# 1 La poussée d'Archimède

## Origine de la poussée d'Archimède

Tout objet plongé dans un fluide (un liquide ou un gaz), subit de la part de ce fluide des actions mécaniques qui agissent sur sa surface en contact avec le fluide. Ces actions sont modélisées par des **forces pressantes** $\vec{F}$ dont la valeur $F$ augmente avec la pression $P$ du fluide (et l'aire $S$ de la surface de l'objet) : $F = P \cdot S$.

Par ailleurs, d'après la **loi fondamentale de la statique des fluides** ($\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta z$) la pression $P$ exercée par un fluide augmente avec la profondeur d'immersion (FIG. 1).

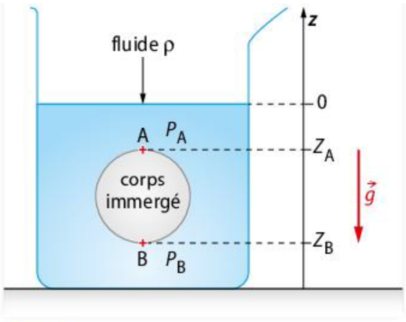



**FIG. 1** $z_B < z_A$ donc $P_B > P_A$.
La pression du fluide est plus importante en B qu'en A.

Ainsi, les forces pressantes $\vec{F}$ qui modélisent les actions mécaniques du fluide sur la surface d'un objet immergé ne se compensent pas parfaitement : elles sont plus intenses sur le bas de l'objet que sur le haut (FIG. 2a). Il en résulte une action mécanique modélisée par une force verticale et orientée vers le haut : la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ (FIG. 2b).

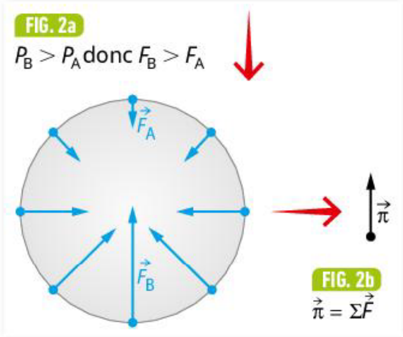



**FIG. 2** Modélisation de la poussée d'Archimède.

## Expression vectorielle de la poussée d'Archimède

Tout corps immergé, tout ou en partie, dans un fluide, subit de la part du fluide des actions mécaniques modélisées par une **force verticale**, dirigée **vers le haut** de **valeur égale au poids du volume de fluide déplacé** (FIG. 3).
L'expression de cette force nommée **poussée d'Archimède** $\vec{\pi}$ est :

poussée d'Archimède de valeur $\pi$ (**N**)
masse volumique du fluide (**kg · m⁻³**)

$$\vec{\pi} = -m_f \cdot \vec{g} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$$

champ de pesanteur terrestre d'intensité $g$ (**N · kg⁻¹** ou **m · s⁻²**)
masse du fluide déplacé (**kg**)
volume du fluide déplacé (**m³**)

**EXEMPLE**

Une bille en acier (de volume $V = 5{,}0$ cm$^3$ et de masse volumique $\rho_{Fe} = 7{,}8 \times 10^3$ kg · m$^{-3}$) totalement immergée dans l'eau ($\rho_{eau} = 1{,}0 \times 10^3$ kg · m$^{-3}$) subit une poussée $\vec{\pi}$ verticale dirigée vers le haut de valeur $\pi = \rho_f \cdot V \cdot g$.
AN : $\pi = 1{,}0 \times 10^3 \times 5{,}0 \times 10^{-6} \times 9{,}8 = 4{,}9 \times 10^{-2}$ N.

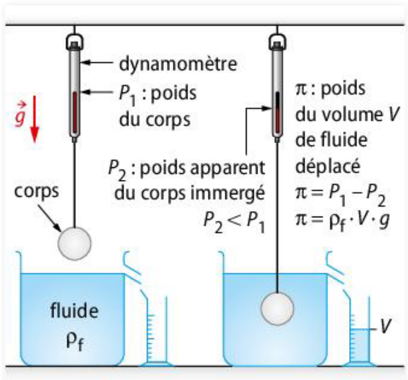



**FIG. 3** La poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ est responsable du poids apparent $\vec{P_2}$ du corps immergé dans le fluide.

