

Biophysique de la circulation

TTR

Sommaire

Définitions

1) Statique d'un fluide

2) Dynamique d'un fluide idéal

3) Dynamique d'un fluide réel

4) Particularités liées au sang

5) Particularités liées à l'anatomie

6) Constitution des parois des vaisseaux et comportement des vaisseaux élastiques

7) Mesure des pressions

8) Applications en santé

9) Applications à imagerie médicale

QCMs

Définitions



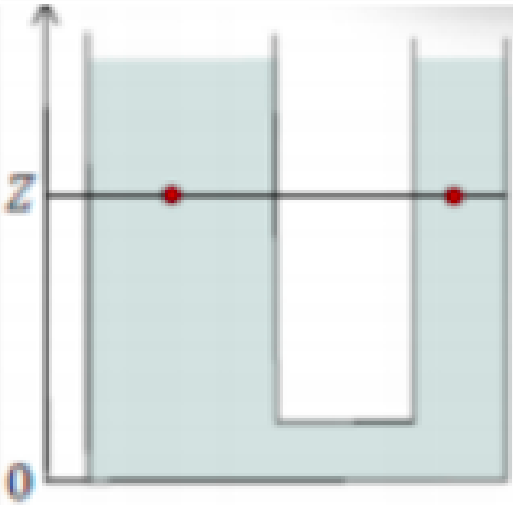
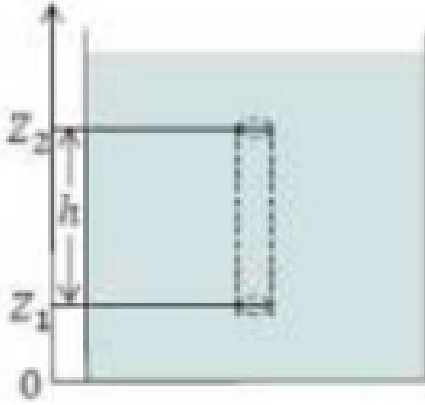
- **Fluide** : milieu matériel déformable sans forme propre et qui s'écoule.
- Milieu gazeux
- Milieu liquide
- Fluide réel
- Fluide parfait/idéal
- Statique des fluides
- Dynamique des fluides

Aux Jeux Olympiques, les épreuves de natation se déroulent dans un bassin constitué d'un fluide, l'eau, de 50m de long. Il existe quatre types de nage en natation, qui sont courues soit en épreuves individuelles, soit en relais : la brasse, le papillon, le dos et la nage libre, toujours exécutée avec la technique du crawl. Un cinquième type de course, la course de quatre nages, regroupe les quatre précédentes et voit les nageurs enchaîner les quatre types de nages. Les distances varient également, et ne demandent pas les mêmes qualités pour une course de 50m que pour un 1500m. L'explosivité tout comme l'endurance, la puissance et la technique sont des qualités indispensables pour les nageurs, via <https://www.paris2024.org/fr/sport/natation/>

1) Statique d'un fluide

- La pression est le poids de la colonne de fluide qui s'applique contre cette paroi.
- Donc on a $[P] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{[E]}{[V]}$
- Unité SI : Pascal
- **PRESSION ATMOSPHERIQUE** = poids de la colonne d'air atmosphérique, l'air étant un fluide, de 1013 hPa. Diminution avec l'altitude (/2 à 5000m)
- Principe et lois de Pascal

