide qui se déplace le long d'une ligne de courant, en l'absence de frottements. Pour la justifier, on suit une petite tranche de fluide de volume V : entre l'entrée et la sortie d'un tube de courant, la variation de son énergie mécanique $\frac{1}{2} m v^2 + m g z$ est égale au travail des forces pressantes exercées par le fluide en amont (qui pousse) et en aval (qui retient), soit $(P_1 - P_2) V$. En divisant par V et en utilisant $m = \rho V$, on obtient la relation.

Cas particuliers.

- **Fluide au repos** ($v_1 = v_2 = 0$) : on retrouve $P_1 + \rho g z_1 = P_2 + \rho g z_2$, la loi fondamentale de la statique.
- **Vidange d'un réservoir (formule de Torricelli).** Un grand réservoir ouvert, dont la surface libre est à la hauteur h au-dessus d'un petit orifice, se vide. Entre la surface libre ($P(\text{atm})$, vitesse quasi nulle car le réservoir est large, altitude h) et le jet à la sortie ($P(\text{atm})$, vitesse v , altitude 0) : $P(\text{atm}) + \rho g h = P(\text{atm}) + \frac{1}{2} \rho v^2$. D'où $v = \sqrt{2gh}$: la vitesse du jet est celle d'un objet tombé en chute libre de la hauteur h .

Limites. Un fluide réel est visqueux : une partie de l'énergie mécanique est dissipée par frottement, surtout dans les conduites longues et étroites. On parle de **perte de charge**. La relation de Bernoulli reste une bonne approximation pour des écoulements rapides sur de courtes distances (jet, rétrécissement, aile d'avion), mais elle échoue dans les petits vaisseaux sanguins, où la viscosité domine. Elle ne s'applique pas non plus aux écoulements turbulents, où le régime n'est plus permanent.

7. L'effet Venturi et ses applications

Énoncé. Dans une canalisation horizontale ($z_1 = z_2$), la relation de Bernoulli devient $P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$, soit :

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Combinée à la conservation du débit, elle conduit à l'**effet Venturi** : dans un rétrécissement, la vitesse du fluide augmente, donc sa pression diminue. Une pression plus faible là où l'écoulement est plus



rapide : c'est contre-intuitif, mais cela découle directement de la conservation de l'énergie, puisque le gain d'énergie cinétique se paie par une baisse de pression.

Le tube de Venturi, débitmètre. On insère dans une canalisation un rétrécissement de section S_2 connue, et l'on mesure la différence de pression $P_1 - P_2$ entre la partie large (section S_1) et le col, par exemple avec deux tubes verticaux dont la dénivellation h donne $P_1 - P_2 = \rho gh$. Avec $v_2 = v_1 \times S_1 / S_2$:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \times \left(\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right)$$

On en déduit v_1 , puis le débit $D(v) = S_1 v_1$. Cette méthode ne demande aucune pièce mobile dans l'écoulement.

Autres applications.

- La trompe à eau des laboratoires : un jet d'eau rapide crée une zone de basse pression qui aspire l'air d'un récipient (filtration sous pression réduite).
- Le pulvérisateur et le nébuliseur : l'air rapide au-dessus d'un tube plongeant crée une dépression qui aspire le liquide et le disperse en gouttelettes.
- La **sténose artérielle** : au niveau d'un rétrécissement d'artère, le sang accélère et sa pression baisse localement. La paroi, moins soutenue, peut se rapprocher de l'axe, ce qui aggrave encore le rétrécissement ; l'écoulement peut devenir turbulent, ce qui produit un souffle audible au stéthoscope.
- Le tube de Pitot des avions mesure la vitesse par la différence entre pression d'arrêt (où $v = 0$) et pression statique : $P(\text{arrêt}) - P = \frac{1}{2} \rho v^2$.

Applications de l'effet Venturi

Débitmètre de Venturi

Trompe à eau

Pulvérisateur et nébuliseur

Sténose artérielle

Tube de Pitot

Repères complémentaires, sans séquence causale

Retiens la chaîne : section plus petite, donc vitesse plus grande (conservation du débit), donc pression plus faible (relation de Bernoulli). Les deux lois ne s'appliquent qu'à un fluide incompressible en écoulement permanent, et Bernoulli exige en plus un fluide parfait.