## Exploitation de l'expression de la poussée d'Archimède

La **poussée d'Archimède** $\vec{\pi}$ a la même direction que le champ de pesanteur terrestre $\vec{g}$ mais est de sens opposé : il s'agit donc d'une force toujours verticale et orientée vers le haut. Dans le champ de pesanteur $\vec{g}$ constant, sa **valeur** $\pi = \rho_f \cdot V \cdot g$ dépend du volume $V$ du corps immergé et de la masse volumique $\rho_f$ du fluide. La masse du corps, sa forme, son orientation dans le fluide et la profondeur d'immersion (pour un corps totalement immergé), n'influent pas sur sa valeur.

**Remarque.** Plus le corps immergé est volumineux ou plus le fluide est dense (ou les deux à la fois) et plus la valeur de la poussée d'Archimède est grande.

Les paramètres d'influence de la poussée d'Archimède sont largement mis en jeu en aéronautique, en plongée sous-marine ou encore dans la construction navale.

**EXEMPLE**

Les bateaux sont conçus de telle sorte que le poids du volume d'eau déplacé (donc la valeur de la poussée d'Archimède) est toujours égal au poids du bateau (et de son contenu).

**BONUS**
**Poussée d'Archimède**
bordas Flash PAGE vidéo

Une vidéo pour expliquer l'expression de la poussée d'Archimède.

# 2 Écoulement d'un fluide incompressible

## Régime permanent d'écoulement d'un fluide

L'**écoulement** d'un fluide est modélisé par des **lignes de courant**. Ces lignes représentent les trajectoires des particules du fluide en mouvement (FIG. 4).

On dit qu'un fluide s'écoule en **régime permanent** (ou stationnaire) lorsque les lignes de courant n'évoluent pas au cours du temps : la vitesse $\vec{v}$ en un point quelconque du fluide conserve alors les mêmes caractéristiques au cours du temps.

**EXEMPLE**

Sur la figure 4, si $\vec{v}_A$ et $\vec{v}_B$ ne varient pas au cours du temps alors le régime est permanent. $\vec{v}_A$ peut être différent de $\vec{v}_B$ (en direction et en valeur).

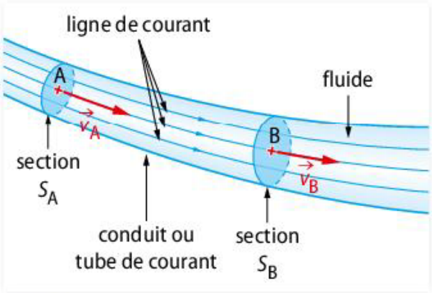



**FIG. 4** Modélisation de l'écoulement d'un fluide incompressible.

## Débit volumique et vitesse d'un fluide incompressible

Le **débit volumique *Q*** d'un fluide représente le volume de fluide qui traverse une section *S* du conduit par unité de temps (FIG. 5).

$$Q = \frac{V}{\Delta t}$$

débit volumique ($m^3 \cdot s^{-1}$) ; volume de fluide écoulé ($m^3$) ; durée de l'écoulement (s)

**EXEMPLE**

Chaque jour, la Loire rejette près de $80 \times 10^7$ $m^3$ d'eau dans l'océan. Son débit volumique moyen est :

$$Q = \frac{80 \times 10^6}{24 \times 3600} = 926\ m^3 \cdot s^{-1} \approx 9{,}3 \times 10^2\ m^3 \cdot s^{-1}.$$

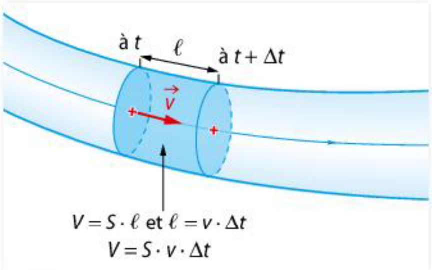



**FIG. 5** Volume *V* et vitesse *v* d'un fluide traversant la section *S* d'un conduit.

Si un fluide traverse à la vitesse $\vec{v}$ la section d'aire *S* d'un conduit en une durée $\Delta t$ alors le volume *V* de fluide ayant traversé *S* peut s'écrire : $V = S \cdot v \cdot \Delta t$ (FIG. 5).