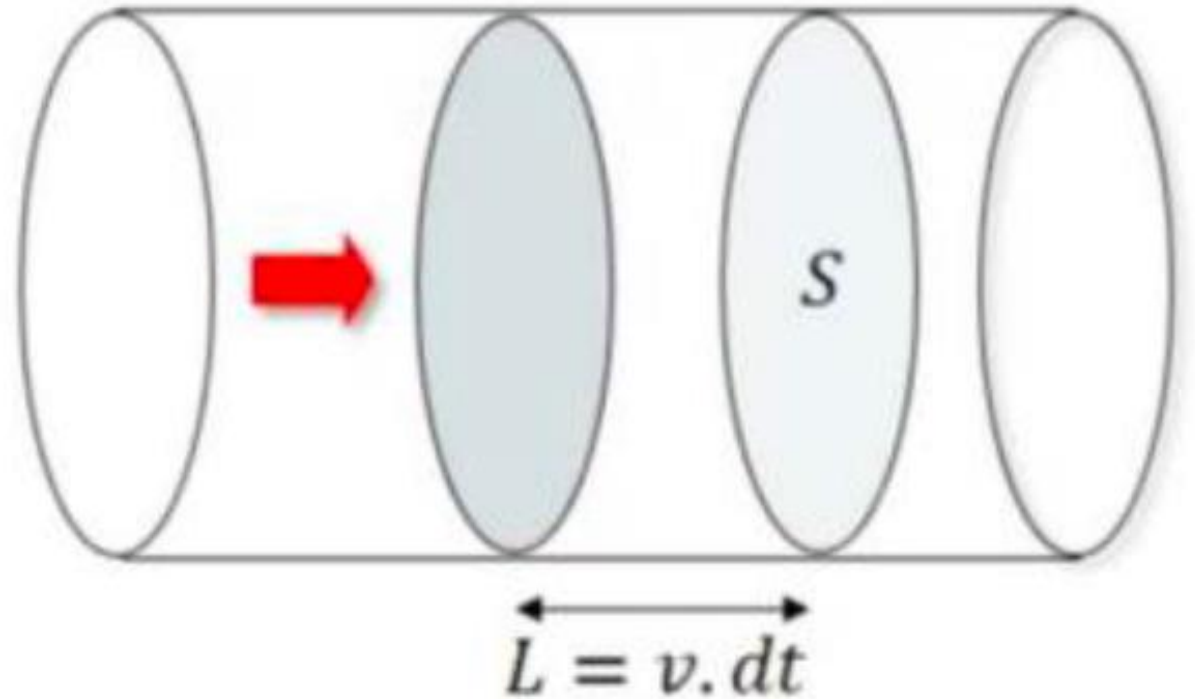


1^{ère} Loi de Pascal	La pression est la même dans toutes les directions → indépendante de l'orientation du capteur	
2^{ème} Loi de Pascal	La pression est la même en tout point de même profondeur (ou altitude).	
3^{ème} Loi de Pascal	<p>La différence de pression dP entre 2 points est proportionnelle à la différence de hauteur entre ces 2 points.</p> <p>$\Delta P = P_{z1} - P_{z2} = \rho g h = -\rho g \Delta z$</p> <p>Si on l'exprime en fonction de la position z, on met un signe négatif pour exprimer que $+z$ diminue, $+P$ augmente.</p>	 <p>Δz : différence de hauteur entre les 2 points.</p>

2) Dynamique d'un fluide idéal

- débit $Q = \frac{V}{dt}$
- En tout point d'une canalisation le débit sera égal à :

$$Q = S.v = \text{Section} * \text{vitesse}$$



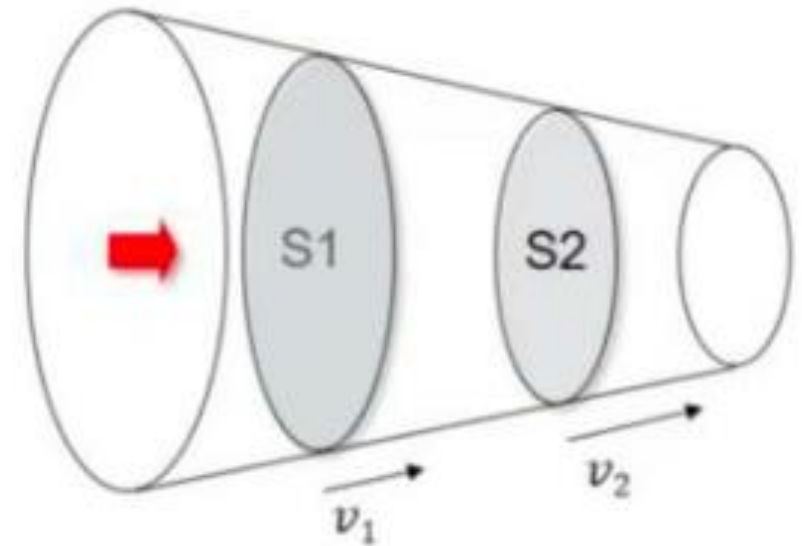
L'aviron consiste en une embarcation propulsée à la force de rames fixées au bateau. Ce sport a la particularité de voir les athlètes se positionner dos à la direction dans laquelle ils se déplacent, et donc de passer la ligne d'arrivée de dos. Via