Exemples résolus

Exemple 1 : un plongeur et son ballon

Énoncé. Un plongeur descend dans la mer ($\rho = 1\,025\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). La pression atmosphérique vaut $1,013\times 10^5\text{ Pa}$ et $g = 9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. a) Calculer la pression absolue à 15,0 m de profondeur. b) À quelle profondeur la pression absolue vaut-elle le double de la pression atmosphérique ? c) Un ballon souple contenant 6,0 L d'air à la surface est emmené à 15,0 m ; la température restant constante, le produit $P \times V$ de l'air est constant (loi de Boyle-Mariotte). Quel est son volume au fond ?

Résolution. a) La loi fondamentale de la statique entre la surface (pression $P(\text{atm})$) et la profondeur h s'écrit $P = P(\text{atm}) + \rho gh$. Ici $\rho gh = 1\,025 \times 9,81 \times 15,0 = 1,508\times 10^5\text{ Pa}$. Donc $P = 1,013\times 10^5 + 1,508\times 10^5 = 2,521\times 10^5\text{ Pa}$, soit $P \approx 2,52\times 10^5\text{ Pa}$ (environ 2,5 bar). b) On veut $P = 2 P(\text{atm})$, donc $\rho gh = P(\text{atm})$, soit $h = P(\text{atm}) / (\rho g) = 1,013\times 10^5 / (1\,025 \times 9,81) = 1,013\times 10^5 / 1,006\times 10^4 \approx 10,1\text{ m}$. c) $P(\text{surface}) \times V(\text{surface}) = P(\text{fond}) \times V(\text{fond})$, donc $V(\text{fond}) = 6,0 \times 1,013\times 10^5 / 2,521\times 10^5 \approx 2,4\text{ L}$. Le volume est divisé par environ 2,5 : c'est pourquoi un plongeur en apnée sent ses poumons comprimés et pourquoi un plongeur en scaphandre ne doit jamais remonter en bloquant sa respiration.

Exemple 2 : un cube de bois qui flotte

Énoncé. Un cube de bois homogène de côté $a = 10,0\text{ cm}$ et de masse volumique $600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ flotte sur l'eau ($1,00\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). On prend $g = 9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. a) Calculer son poids. b) Déterminer la hauteur immergée. c) Quelle force verticale faut-il exercer sur sa face supérieure pour le maintenir totalement immergé ?

Résolution. a) $V = a^3 = (0,100\text{ m})^3 = 1,00\times 10^{-3}\text{ m}^3$. $m = \rho V = 600 \times 1,00\times 10^{-3} = 0,600\text{ kg}$. Poids : $P = mg = 0,600 \times 9,81 \approx 5,89\text{ N}$. b) À l'équilibre, la poussée compense le poids : $\rho(\text{eau}) \times V(\text{immergé}) \times g = \rho(\text{bois}) \times V \times g$, donc $V(\text{immergé}) / V = 600 / 1\,000 = 0,600$. Le cube flotte face horizontale, donc la hauteur immergée vaut $0,600 \times 10,0\text{ cm} = 6,00\text{ cm}$. c) Totalement immergé, le cube subit $\Pi = \rho(\text{eau}) V g = 1\,000 \times 1,00\times 10^{-3} \times 9,81 = 9,81\text{ N}$, vers le haut. Pour l'équilibre, la force F exercée vers le bas vérifie $F + P = \Pi$, d'où $F = 9,81 - 5,89 = 3,92\text{ N}$, verticale vers le bas.

Exemple 3 : un débitmètre de Venturi

Énoncé. De l'eau ($\rho = 1,00\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) circule dans une canalisation horizontale de section $S_1 = 20,0\text{ cm}^2$, qui se rétrécit en un col de section $S_2 = 5,00\text{ cm}^2$. Le débit volumique vaut $2,00\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. L'eau est assimilée à un fluide parfait incompressible en écoulement permanent. a) Calculer les vitesses v_1 et v_2 . b) Calculer la différence de pression $P_1 - P_2$. c) Deux tubes verticaux ouverts sont branchés sur la partie large et sur le col. Quelle est la dénivellation entre les niveaux d'eau dans ces tubes ?