Il vient alors : $Q = \dfrac{V}{\Delta t} = \dfrac{S \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta t} = v \cdot S$.

La **relation** entre le **débit volumique $Q_v$** et la **vitesse *v*** du fluide s'écrit :

$$Q = v \cdot S$$

débit volumique ($m^3 \cdot s^{-1}$) ; aire de la section du conduit ($m^2$) ; vitesse du fluide ($m \cdot s^{-1}$)

En **régime permanent**, le débit volumique d'un fluide traversant la section *S* d'un conduit est constant au cours du temps.

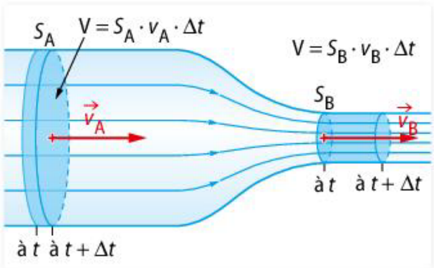



**FIG. 6** Pendant une durée $\Delta t$, le même volume *V* de fluide traverse les sections $S_A$ et $S_B$.

## Conservation du débit volumique

Lors de l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent, il n'y a pas de perte de matière (FIG. 6).

En régime permanent, il y a **conservation du débit volumique *Q*** d'un fluide incompressible le long d'un écoulement donc en tous points A et B d'un écoulement on a : $Q_{(A)} = Q_{(B)}$ soit $v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$.

La vitesse *v* du fluide et l'aire *S* de la section traversée sont deux grandeurs inversement proportionnelles : $\dfrac{v_B}{v_A} = \dfrac{S_A}{S_B}$.

Si $S_A > S_B$ alors $v_B > v_A$ (FIG. 6). La **vitesse du fluide augmente lorsque la section du conduit rétrécie**. (FIG. 7).

**FIG. 7** La vitesse d'écoulement de l'eau est triplée lorsque l'aire de la section d'un tuyau d'arrosage est divisée par 3. (si $\dfrac{S_A}{S_B} = 3$ alors $v_B = \dfrac{S_A}{S_B} \cdot v_A = 3 \cdot v_A$).

# 3 Relation de Bernoulli et conséquences

## Relation de Bernoulli

Pour l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent et sans frottement (donc sans échange d'énergie ni par travail ni par transfert thermique), la **relation de Bernoulli** modélise les évolutions de la pression $P$, de la vitesse $v$ et de l'altitude $z$ le long d'une ligne de courant dans un fluide de masse volumique $\rho$ dans le champ de pesanteur $\vec{g}$ :

$$\underbrace{P}_{\text{pression du fluide (Pa)}} + \frac{1}{2}\overbrace{\rho}^{\text{masse volumique du fluide }(\mathbf{kg \cdot m^{-3}})} \underbrace{v^2}_{\text{vitesse du fluide }(\mathbf{m \cdot s^{-1}})} + \rho \cdot \underbrace{g}_{\text{intensité de pesanteur }(\mathbf{N \cdot kg^{-1}})} \cdot \overbrace{z}^{\text{altitude (m)}} = \text{constante}$$

Pour deux points A et B d'une même ligne de courant (FIG. 8), cette relation s'écrit : $P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$.

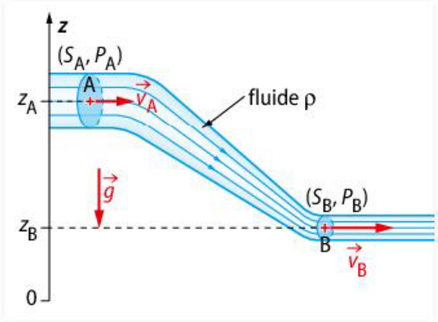



**FIG. 8** En régime permanent, sur une même ligne de courant les grandeurs caractéristiques du fluide qui s'écoule ($P$, $\rho$, $v$, $z$) sont liées par la relation de Bernoulli.