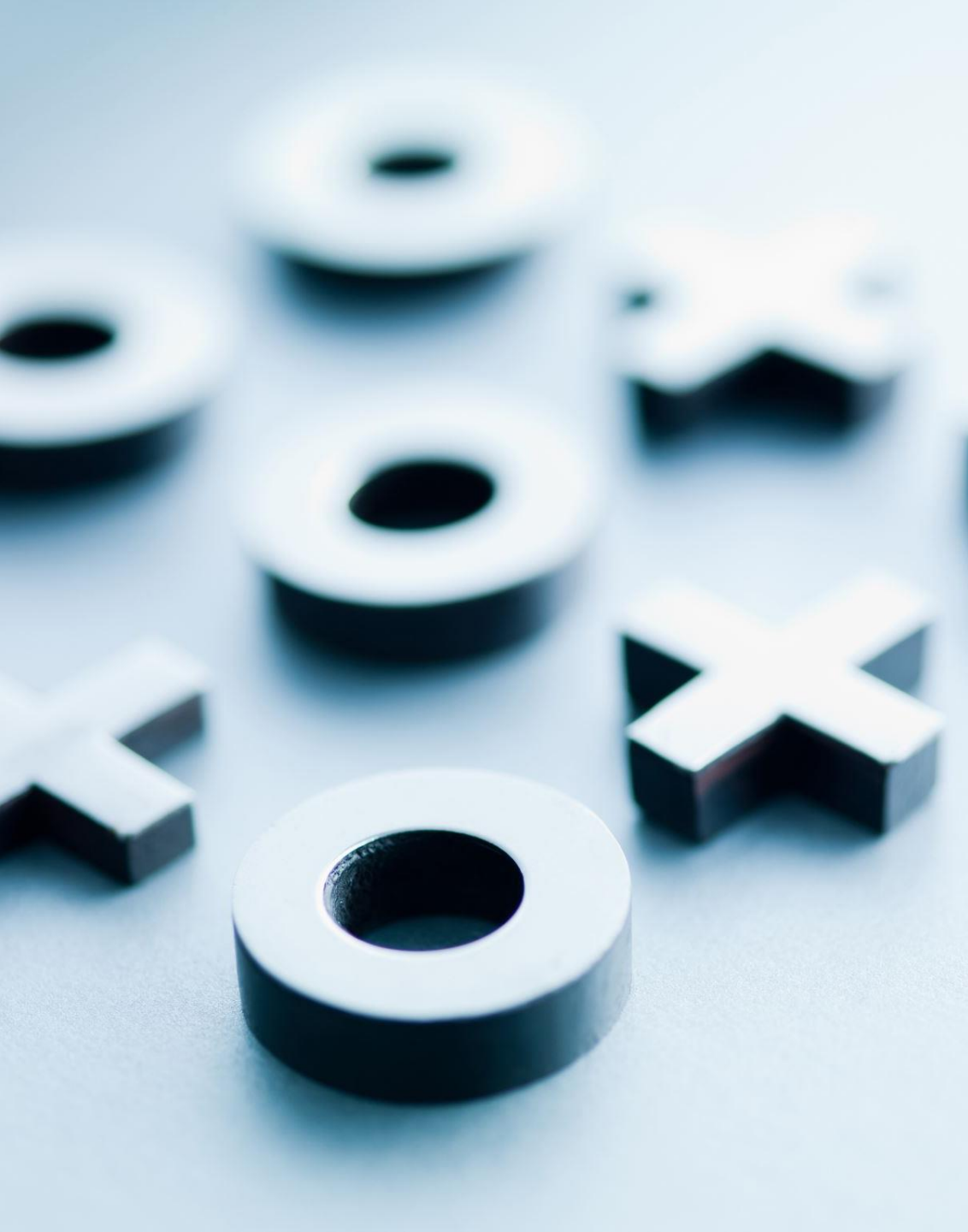
<https://www.paris2024.org/fr/sport/aviron/>