Résolution. a) $D(v) = 2,00\times 10^{-3}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $S_1 = 2,00\times 10^{-3}\text{ m}^2$, $S_2 = 5,00\times 10^{-4}\text{ m}^2$. $v_1 = D(v) / S_1 = 1,00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $v_2 = D(v) / S_2 = 4,00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. On vérifie la conservation du débit : la section est divisée par 4, la vitesse multipliée par 4. b) Canalisation horizontale : $P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0,5 \times 1\,000 \times (16,0 - 1,00) = 7,50\times 10^3\text{ Pa}$. La pression est plus faible au col, comme le prévoit l'effet Venturi. c) Dans chaque tube vertical, l'eau est au repos ; la loi fondamentale donne $P_1 - P_2 = \rho gh$, donc $h = 7,50\times 10^3 / (1\,000 \times 9,81) \approx 0,765\text{ m}$, soit $h \approx 76\text{ cm}$, le niveau le plus bas étant au-dessus du col.

Méthodes et pièges

- Méthode type en statique : choisis deux points dans le même fluide immobile et continu, écris $P(\text{bas}) = P(\text{haut}) + \rho gh$, puis seulement remplace par les valeurs. Si deux liquides différents se superposent, applique la loi dans chaque liquide séparément.
- Travaille en unités SI : volumes en m^3 , sections en m^2 , pressions en Pa. Les pièges classiques sont $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$, $1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$, $1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$ et $1 \text{ mmHg} \approx 133 \text{ Pa}$.
- Ne confonds pas pression absolue et pression relative : la loi de Boyle-Mariotte utilise toujours la pression absolue, alors qu'un manomètre ou un tensiomètre affiche une pression relative.
- Dans $\Pi = \rho V g$, ρ est la masse volumique du fluide, pas celle de l'objet, et V est le volume immergé, pas le volume total si l'objet flotte.
- Le diamètre et la section ne varient pas proportionnellement : diviser le diamètre par k divise la section par k^2 , donc multiplie la vitesse par k^2 .
- Avant d'écrire Bernoulli, vérifie les trois conditions (fluide parfait, incompressible, écoulement permanent) et que les deux points sont sur la même ligne de courant. En sortie de jet à l'air libre, la pression du jet vaut $P(\text{atm})$.
- Pour un réservoir large qui se vide, la vitesse de la surface libre est négligeable devant celle du jet : c'est ce qui permet d'écrire $v = \sqrt{2gh}$. Justifie cette approximation par la conservation du débit.
- Ne crois pas qu'une vitesse plus grande s'accompagne d'une pression plus grande : dans un rétrécissement horizontal, c'est l'inverse.

Vers le PASS

En PASS et en LAS, la mécanique des fluides fait partie de la biophysique et sert d'abord à comprendre la circulation sanguine et la respiration. La loi fondamentale de la statique explique pourquoi la pression artérielle diffère entre la tête, le cœur et les pieds chez un sujet debout, et pourquoi on mesure la tension au bras, à hauteur du cœur. La conservation du débit relie le débit cardiaque à la vitesse du sang dans l'aorte et dans les capillaires, et l'effet Venturi éclaire le comportement d'une sténose.

Le modèle du fluide parfait sera ensuite complété par la viscosité : écoulement laminaire ou turbulent, nombre de Reynolds, loi de Poiseuille qui relie le débit à la différence de pression dans un tube fin, notion de résistance hydraulique et de puissance d'un écoulement. S'y ajoutent la tension superficielle et la loi de Laplace (alvéoles pulmonaires), ainsi que les pressions osmotique et oncotique dans les échanges capillaires. La rigueur sur les unités prise ici (Pa, mmHg, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) y est constamment exigée.

Suite en PASS : Pressions et écoulements des fluides

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. Un flacon contient 250 mL de glycérol, de masse 315 g. Calcule la masse volumique du glycérol en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, puis sa densité.
2. Une table rectangulaire mesure 1,20 m sur 0,80 m. Calcule la valeur de la force pressante exercée par l'atmosphère ($P(\text{atm}) = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$) sur son plateau, puis explique pourquoi la table ne

s'effondre pas.

