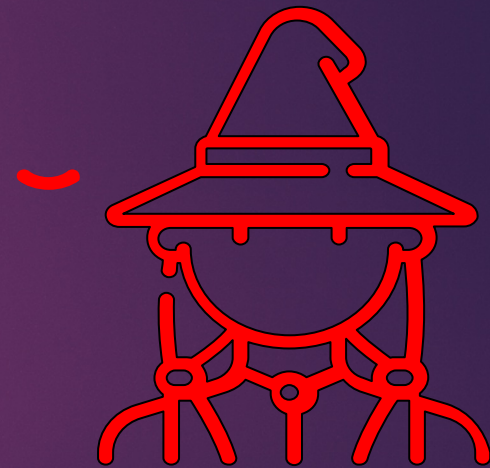


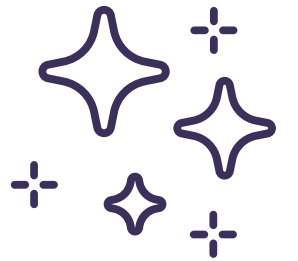
Biophysique de la circulation

PARTIE 1



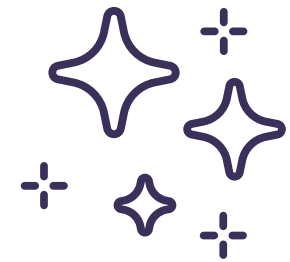
INTRODUCTION

- ▶ **Système cardiovasculaire** (= ensemble moteur de pompes): **Cœur** -> **Sang** -> **Vaisseaux**
- ▶ Echanges favorisés grâce à :
 - **une grande surface d'échange**
 - **une vitesse circulatoire lente**
- ▶ Evolution des pressions et des débits expliqué par :
 - **Règles physiques**
 - **Anatomie des vaisseaux**



Définitions

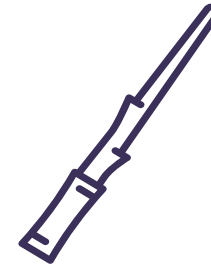
- ▶ **Fluide** : milieu matériel déformable sans forme propre et qui s'écoule
- ▶ **2 milieux** :
 - **Gazeux** : $E_{\text{cinétique}} \gg E_{\text{liaison}}$; distances variables des molécules ; compressible
 - **Liquide** : $E_c \approx E_l$; molécules liées, distance restreinte; supposé incompressible
- ▶ **2 catégories** :
 - **Parfait (=idéal)**: pas de frottements
 - **Réel** : phénomène de frottements = viscosité



Mécanique d'un fluide

► Statique d'un fluide :

- immobile
- caractérisée par une pression
- idéal ou réel = comportement identique



► Dynamique d'un fluide :

- en mouvement
- caractérisée par un débit
- idéal ou réel = comportement différent



Statique d'un fluide

► **Pression** = poids de la colonne de fluide qui s'applique sur la paroi

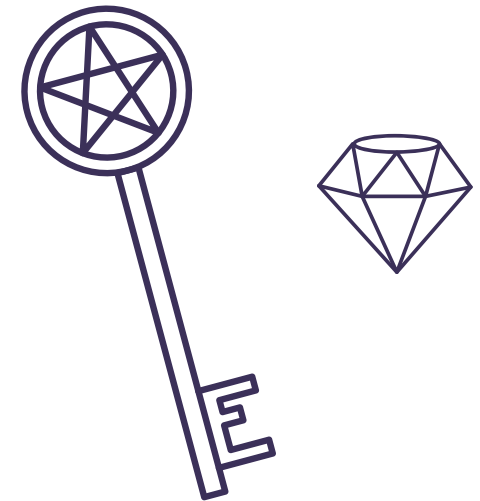
► **2 types de pressions :**

- **Relative** : effet de la colonne de liquide - > $\Delta P = \rho g h$
- **Absolue** : pression de l'ensemble des fluides ($P_{atm} + P_{rltv}$)

► **Unité Pression** → **PASCAL** : $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. => **UNITÉ SI**

P_{atm} : $1013 \text{ hPa} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Autres Unités : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$; mmHg ; cmH2O



Lois de Pascal

► Principe :

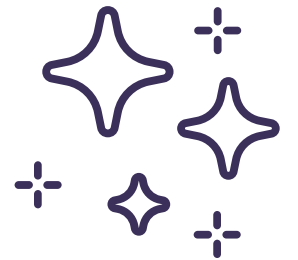
Dans un **liquide immobile incompressible**, une variation de pression se transmet **intégralement** et dans **toutes les directions**



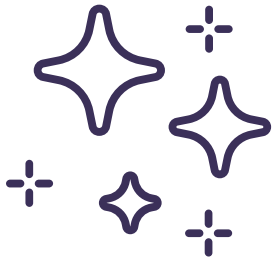
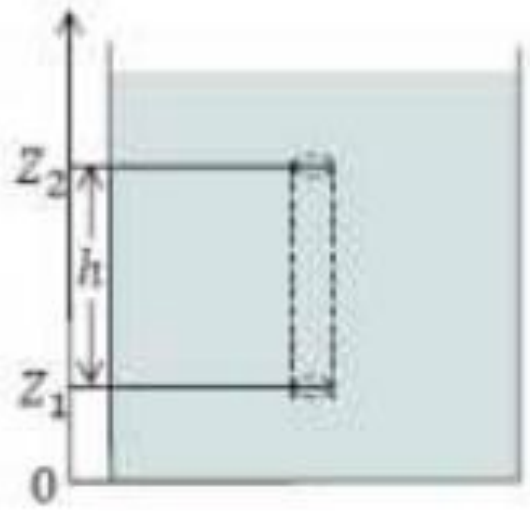
► Lois :

La pression est

1. La même dans toutes directions et indpt orientation capteur
2. La même en tous points de même profondeur
3. La différence de pression dP entre 2 points est proportionnelle à la diff de hauteur entre ces 2 points



$$\Delta P = P_{z1} - P_{z2} = \rho gh = -\rho g \Delta z$$



*Δz : différence de hauteur
entre les 2 points.*

Récap

STATIQUE DES FLUIDES => PARAMETRE ESSENTIELLE => ...

PRESSION liée ...