Ainsi, le fluide est réel et non idéal ici, et pourrait être considéré comme statique (vraiment aucun rapport avec la dynamique d'un fluide idéal, mais allez chercher une épreuve des JO avec un fluide idéal mdrrrr)

Principe de continuité du débit

- $Q_1 = Q_2 = Q$
- $S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{Cste} = Q$
- (Le fluide est supposé incompressible donc $\rho = \text{cste}$)





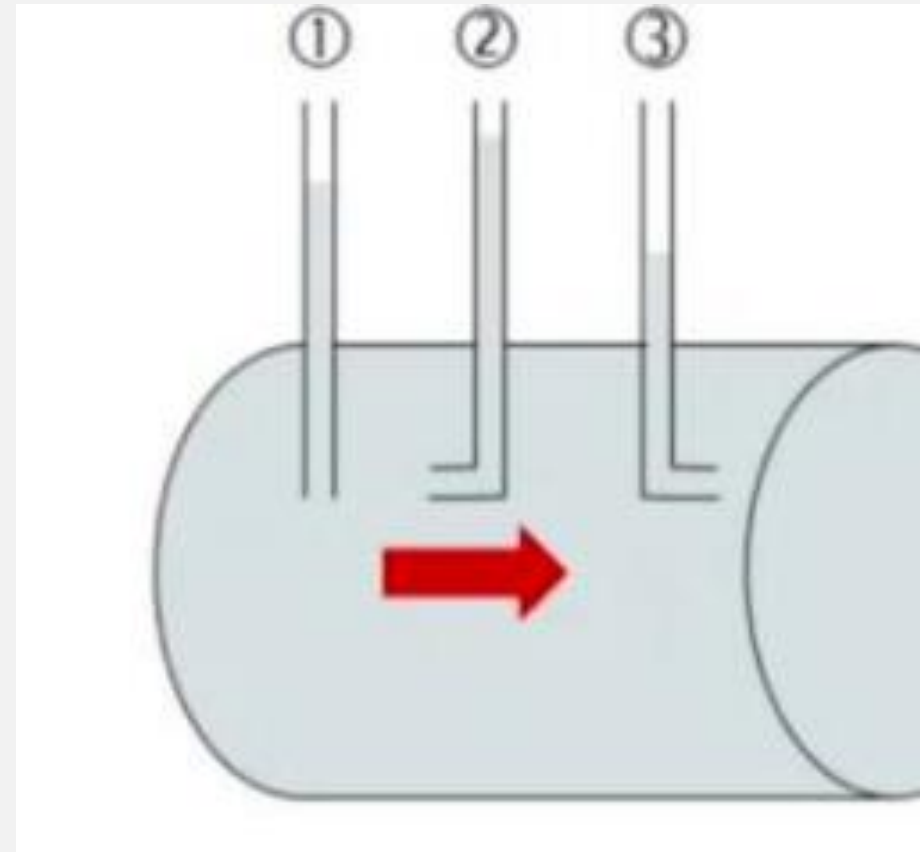
Equation de Bernoulli

- L'équation de Bernoulli permet de modéliser l'écoulement d'un **fluide idéal** incompressible.
- 3 énergies : pesanteur, cinétique, pression statique

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2} mv^2 + P.V = \text{cste}$$