3. Une piscine a une profondeur de 3,0 m. Calcule la différence de pression entre la surface et le fond, puis la pression absolue au fond. Données : $\rho(\text{eau}) = 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; $P(\text{atm}) = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$.
4. Un robinet remplit un seau de 10 L en 25 s. a) Calcule le débit volumique en $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ puis en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. b) Le tuyau qui alimente le robinet a un diamètre intérieur de 2,0 cm : calcule la vitesse moyenne de l'eau dans ce tuyau.
5. Une personne de volume 70 L et de masse 70 kg se tient dans l'air ($\rho(\text{air}) = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Calcule la poussée d'Archimède exercée par l'air sur elle et compare-la à son poids ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Niveau 2 : type bac

6. Pression artérielle et posture. Chez une personne debout, la pression artérielle moyenne relative au niveau du cœur vaut 100 mmHg. On modélise le sang comme un fluide de masse volumique $1,06 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et l'on néglige les effets de la vitesse d'écoulement. Données : $1 \text{ mmHg} = 133,3 \text{ Pa}$; $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
 - a) Convertis 100 mmHg en pascals. b) Calcule la pression artérielle moyenne relative au niveau des pieds, situés 1,30 m sous le cœur, en Pa puis en mmHg. c) Même question pour le cerveau, situé 0,40 m au-dessus du cœur. d) Pourquoi mesure-t-on la pression artérielle au bras, à hauteur du cœur ?
7. Le glaçon et l'iceberg. Un glaçon de volume $20,0 \text{ cm}^3$ ($\rho(\text{glace}) = 917 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) flotte dans un verre d'eau douce ($\rho = 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$).
 - a) Calcule la fraction immergée du glaçon. b) Calcule le volume émergé. c) Montre que le niveau de l'eau dans le verre ne change pas quand le glaçon fond. d) Quelle fraction d'un iceberg émerge dans l'eau de mer ($\rho = 1\,025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ?
8. Château d'eau. La surface libre de l'eau d'un château d'eau se trouve 35,0 m au-dessus d'un robinet. Données : $\rho = 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
 - a) Robinet fermé, calcule la pression relative de l'eau au niveau du robinet, en Pa puis en bar. b) Robinet grand ouvert, l'eau étant supposée parfaite et le réservoir très large, calcule la vitesse de sortie de l'eau. c) L'orifice du robinet a une section de $1,0 \text{ cm}^2$. Calcule le débit théorique. d) Le débit mesuré est bien plus faible. Propose une explication.
9. Injection à la seringue. Le piston d'une seringue a une section de $2,0 \text{ cm}^2$; l'aiguille a une section intérieure de $0,50 \text{ mm}^2$. On pousse le piston à la vitesse constante de $1,0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ pour injecter une solution aqueuse ($\rho = 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), dans l'air, en tenant la seringue horizontale.
 - a) Calcule le débit volumique et la vitesse du liquide dans l'aiguille. b) Combien de temps faut-il pour injecter 5,0 mL ? c) En assimilant la solution à un fluide parfait et en prenant la pression à la sortie de l'aiguille égale à $P(\text{atm})$, calcule la surpression nécessaire dans le corps de la seringue, puis la force à exercer sur le piston en plus de celle due à l'atmosphère.
10. Tube en U. Un tube en U de section constante contient du mercure ($\rho(\text{Hg}) = 13,6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). On verse dans la branche de gauche une hauteur de 20,0 cm d'eau ($\rho = 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), qui ne se mélange pas au mercure.
 - a) Explique pourquoi la pression est la même dans le mercure aux deux points situés au niveau de l'interface eau/mercure. b) Calcule la dénivellation entre les deux surfaces de mercure. c) Calcule la dénivellation entre la surface libre de l'eau et la surface libre du mercure de la branche de droite.

Niveau 3 : vers le PASS

11. Sténose artérielle. Dans une artère horizontale, le sang ($\rho = 1,06 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, assimilé à un fluide parfait) circule à $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Une plaque d'athérome réduit localement le diamètre intérieur de moitié.

a) Par quel facteur la vitesse est-elle multipliée dans la sténose ? Calcule-la. b) Calcule la baisse de pression dans la sténose, en Pa puis en mmHg ($1 \text{ mmHg} = 133,3 \text{ Pa}$). c) Explique en quoi cette baisse de pression peut aggraver la sténose. d) Généralise : si le diamètre est divisé par k , par quel facteur la pression dynamique $\frac{1}{2}\rho v^2$ est-elle multipliée ?

12. Ballon-sonde. Un ballon-sonde contient $4,00 \text{ m}^3$ d'hélium ($\rho = 0,170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). L'enveloppe et les instruments ont une masse de $1,50 \text{ kg}$. L'air environnant a une masse volumique de $1,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Le volume des instruments et de l'enveloppe est négligé.

a) Calcule la poussée d'Archimède exercée par l'air. b) Calcule le poids total du ballon (hélium compris). c) Le ballon décolle-t-il ? Calcule la masse supplémentaire maximale qu'il pourrait emporter.