Récap

STATIQUE DES FLUIDES => PARAMETRE ESSENTIELLE => **PRESSION**

PRESSION est :

-
-

Récap

STATIQUE DES FLUIDES => PARAMETRE ESSENTIELLE => **PRESSION**

PRESSION est :

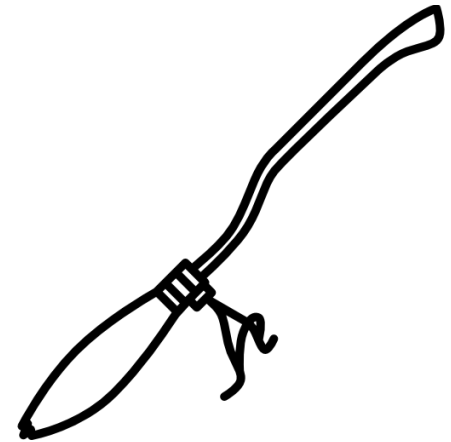
- **liée au poids de la colonne de fluide**
-

Récap

STATIQUE DES FLUIDES => PARAMETRE ESSENTIELLE => **PRESSION**

PRESSION est :

- **liée au poids de la colonne de fluide**
- **indépendante de l'orientation du capteur**



Dynamique d'un fluide idéal

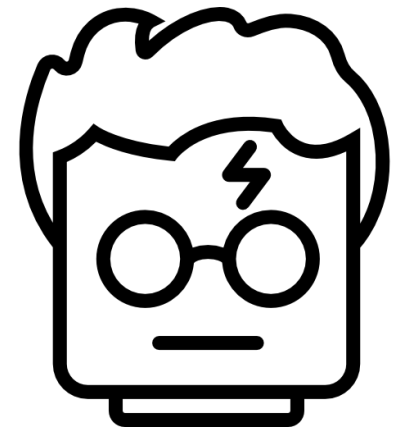
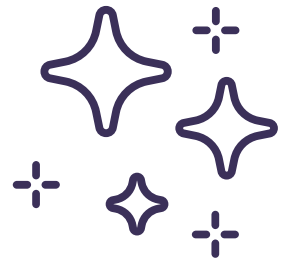
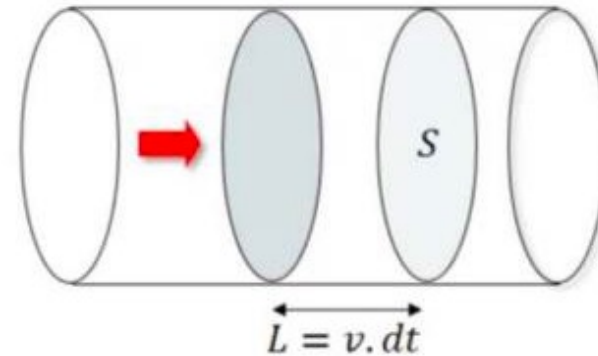
► Débit : **volume de fluide** qui traverse une **section S** par **unité de temps**

► $Q = V/dt$

► Relation *Débit – Vitesse d'écoulement* :

► On sait que $V = S.L$

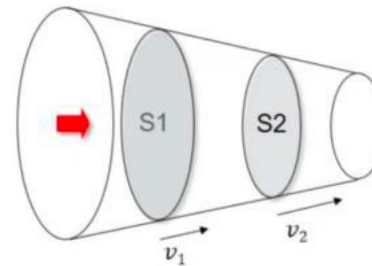
► D'où $Q = S.v$



! Hypothèses !

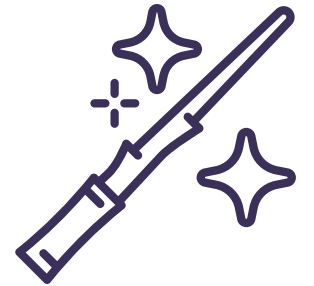
- ▶ Incompressibilité : $\rho = \text{cte}$
- ▶ Régime stationnaire : $v = \text{cte}$
- ▶ La section est variable

▶ $Q_1 = Q_2 = Q \Rightarrow S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{cste} = Q$



CONCLUSION

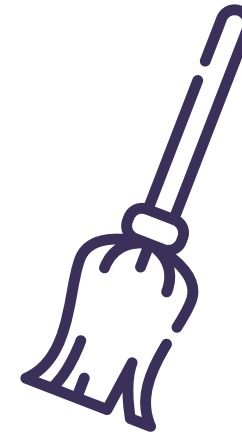
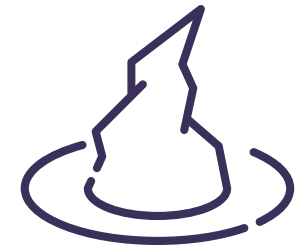
- ▶ Lorsqu'un fluide incompressible circule en **régime stationnaire** dans un conduit, le produit **Section x Vitesse** (=débit) **est le même tout au long du conduit**
- ▶ Plus la **section** est **faible**, plus la **vitesse** du fluide est **élevée**, et inversement afin de maintenir le débit constant
- ▶ $Q = S.v = \text{cte}$ donc si $S \searrow$ alors $v \nearrow$



Equation de Bernoulli

- ▶ Permet de modéliser l'écoulement d'un fluide idéal
- ▶ ⚠ Hypothèses ⚠ :
 - Incompressibilité $\Rightarrow \rho = \text{cte}$
 - Fluide parfait (=idéal) \Rightarrow pas de frottement, viscosité η nulle
- ▶ 3 énergies :
 - E1 de pesanteur
 - E2 cinétique
 - E3 de pression statique

} Et : énergie totale



Equation de Bernoulli

$$Et = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2} mv^2 + PV = cte$$


$$Et = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2} mv^2 + PV = cte$$


$$Et = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2} mv^2 + PV = cte$$

$$P = \frac{E}{V}$$


$$Et = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV = cte$$

$$P = \frac{E}{V}$$

$$\Rightarrow Pt = \frac{Et}{V} = \frac{mgh}{V} + \frac{\frac{1}{2}mv^2}{V} + P = cte$$


$$Et = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV = cte$$

$$P = \frac{E}{V}$$

$$\Rightarrow Pt = \frac{Et}{V} = \frac{mgh}{V} + \frac{\frac{1}{2}mv^2}{V} + P = cte$$

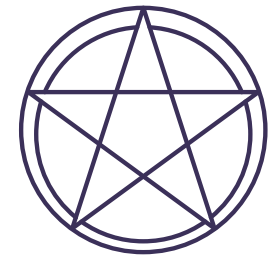
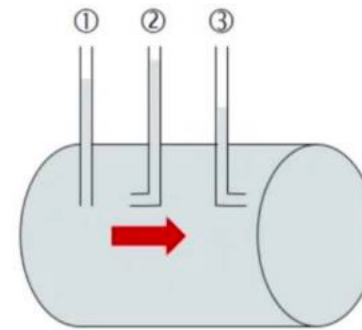
$$\Rightarrow Pt = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = cte$$