La relation de Bernoulli traduit la conservation de l'énergie totale d'un fluide le long d'une ligne de courant. Elle permet d'interpréter le comportement des fluides dans de nombreux domaines : les écoulements sanguins en médecine, le mouvement des masses d'air et d'eau en géophysique, les flux d'air en aéronautique, l'écoulement de l'eau dans les réseaux d'alimentation.

**EXEMPLE**

La vitesse de l'eau en sortie du robinet d'une installation domestique alimentée par un château peut être estimée à partir de relation de Bernoulli (FIG. 9) :

$P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$ s'écrit dans ce cas

$P_{atm} + \rho \cdot g \cdot z_A = P_{atm} + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2$. Après simplification il vient $v_B = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$.

Pour une hauteur h = 10 m alors $v_B = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 10} = 14\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

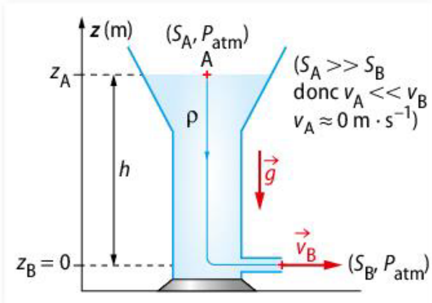



**FIG. 9** La vitesse $v_B$ de l'eau du robinet dépend de la hauteur d'eau $h$ dans le château.

**Remarque.** Si le fluide est au repos ($v = 0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), la relation devient : $P_A + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \rho \cdot g \cdot z_B$ que l'on écrit également $\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta z$. On retrouve la loi fondamentale de la statique des fluides.

## Effet Venturi

Dans le cas d'un conduit horizontal, $z_A = z_B$ et la relation de Bernoulli s'écrit :

$P + \frac{1}{2}\rho\, v^2 = \text{constante}$ soit $P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2$.

Il vient alors $(P_A - P_B) = \frac{1}{2}\rho \cdot (v_B^2 - v_A^2)$. Ainsi si $v_A < v_B$ alors $P_A > P_B$.

Pour un écoulement en régime permanent, **la pression $P$ d'un fluide diminue lorsque sa vitesse $v$ augmente** (et inversement) : il s'agit de l'**effet Venturi** (FIG. 10).

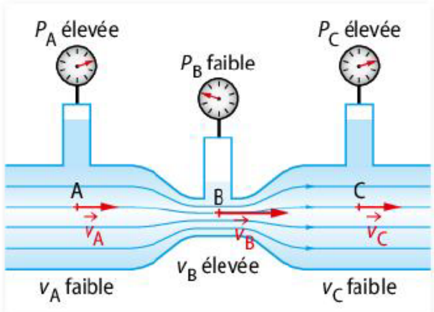
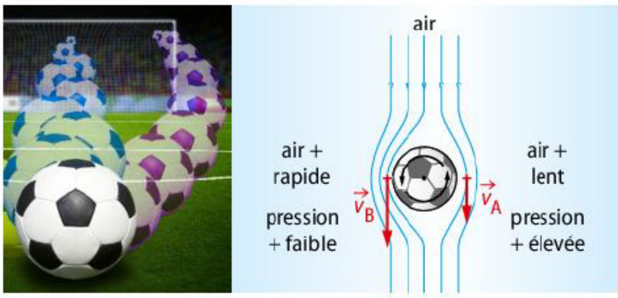



**FIG. 10** Effet Venturi : $v_B > v_A$ alors $P_B < P_A$.

**EXEMPLE**

Dans de nombreux sports, l'effet Magnus est à l'origine de trajectoires surpenantes. En imposant un mouvement de rotation (« un effet ») à une balle se déplaçant dans l'air, la vitesse de l'air va augmenter d'un côté de la balle et diminuer de l'autre. Il en résulte une différence de pression de l'air entre les deux côtés de la balle et une action mécanique de l'air sur la balle qui modifie son mouvement (FIG. 11).