13. Mesurer un débit. De l'eau ($\rho = 1,00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) s'écoule dans une canalisation horizontale de section $S_1 = 12,0 \text{ cm}^2$ munie d'un col de section $S_2 = 3,00 \text{ cm}^2$. Deux tubes verticaux ouverts, branchés avant le col et au col, présentent une dénivellation de $30,0 \text{ cm}$. On prend $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et l'on modélise l'eau comme un fluide parfait incompressible en écoulement permanent. Détermine la vitesse dans la partie large et le débit volumique, en $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$.

14. QCM. Indique pour chaque proposition si elle est vraie ou fausse, en justifiant.

A. La pression absolue à 20 m de profondeur dans la mer est le double de celle à 10 m . B. La poussée d'Archimède exercée par l'eau sur un caillou totalement immergé ne dépend pas de sa profondeur. C. Si le diamètre d'un tuyau est divisé par 3, la vitesse de l'eau y est multipliée par 3. D. Dans un écoulement horizontal d'un fluide parfait incompressible en régime permanent, la pression est plus faible là où la vitesse est plus grande. E. La relation de Bernoulli décrit correctement l'écoulement du sang dans les capillaires.

Corrigés

1. Conversions : $m = 315 \text{ g} = 0,315 \text{ kg}$; $V = 250 \text{ mL} = 250 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 2,50 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Masse volumique : $\rho = m / V = 0,315 / 2,50 \times 10^{-4} = 1,26 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Densité : $d = \rho / \rho(\text{eau}) = 1\,260 / 1\,000 = 1,26$ (sans unité).

2. Surface : $S = 1,20 \times 0,80 = 0,96 \text{ m}^2$. Force pressante : $F = P(\text{atm}) \times S = 1,013 \times 10^5 \times 0,96 \approx 9,7 \times 10^4 \text{ N}$, verticale vers le bas, soit le poids d'environ 10 tonnes. La table ne s'effondre pas car l'air est aussi présent sous le plateau et exerce sur la face inférieure une force pressante pratiquement égale et opposée : la résultante des forces pressantes atmosphériques sur le plateau est quasi nulle.

3. Loi fondamentale : $\Delta P = \rho gh = 1,00 \times 10^3 \times 9,81 \times 3,0 = 2,94 \times 10^4 \text{ Pa}$, soit $\Delta P \approx 2,9 \times 10^4 \text{ Pa}$. Pression absolue au fond : $P = P(\text{atm}) + \Delta P = 1,013 \times 10^5 + 0,294 \times 10^5 = 1,31 \times 10^5 \text{ Pa}$.

4. a) $D(v) = V / \Delta t = 10 \text{ L} / 25 \text{ s} = 0,40 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} = 0,40 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

b) Rayon $r = 1,0 \text{ cm} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ m}$; section $S = \pi r^2 = \pi \times (1,0 \times 10^{-2})^2 = 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Vitesse : $v = D(v) / S = 4,0 \times 10^{-4} / 3,14 \times 10^{-4} \approx 1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. $V = 70 \text{ L} = 7,0 \times 10^{-2} \text{ m}^3$. Poussée : $\Pi = \rho(\text{air}) V g = 1,2 \times 7,0 \times 10^{-2} \times 9,81 \approx 0,82 \text{ N}$. Poids : $P = mg = 70 \times 9,81 \approx 6,9 \times 10^2 \text{ N}$. Rapport : $\Pi / P = 0,82 / 687 \approx 1,2 \times 10^{-3}$. La poussée d'Archimède de l'air vaut environ un millièème du poids : **elle est négligeable**. On retrouve le rapport des masses volumiques air / corps humain ($1,2 / 1\,000$).