Tube de Pitot

- ▶ \neq des fluides statiques \rightarrow valeurs mesurées dépend orientation capteur

- ▶ 3 types de mesures :

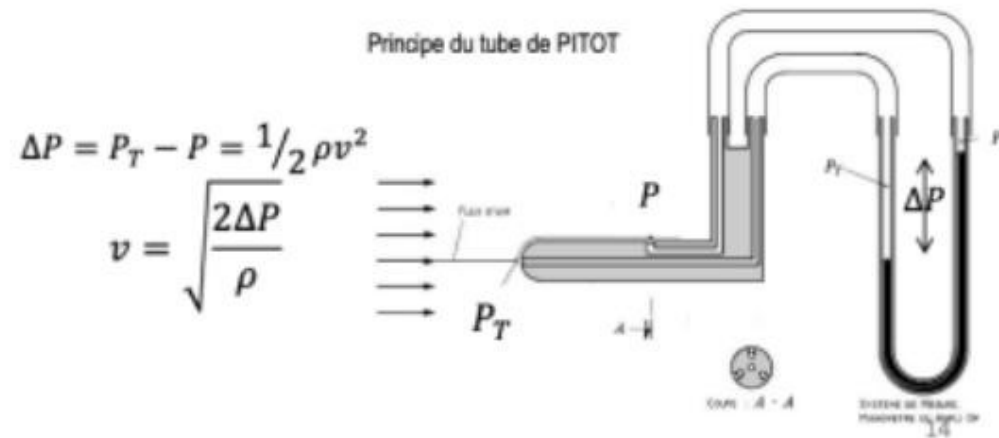
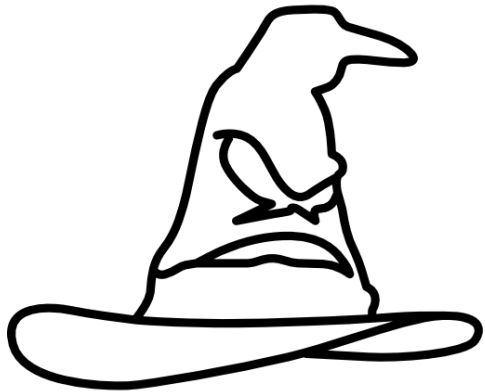
- Capteur parallèle au courant \rightarrow P **lateral** (=statique) : P
- Capteur face au courant \rightarrow P **terminal** : $P_T = P + \frac{1}{2} \rho v^2$
- Capteur dos au courant \rightarrow P **d'aval** : $P_A = P - \frac{1}{2} \rho v^2$



- ▶ En fonction de la **position du capteur**, on mesure des valeurs de **pression différentes**



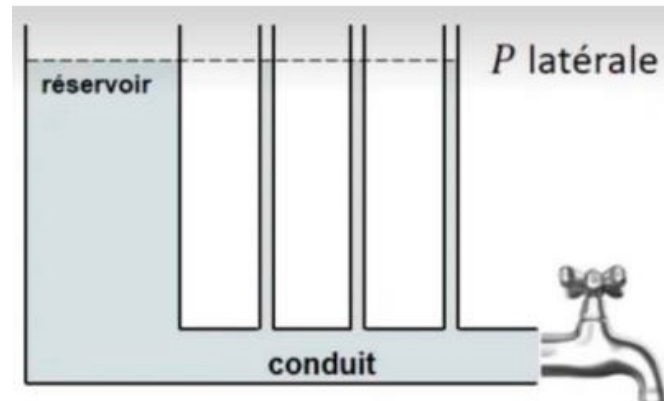
Tube de Pitot



Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.

Écoulement horizontal (condition statique)

- ▶ Liquide s'écoule pas \Rightarrow lois Pascal \Rightarrow P la même en tout point de même profondeur
- ▶ Permet d'obtenir P latérale = à celle dans le réservoir

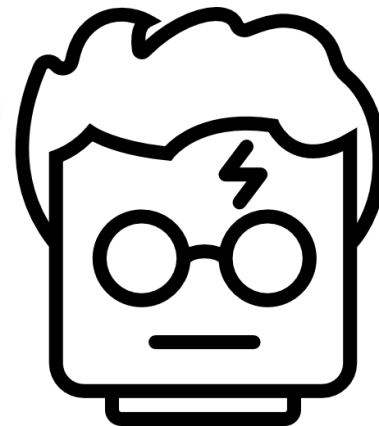
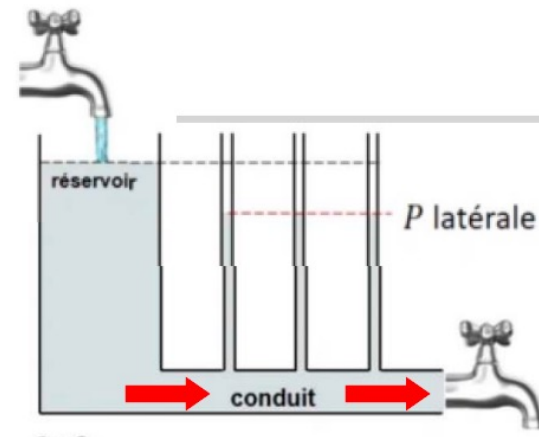


Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.

Écoulement horizontal (en écoulement)

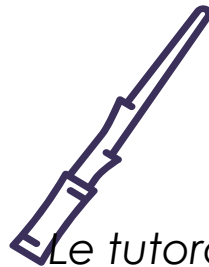
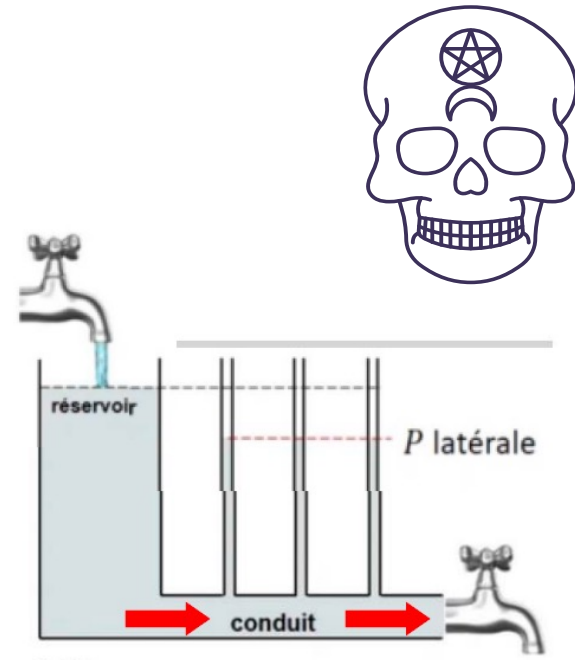