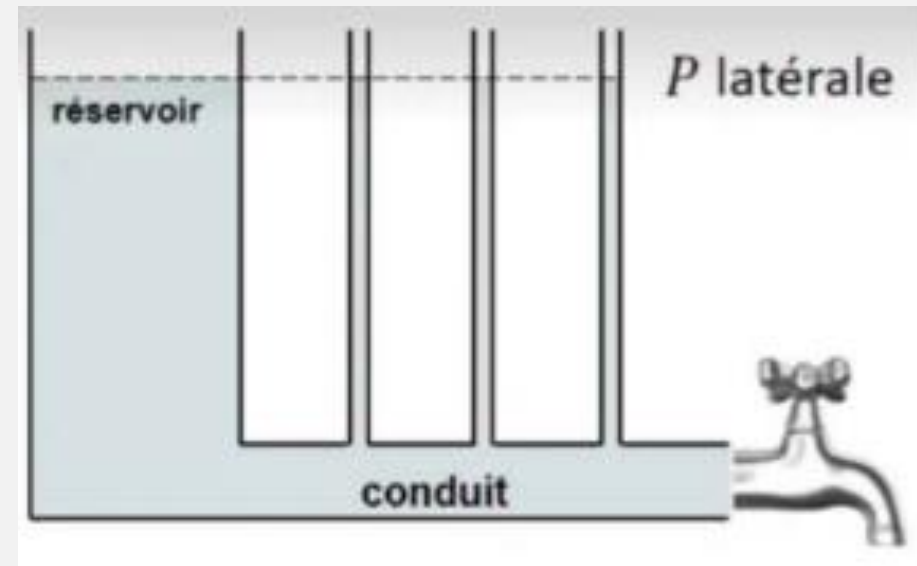
Mesure de pression dans un conduit

-
- 1. Capteur parallèle au courant →
Pression latérale ou statique : P
 - 2. Capteur face au courant →
Pression « terminale » : $P_T = P + \frac{1}{2} \rho v^2$
 - 3. Capteur dos au courant →
Pression « d'aval » : $P_A = P - \frac{1}{2} \rho v^2$



Cas particulier d'un écoulement horizontal

En condition statique :



En écoulement :

-
- Le conduit est horizontal donc la pression de pesanteur ne change pas ($\rho gh = \text{cste}$)
 - Donc l'équation de Bernoulli devient :

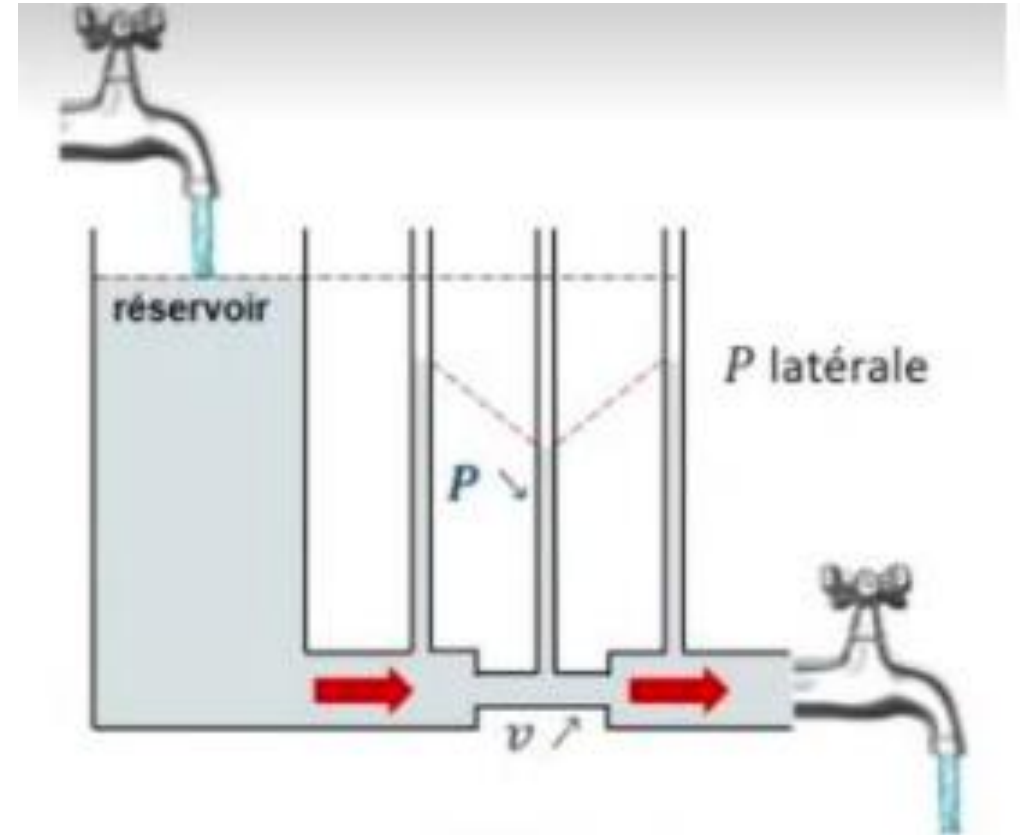
$$\bullet \quad P_t = \frac{1}{2}\rho v^2 + P = \text{cste}$$