6. a) $100 \times 133,3 = 1,333 \times 10^4 \text{ Pa}$.

b) Les pieds sont 1,30 m plus bas : la pression y est plus grande de $\rho gh = 1,06 \times 10^3 \times 9,81 \times 1,30 = 1,352 \times 10^4 \text{ Pa}$, soit $1,352 \times 10^4 / 133,3 \approx 101 \text{ mmHg}$. Pression relative aux pieds : $1,333 \times 10^4 + 1,352 \times 10^4 = 2,69 \times 10^4 \text{ Pa} \approx 201 \text{ mmHg}$. c) Le cerveau est 0,40 m plus haut : la pression y est plus faible de $1,06 \times 10^3 \times 9,81 \times 0,40 = 4,16 \times 10^3 \text{ Pa} \approx 31 \text{ mmHg}$. Pression relative : $1,333 \times 10^4 - 0,416 \times 10^4 = 9,17 \times 10^3 \text{ Pa} \approx 69 \text{ mmHg}$. d) La pression artérielle dépend de la hauteur du point de mesure. Pour obtenir une valeur comparable d'un patient à l'autre, représentative de la pression à la sortie du cœur, on mesure à la même altitude que le cœur ; le bras, posé à hauteur du cœur, s'y prête.

7. a) Équilibre de flottaison : fraction immergée = $\rho(\text{glace}) / \rho(\text{eau}) = 917 / 1\,000 = 0,917$, soit 91,7 %.

b) $V(\text{émergé}) = 20,0 \times (1 - 0,917) = 20,0 \times 0,083 \approx 1,7 \text{ cm}^3$. c) Masse du glaçon : $m = 917 \times 20,0 \times 10^{-6} = 1,834 \times 10^{-2} \text{ kg} = 18,34 \text{ g}$. Il déplace un volume d'eau de masse égale à la sienne, soit 18,34 g d'eau, c'est-à-dire $18,34 \text{ cm}^3$. En fondant, il donne 18,34 g d'eau liquide, qui occupent exactement $18,34 \text{ cm}^3$: ce volume remplit exactement le « trou » qu'il occupait sous la surface. **Le niveau ne change pas.** d) Fraction immergée : $917 / 1\,025 \approx 0,895$. Fraction émergée : $1 - 0,895 = 0,105$, soit environ 10 %.

8. a) Loi fondamentale : $P - P(\text{atm}) = \rho gh = 1,00 \times 10^3 \times 9,81 \times 35,0 = 3,43 \times 10^5 \text{ Pa}$, soit 3,43 bar.

b) Bernoulli entre la surface libre ($P(\text{atm})$, $v \approx 0$ car le réservoir est très large, altitude h) et la sortie du robinet ($P(\text{atm})$, v , altitude 0) : $\rho gh = \frac{1}{2} \rho v^2$, donc $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9,81 \times 35,0} = \sqrt{687} \approx 26,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. c) $D(v) = S v = 1,0 \times 10^{-4} \times 26,2 \approx 2,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, soit $2,6 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. d) L'eau réelle est visqueuse : dans les canalisations longues qui relient le château d'eau au robinet, les frottements dissipent une grande partie de l'énergie mécanique (**pertes de charge**). Le modèle du fluide parfait surestime donc la vitesse et le débit.

9. a) Dans le corps de la seringue : $D(v) = S_1 v_1 = 2,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 1,0 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} = 2,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, soit $2,0 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$. Dans l'aiguille, $S_2 = 0,50 \text{ mm}^2 = 5,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, et $v_2 = D(v) / S_2 = 2,0 \times 10^{-6} / 5,0 \times 10^{-7} = 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

b) $\Delta t = V / D(v) = 5,0 \text{ mL} / 2,0 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1} = 2,5 \text{ s}$. c) Bernoulli, seringue horizontale : $P_1 - P(\text{atm}) = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0,5 \times 1\,000 \times (16 - 1,0 \times 10^{-4}) \approx 8,0 \times 10^3 \text{ Pa}$. Force supplémentaire sur le piston : $F = (P_1 - P(\text{atm})) \times S_1 = 8,0 \times 10^3 \times 2,0 \times 10^{-4} = 1,6 \text{ N}$. En réalité, la viscosité dans l'aiguille fine impose une force nettement plus grande.