- ▶ Réservoir alimenté pour maintenir même pression
- ▶ P de pesanteur change pas $\rightarrow \rho gh = \text{cte}$
- ▶ Equation Bernoulli $\Rightarrow P_t = \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P = \text{cte}$



Écoulement horizontal (en écoulement)

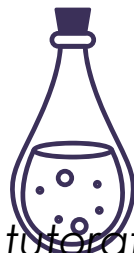
- ▶ Réservoir alimenté pour maintenir même pression
- ▶ P de pesanteur change pas $\rightarrow \rho gh = \text{cte}$
- ▶ Equation Bernoulli $\Rightarrow P_t = \cancel{\rho gh} + \frac{1}{2} \rho v^2 + P = \text{cte}$



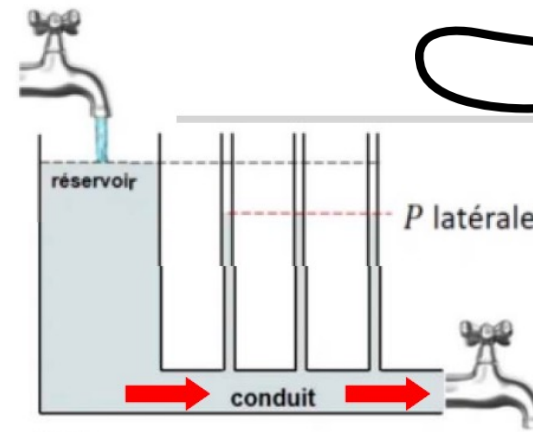
Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.

Écoulement horizontal (en écoulement)

- ▶ Réservoir alimenté pour maintenir même pression
- ▶ P de pesanteur change pas $\rightarrow \rho gh = \text{cte}$
- ▶ Equation Bernoulli $\Rightarrow P_t = \frac{1}{2} \rho v^2 + P = \text{cte}$



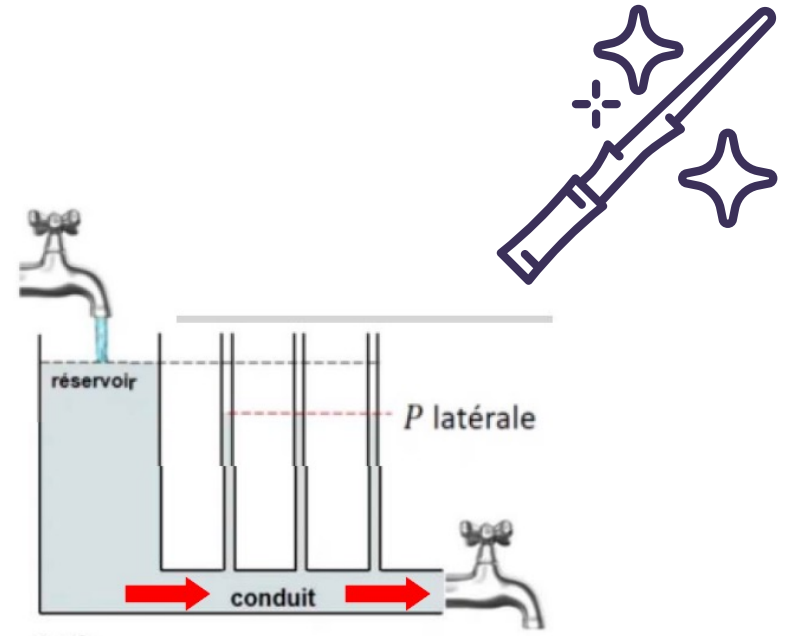
Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.



Écoulement horizontal (en écoulement)

- ▶ Réservoir alimenté pour maintenir même pression
- ▶ P de pesanteur change pas $\rightarrow \rho gh = \text{cte}$
- ▶ Equation Bernoulli $\Rightarrow P_t = \frac{1}{2} \rho v^2 + P = \text{cte}$
 $\Rightarrow P = \text{cte} - \frac{1}{2} \rho v^2$

Donc P latérale \searrow car perte cinétique



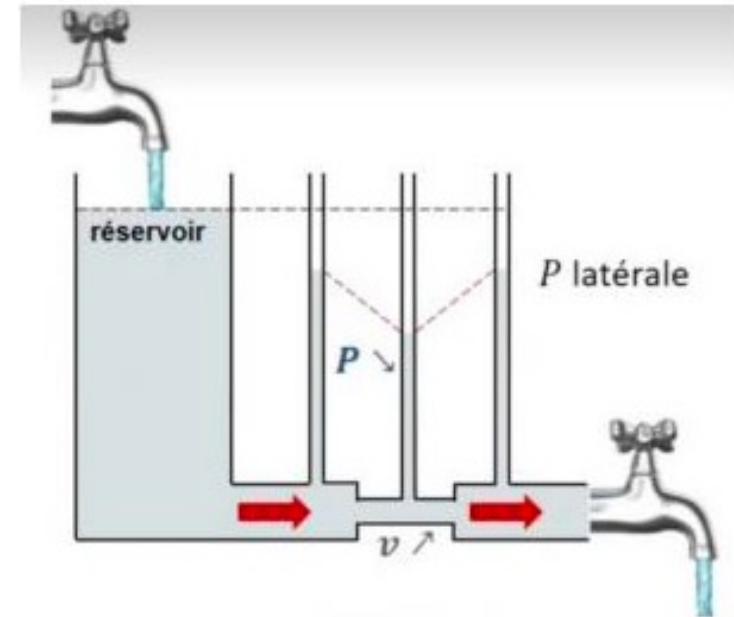
Écoulement horizontal (variation de section)

► Si $S \searrow$ alors $v \nearrow$ ($Q = Sv$) or $P = \text{cte} - \frac{1}{2} \rho v^2$

⇒ $\frac{1}{2} \rho v^2 \nearrow$ ($P_c \nearrow$)

⇒ $P \searrow$

► C'est l'effet Venturi

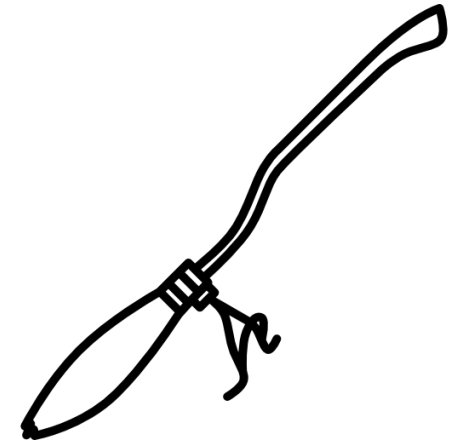


On retient !