- Donc la pression totale se répartit entre la pression cinétique et la pression latérale, d'où :

$$\bullet \quad P = \text{cste} - \frac{1}{2}\rho v^2$$

Effet de variation de section

Effet Venturi

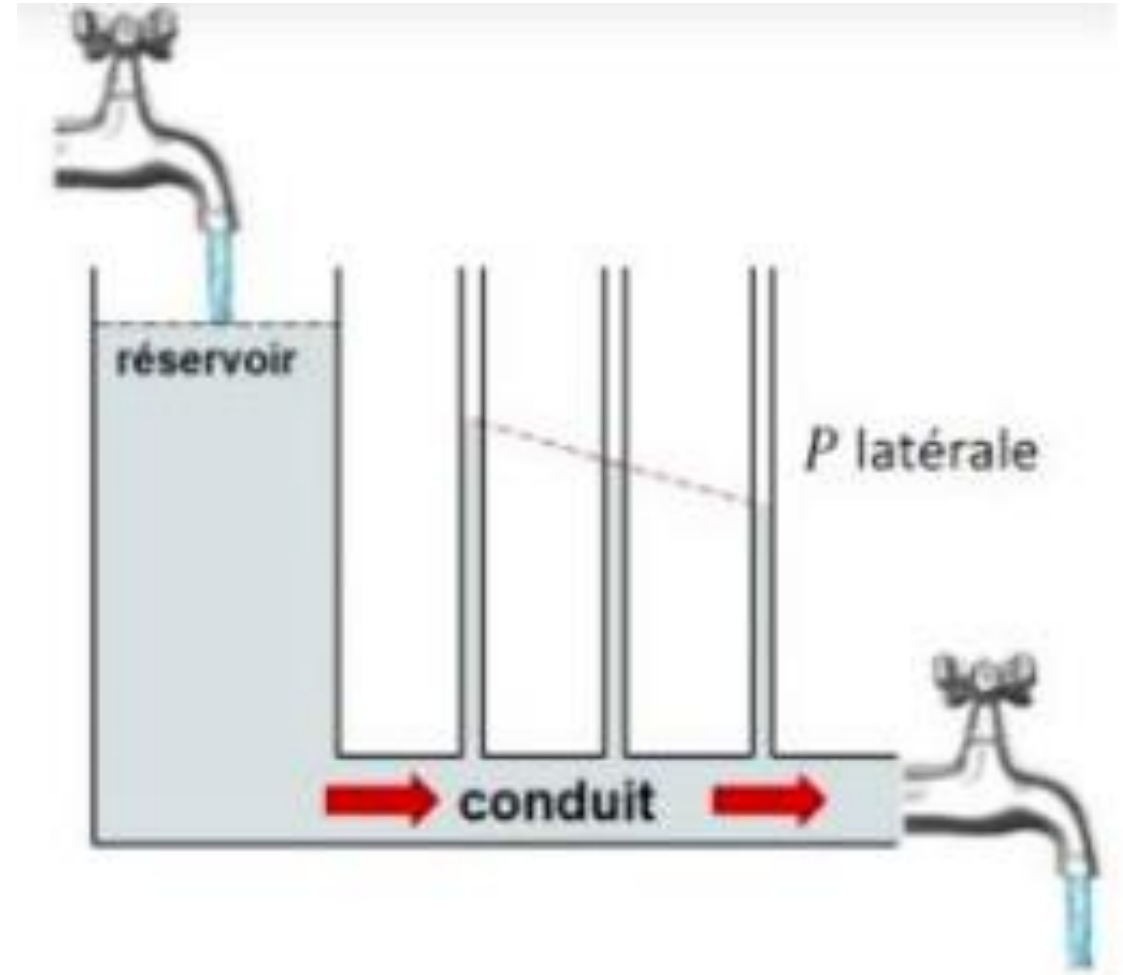


3) Dynamique d'un fluide réel



Les compétitions de canoë-kayak slalom se dérouleront sur le tout nouveau stade d'eau vive (donc sur un fluide réel dynamique). [...] Le canoë slalom est apparu pour la première fois aux Jeux Olympiques de Munich, en 1972, et est définitivement entré au programme olympique aux Jeux de 1992 à Barcelone. Le palmarès olympique du slalom est largement dominé par l'Europe, qui s'arroge 90% des médailles décernées. Par exemple, entre les éditions d'Atlanta en 1996 et de Rio en 2016, seules trois médailles masculines ont échappé aux nations européennes. Via <https://www.paris2024.org/fr/sport/canoe-slalom/>