10. a) Le mercure est un fluide continu et immobile : deux points du mercure à la même altitude ont la même pression (les isobares sont horizontales). C'est vrai pour les points au niveau de l'interface, car ce niveau est entièrement dans le mercure dans les deux branches.

b) Au niveau de l'interface, côté gauche : $P = P(\text{atm}) + \rho(\text{eau}) g h(\text{eau})$. Au même niveau, côté droit : $P = P(\text{atm}) + \rho(\text{Hg}) g \Delta h$, où Δh est la hauteur de mercure au-dessus de ce niveau dans la branche droite. Égalité : $\rho(\text{eau}) h(\text{eau}) = \rho(\text{Hg}) \Delta h$, donc $\Delta h = 1\,000 \times 20,0 / 13\,600 \approx 1,47 \text{ cm}$. c) La surface de l'eau est 20,0 cm au-dessus de l'interface ; celle du mercure à droite est 1,47 cm au-dessus. Dénivellation : $20,0 - 1,47 \approx 18,5 \text{ cm}$, la surface de l'eau étant la plus haute.

11. a) Diviser le diamètre par 2 divise la section par $2^2 = 4$. Conservation du débit : $v_2 = 4 v_1 = 1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

b) Bernoulli, artère horizontale : $P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0,5 \times 1\,060 \times (1,44 - 0,090) = 0,5 \times 1\,060 \times 1,35 \approx 7,2 \times 10^2 \text{ Pa}$, soit $715 / 133,3 \approx 5,4 \text{ mmHg}$. c) La pression du sang sur la paroi diminue dans la sténose alors que la pression des tissus extérieurs ne change pas : la paroi est moins soutenue et tend à se rapprocher de l'axe, ce qui **rétrécit encore** le passage, accélère encore le sang et fait encore baisser la pression. L'écoulement peut aussi devenir turbulent. d) La section est divisée par k^2 , la vitesse multipliée par k^2 , donc v^2 et la pression dynamique $\frac{1}{2}\rho v^2$ sont **multipliées par k^4** . Une réduction de diamètre modeste a donc des effets importants.

12. a) Volume déplacé : $4,00 \text{ m}^3$. $\Pi = \rho(\text{air}) V g = 1,20 \times 4,00 \times 9,81 \approx 47,1 \text{ N}$, vers le haut.

b) Masse d'hélium : $0,170 \times 4,00 = 0,680 \text{ kg}$. Masse totale : $0,680 + 1,50 = 2,18 \text{ kg}$. Poids : $2,18 \times 9,81 \approx 21,4 \text{ N}$. c) $\Pi > P$, donc la résultante est verticale vers le haut et vaut $47,1 - 21,4 = 25,7 \text{ N}$: **le ballon décolle**. Il peut emporter une masse supplémentaire m telle que $m g \leq 25,7 \text{ N}$, soit $m \leq 25,7 / 9,81 \approx 2,62 \text{ kg}$.

13. Différence de pression lue sur les tubes (fluide au repos dans les tubes) : $P_1 - P_2 = \rho g h = 1\,000 \times 9,81 \times 0,300 = 2,94 \times 10^3 \text{ Pa}$. Conservation du débit : $v_2 = v_1 \times S_1 / S_2 = 4,00 v_1$. Bernoulli horizontal : $P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \rho v_1^2 (16,0 - 1,00) = 7,50 \rho v_1^2$. D'où $v_1^2 = 2,94 \times 10^3 / (7,50 \times 1\,000) = 0,392 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, et $v_1 \approx 0,626 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Débit : $D(v) = S_1 v_1 = 12,0 \times 10^{-4} \times 0,626 \approx 7,52 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit $D(v) \approx 0,75 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$.

14. A. **Faux**. $P(10 \text{ m}) = 1,013 \times 10^5 + 1\,025 \times 9,81 \times 10 \approx 2,02 \times 10^5 \text{ Pa}$; $P(20 \text{ m}) \approx 1,013 \times 10^5 + 2,01 \times 10^5 \approx 3,02 \times 10^5 \text{ Pa}$. Le rapport vaut environ 1,5, car la pression atmosphérique s'ajoute à la pression due à l'eau.

B. **Vrai**. $\Pi = \rho V g$ ne dépend que du volume immergé et de la masse volumique du liquide, qui est incompressible, donc indépendante de la profondeur. C. **Faux**. La section est divisée par $3^2 = 9$, donc la vitesse est multipliée par 3. D. **Vrai**. C'est l'effet Venturi : $P + \frac{1}{2}\rho v^2$ est constante sur une ligne de courant horizontale. E. **Faux**. Dans les capillaires, très fins et à écoulement lent, la viscosité domine : le modèle du fluide parfait n'est pas valable, il faut une loi qui tient compte des frottements (loi de Poiseuille, vue en PASS).