► Fluide idéal → 2 règles :

- Constance du débit ($Q = S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{cte}$)
- Constance de la charge (équation Bernoulli)



Dynamique d'un fluide réel

- Perte de charge → Viscosité = frottements des molécules entre elles

Dynamique d'un fluide réel

- ▶ Perte de charge → Viscosité = frottements des molécules entre elles
- ⇒ Consommation d'énergie dissipée en chaleur

Dynamique d'un fluide réel

- ▶ Perte de charge → Viscosité = frottements des molécules entre elles
- ⇒ Consommation d'énergie dissipée en chaleur
- ⇒ Équation Bernoulli n'est plus vérifiée

Dynamique d'un fluide réel

- ▶ Perte de charge → Viscosité = frottements des molécules entre elles
- ⇒ Consommation d'énergie dissipée en chaleur
- ⇒ Équation Bernoulli n'est plus vérifiée
- ⇒ $E_t = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV \neq cte$

Dynamique d'un fluide réel

- ▶ Perte de charge → Viscosité = frottements des molécules entre elles
- ⇒ Consommation d'énergie dissipé en chaleur
- ⇒ Équation Bernoulli n'est plus vérifiée

- ⇒ $E_t = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV \neq cte$
- ⇒ $P_t = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P \neq cte$

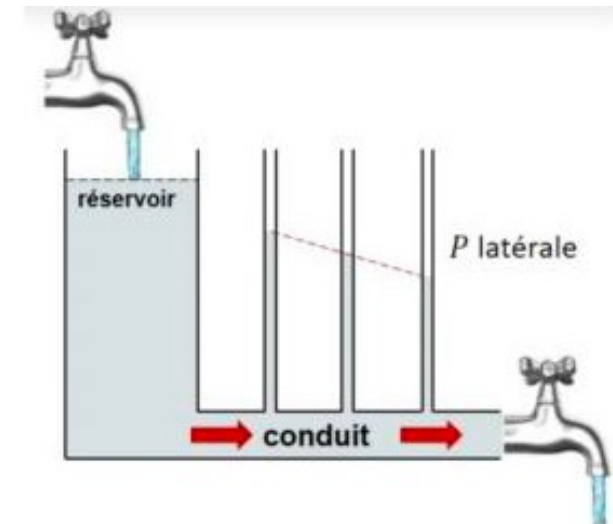
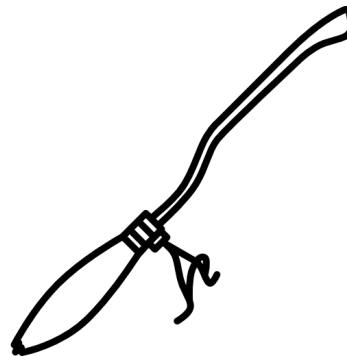
Dynamique d'un fluide réel

- Perte de charge → Viscosité = frottements des molécules entre elles
- ⇒ Consommation d'énergie dissipée en chaleur
- ⇒ Équation de Bernoulli n'est plus vérifiée

- ⇒ $E_t = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV \neq cte$

- ⇒ $P_t = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P \neq cte$

- ⇒ **P latérale n'est plus constante** (↳ dû à la perte d'E)



Viscosité (η)

► $\eta \Rightarrow$ Perte de charge (comportement particulier fluide réel)

► Force de frottement F : $F = \eta S \frac{dv}{dx}$ (merci Newton)

► 2 catégories de fluides :

- Newtoniens $\Rightarrow \eta$ varie avec T ($T \nearrow \Rightarrow \eta \searrow$)

- Non Newtoniens $\Rightarrow \eta$ varie avec T et $\frac{dv}{dx}$ ($\frac{dv}{dx} \searrow \Rightarrow \eta \nearrow$)

2 régimes d'écoulement fluide réel

**Écoulement
laminaire**

**Écoulement
turbulent**

2 régimes d'écoulement fluide réel

Écoulement laminaire

- **v faible**
- $\eta \rightarrow$ facteur cohérence
- Ligne parallèle
- v max au centre
- Fine couche immobile
- **Profil parabolique des vitesses**

Écoulement turbulent

2 régimes d'écoulement fluide réel

Écoulement laminaire

- **v faible**
- $\eta \rightarrow$ facteur cohérence
- Ligne parallèle
- v max au centre
- Fine couche immobile
- **Profil parabolique des vitesses**

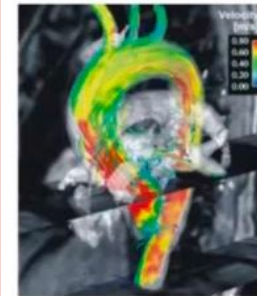
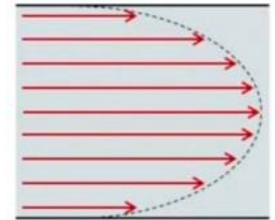


Image IRM des vitesses de la crosse aortique en couleur



Répartition parabolique des vitesses

Écoulement turbulent

2 régimes d'écoulement fluide réel

Écoulement laminaire

- **v faible**
- $\eta \rightarrow$ facteur cohérence
- Ligne parallèle
- v max au centre
- Fine couche immobile
- **Profil parabolique des vitesses**

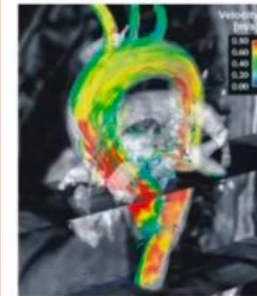
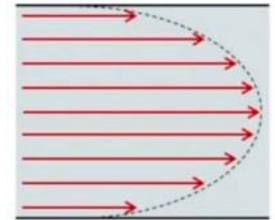


Image IRM des vitesses de la crosse aortique en couleur



Répartition parabolique des vitesses

Écoulement turbulent

- **v moyenne ou élevée**
- $\eta \rightarrow$ facteur cohérence
- désordonnée
- Trajectoire tourbillonnante
- **Pas de distribution systématisée des vitesses**

2 régimes d'écoulement fluide réel

Écoulement laminaire

- **v faible**
- $\eta \rightarrow$ facteur cohérence
- Ligne parallèle
- v max au centre
- Fine couche immobile
- **Profil parabolique des vitesses**