Perte de charge : liée à viscosité



Viscosité

- = frottements des molécules du fluide entre elles (en écoulement)
- $F = \eta S \frac{dv}{dx}$
- Fluide newtonien (eau)
- Fluide non newtonien (sang)

Écoulement laminaire

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

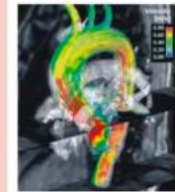
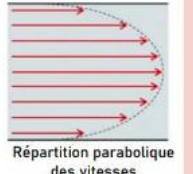


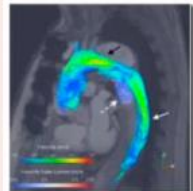
Image IRM des vitesses de la crosse aortique en couleur



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

Reynolds

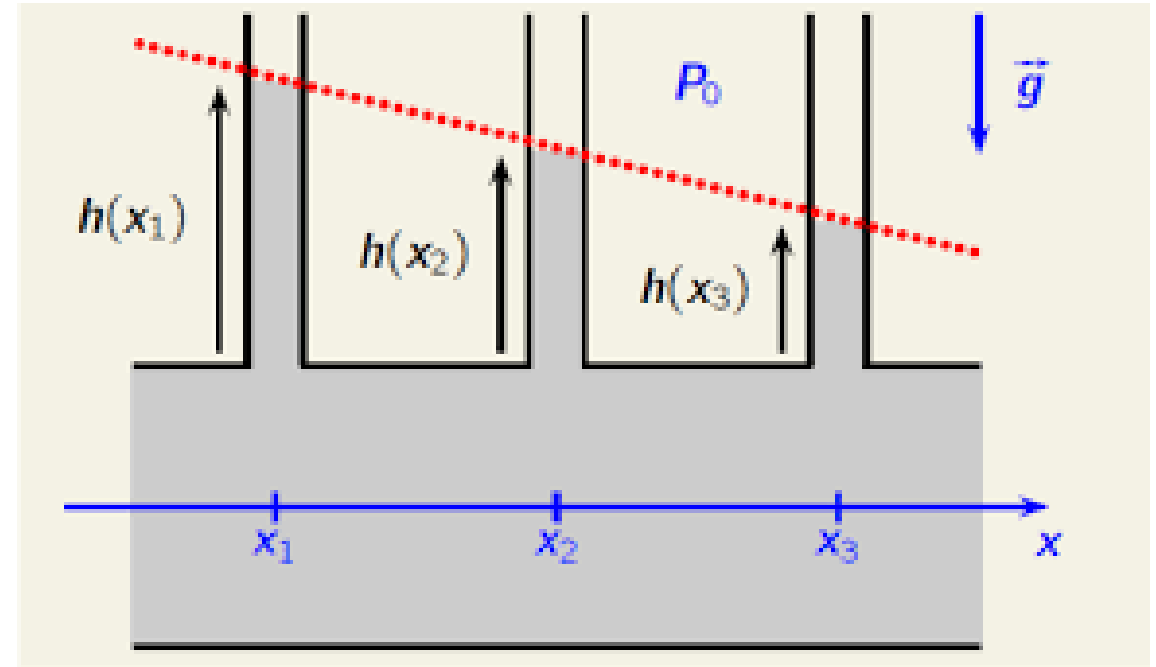
- Frontière entre laminaire et turbulent
- **$Re = \frac{\rho dv}{\eta}$**
 - Si **$Re \leq 2000$** : Le régime d'écoulement est laminaire.
 - Si **$Re > 10\ 000$** : Le régime d'écoulement est turbulent
 - **Entre les 2** : le régime d'écoulement est instable : on ne peut rien conclure.