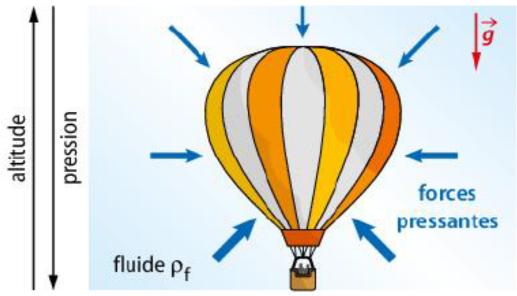

Effet Magnus. **FIG. 11** ► **Réalité** *Référentiel terrestre* **Modélisation** *Référentiel de la balle*

# FICHE MÉMO PRÉPA BAC

Le vocabulaire à retenir
Les relations à connaître

## 1 La poussée d'Archimède

**Origine** | **Modélisation** | **Expression**





**poussée d'Archimède** de valeur $\pi$ (**N**) → $\vec{\pi}$

$$\vec{\pi} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$$

- volume du fluide déplacé ($\mathbf{m^3}$) → $V$
- champ de pesanteur terrestre d'intensité $g$ ($\mathbf{N \cdot kg^{-1}}$ ou $\mathbf{m \cdot s^{-2}}$) → $\vec{g}$
- masse volumique du fluide ($\mathbf{kg \cdot m^{-3}}$) → $\rho_f$

## 2 Écoulement d'un fluide incompressible

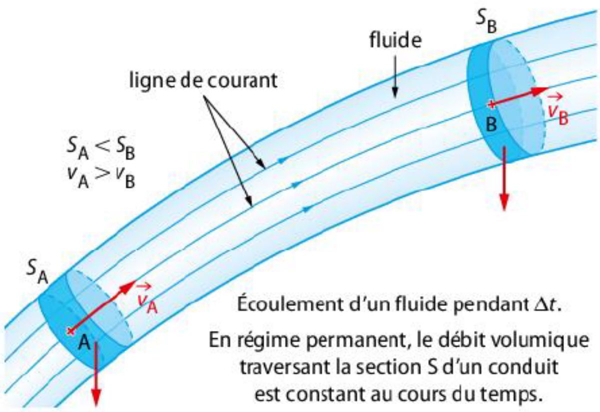
Le **débit volumique** d'un fluide dépend de la vitesse du fluide et de la section du conduit :

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = v \cdot S$$

- débit volumique ($\mathbf{m^3 \cdot s^{-1}}$) → $Q$
- volume de fluide écoulé ($\mathbf{m^3}$) → $V$
- durée de l'écoulement (**s**) → $\Delta t$
- vitesse du fluide ($\mathbf{m \cdot s^{-1}}$) → $v$
- aire de la section du conduit ($\mathbf{m^2}$) → $S$

**Conservation du débit volumique**

$Q_{(A)} = Q_{(B)}$ (en régime permanent, le long d'une ligne de courant)



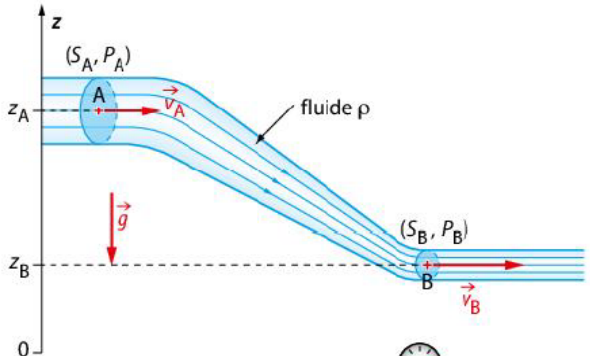

Écoulement d'un fluide pendant $\Delta t$.
En régime permanent, le débit volumique traversant la section S d'un conduit est constant au cours du temps.

## 3 Relation de Bernoulli et conséquences

Lors de l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent les évolutions de la pression, de la vitesse et de l'altitude le long d'une ligne de courant sont modélisées par la **relation de Bernoulli** :

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

- pression du fluide (**Pa**) → $P$
- masse volumique du fluide ($\mathbf{kg \cdot m^{-3}}$) → $\rho$
- vitesse du fluide ($\mathbf{m \cdot s^{-1}}$) → $v$
- intensité de pesanteur ($\mathbf{N \cdot kg^{-1}}$) → $g$
- altitude (**m**) → $z$




**Effet Venturi**

En régime permanent, la pression $P$ d'un fluide diminue lorsque sa vitesse $v$ augmente.