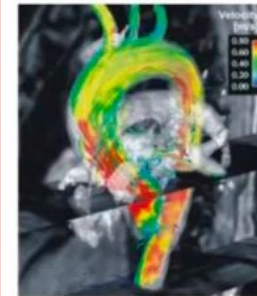
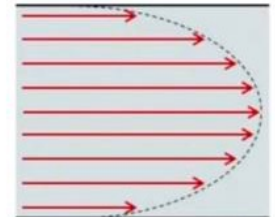


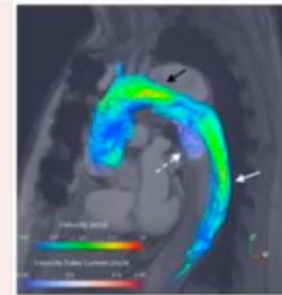
Image IRM des vitesses de la crosse aortique en couleur



Répartition parabolique des vitesses

Écoulement turbulent

- **v moyenne ou élevée**
- $\eta \rightarrow$ facteur cohérence
- désordonnée
- Trajectoire tourbillonnante
- **Pas de distribution systématisée des vitesses**



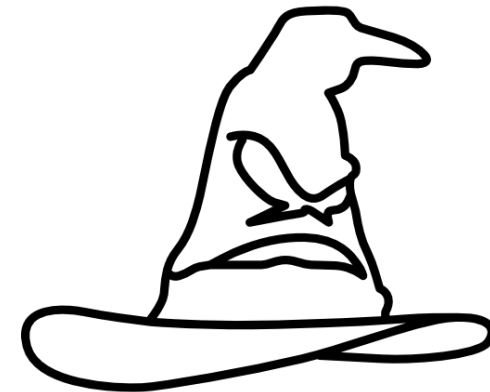
Plus de répartition parabolique des vitesses \rightarrow témoigne d'un flux turbulent dans cette aorte

Frontières entre les 2 régimes

4 paramètres :

1. Vitesse moy. écoulement v
 2. Diamètre du conduit d
 3. Masse volumique ρ
 4. Viscosité η
- si v, d ou $\rho \nearrow$ alors $Re \nearrow$*
- si $\eta \nearrow$ alors $Re \searrow$*

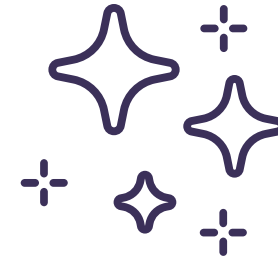
$$Re = \frac{\rho dv}{\eta}$$



Nombre de Reynolds

► Nombre empirique **sans unité** → seuil entre régime laminaire et turbulent :

- ❑ $Re \leq 2000 \Rightarrow$ **Laminaire**
- ❑ $Re > 10\,000 \Rightarrow$ **Turbulent**
- ❑ $2000 < Re \leq 1000 \Rightarrow$ **Instable** (*aucune conclusion*)



Loi de Poiseuille

- Concerne fluides **réels** en écoulement **laminaire** seulement

$$\blacktriangleright P_t = \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P = cte$$

Loi de Poiseuille

- Concerne fluides **réels** en écoulement **laminaire** seulement

$$\text{► } Pt = \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P + \textit{chaleur} = cte$$

Loi de Poiseuille

- Concerne fluides **réels** en écoulement **laminaire** seulement

$$\text{► } Pt = \cancel{\rho gh} + \frac{1}{2} \rho v^2 + P + \textit{chaleur} = cte$$

Loi de Poiseuille

- Concerne fluides **réels** en écoulement **laminaire** seulement

$$\text{► } Pt = \cancel{\rho gh} + \frac{1}{2} \cancel{\rho v^2} + P + \textit{chaleur} = cte$$

Loi de Poiseuille

- ▶ Concerne fluides **réels** en écoulement **laminaire** seulement

▶ $Pt = P + \textit{chaleur} = cte$

Loi de Poiseuille

- ▶ Concerne fluides **réels** en écoulement **laminaire** seulement

- ▶ $P_t = P + \textit{chaleur} = cte$

- ▶ $\Rightarrow P = cte - \textit{chaleur}$

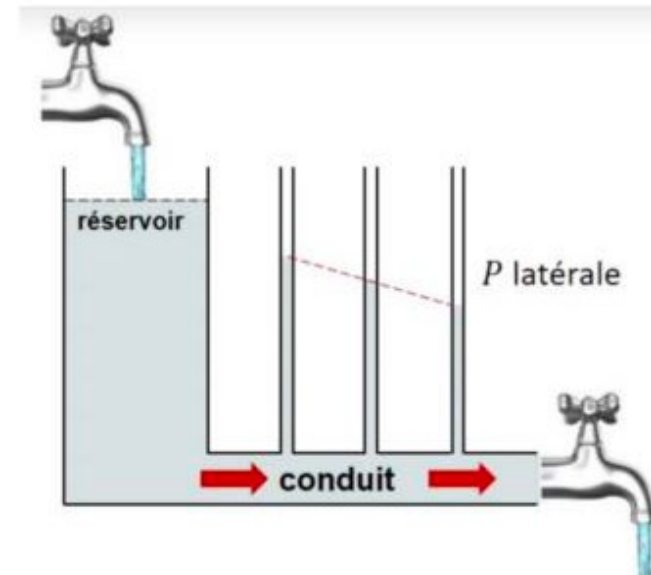
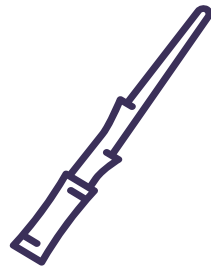
Loi de Poiseuille

► Concerne fluides **réels** en écoulement **laminaire** seulement

► $P_t = P + \textit{chaleur} = cte$

► $\Rightarrow P = cte - \textit{chaleur}$

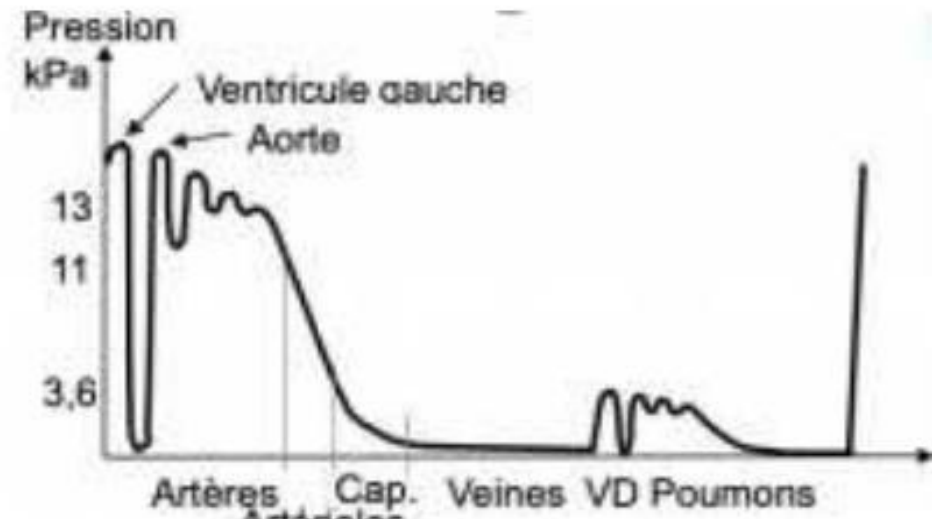
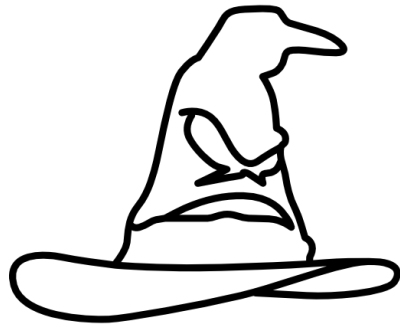
► Seul P varie



Loi de Poiseuille

$$\blacktriangleright \Delta P = \frac{8\eta L Q}{\pi r^4}$$

- ▶ Important en physiologie pour comprendre l'évolution des pressions

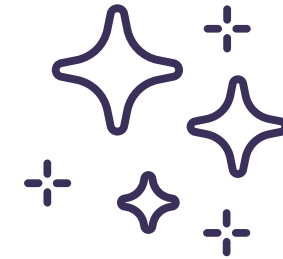


Récap / Conclusion

► Dynamique d'un fluide réel :

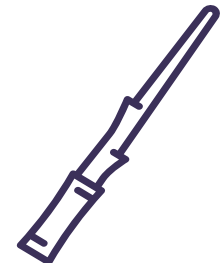
❖ Écoulement laminaire :

- Tout E utilisé pour vaincre η
- Relation linéaire entre différence de pression et débit



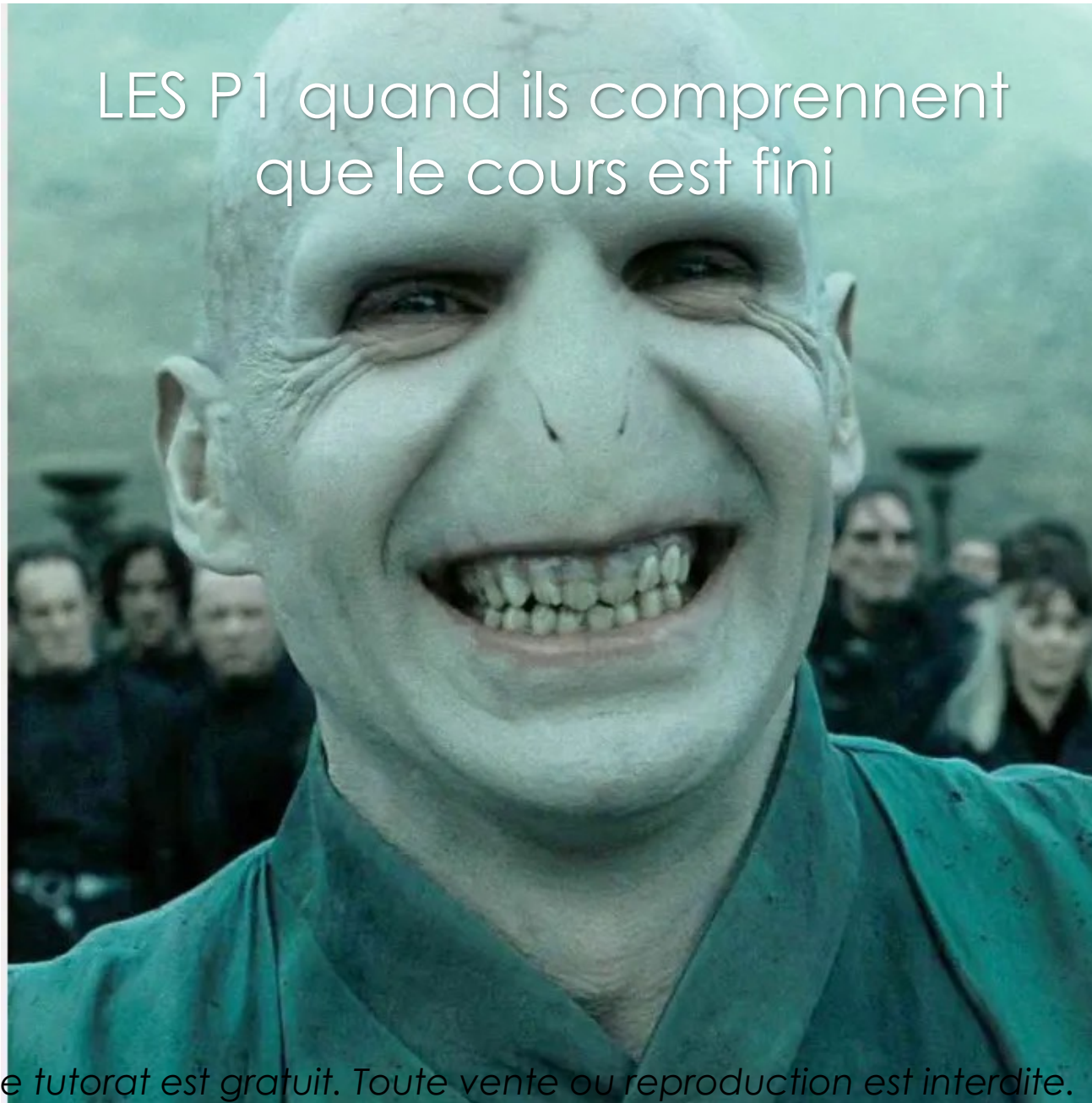
❖ Écoulement turbulent :

- Plus de proportionnalité entre pression/débit => **Poiseuille inutilisable**
- Régime peu efficace
- Consomme bcp d'E : chaleur + vibration => **bruits ou souffles**



Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.

LES P1 quand ils comprennent
que le cours est fini



Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.

QCM TIME

QCM 1 : Quel(s) est (sont) le (les) facteur(s) qui influence(nt) la mesure de la pression dans un liquide immobile incompressible ?

- A) La pression atmosphérique
- B) L'orientation du capteur
- C) La hauteur de liquide au-dessus du point de mesure
- D) La masse volumique du liquide
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

QCM TIME

QCM 1 : Quel(s) est (sont) le (les) facteur(s) qui influence(nt) la mesure de la pression dans un liquide immobile incompressible ?

- A) La pression atmosphérique
- B) L'orientation du capteur
- C) La hauteur de liquide au-dessus du point de mesure
- D) La masse volumique du liquide
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

Statique d'un fluide

► **Pression** = poids de la colonne de fluide qui s'applique sur la paroi

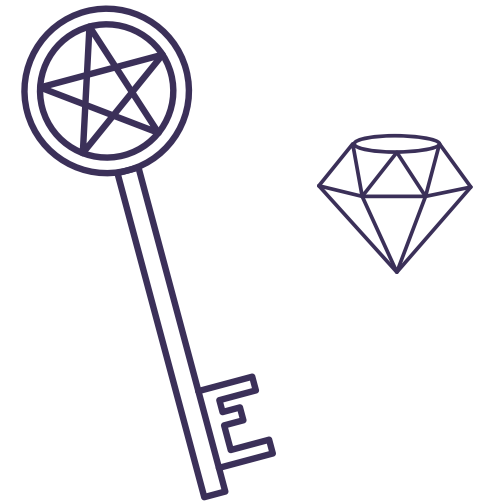
► **2 types de pressions :**

- **Relative** : effet de la colonne de liquide - > $\Delta P = \rho gh$
- **Absolue** : pression de l'ensemble des fluides ($P_{atm} + P_{rltv}$)

► **Unité Pression** → **PASCAL** : $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. => **UNITÉ SI**

P_{atm} : $1013 \text{ hPa} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Autres Unités : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$; mmHg ; cmH2O



QCM TIME

QCM 2: On considère une sténose localisée au niveau d'une artère. La vitesse du sang avant la sténose est $v_1 = 1 \text{ m.s}^{-1}$. Après la sténose, on a un diamètre $d_2 = 4 \text{ mm}$ et une vitesse $v_2 = 4 \text{ m.s}^{-1}$. Quel est le diamètre avant la sténose :

- A) 4 mm
- B) 8 mm
- C) 0,8 cm
- D) 16 mm
- E) 1,6 cm

Info bonus: $S = \pi r^2$

QCM TIME

QCM 2: On considère une sténose localisée au niveau d'une artère. La vitesse du sang avant la sténose est $v_1 = 1 \text{ m.s}^{-1}$. Après la sténose, on a un diamètre $d_2 = 4 \text{ mm}$ et une vitesse $v_2 = 4 \text{ m.s}^{-1}$. Quel est le diamètre avant la sténose :

A) 4 mm

B) 8 mm

C) 0,8 cm

D) 16 mm

E) 1,6 cm

- **Principe de continuité du débit :** $S_1 v_1 = S_2 v_2 \Rightarrow \pi r_1^2 v_1 = \pi r_2^2 v_2$

- **Simplification :** $d_1^2 v_1 = d_2^2 v_2$

$$\Rightarrow d_1^2 = \frac{d_2^2 v_2}{v_1}$$

$$\Rightarrow d_1 = d_2 \sqrt{\frac{v_2}{v_1}}$$

- **Application numérique :**

$$d_1 = 4 \times \sqrt{\frac{4}{1}} = 4 \times 2 = 8 \text{ mm}$$

! Hypothèses !

► Incompressibilité : $\rho = \text{cte}$

► Régime stationnaire : $v = \text{cte}$

► La section est variable

► $Q_1 = Q_2 = Q \Rightarrow S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{cte} = Q$

► Incompressibilité : $\rho = \text{cte}$

► Régime stationnaire : $v = \text{cte}$

► La section est variable

► $Q_1 = Q_2 = Q \Rightarrow S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{cte} = Q$



QCM TIME

QCM 3 : Quelle(s) est (sont la (les) proposition(s) vraie(s) concernant les règles de circulation des différents types de fluide ?

- A) L'équation de Bernoulli s'applique à un fluide idéal
- B) La loi de Poiseuille s'applique à un fluide réel newtonien à condition que l'écoulement soit laminaire
- C) Un écoulement non-newtonien s'écoule toujours selon un régime d'écoulement turbulent
- D) La loi de Poiseuille s'applique à un fluide réel non-newtonien en régime d'écoulement turbulent si on considère sa viscosité apparente
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

QCM TIME

QCM 3 : Quelle(s) est (sont la (les) proposition(s) vraie(s) concernant les règles de circulation des différents types de fluide ?

- A) L'équation de Bernoulli s'applique à un fluide idéal
- B) La loi de Poiseuille s'applique à un fluide réel newtonien à condition que l'écoulement soit laminaire
- C) Un écoulement non-newtonien s'écoule toujours selon un régime d'écoulement turbulent
- D) La loi de Poiseuille s'applique à un fluide réel non-newtonien en régime d'écoulement turbulent si on considère sa viscosité apparente
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

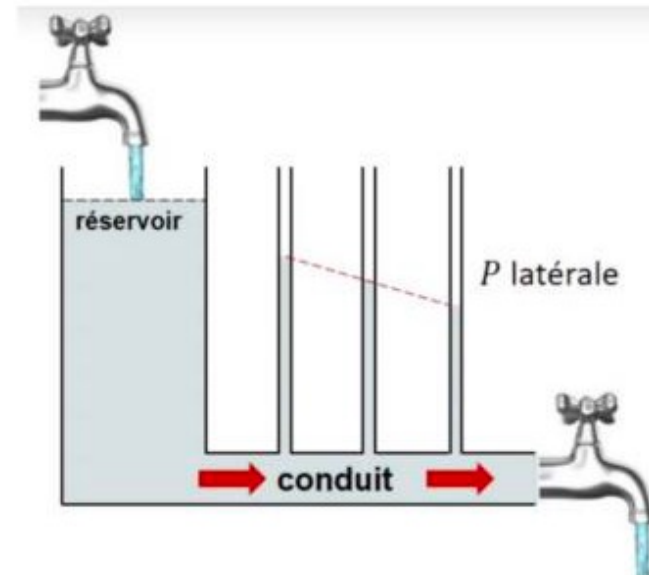
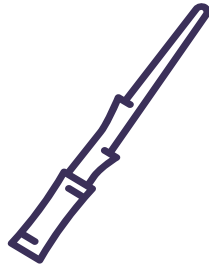
Loi de Poiseuille

► Concerne fluides **réels** en écoulement **laminaire** seulement

► $P_t = P + \textit{chaleur} = cte$

► $\Rightarrow P = cte - \textit{chaleur}$

► Seul P varie





J'ai une armée



Nous avons un nez