Loi de Poiseuille

- Fluides réels en écoulement laminaire **seulement**

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



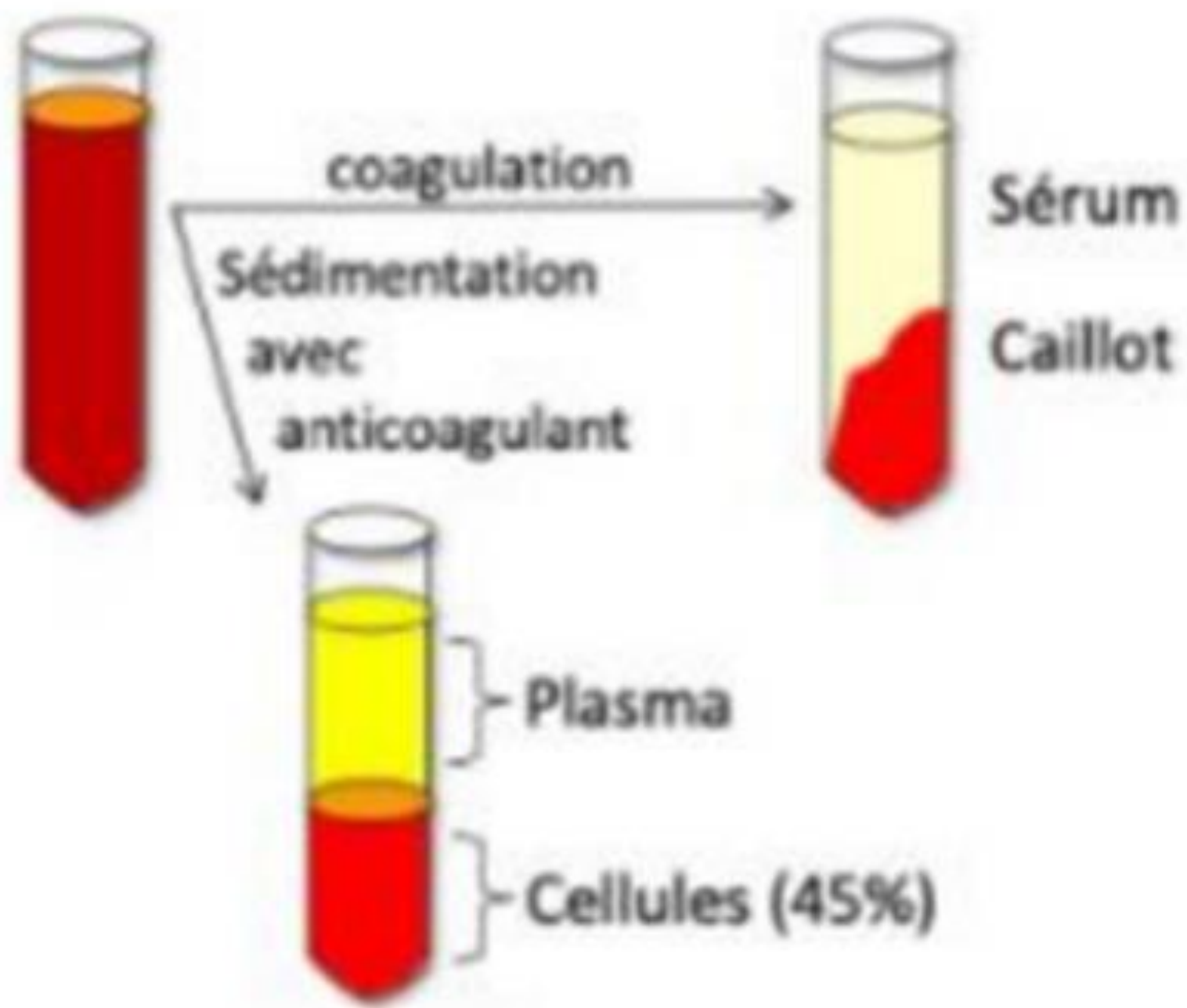
4) Particularités liées au sang

- Sérum/Caillot : pas d'anticoag
- Plasma/Cellules : avec anticoag
- Sang \neq solution vraie ; non-newtonien
- **Hématocrite** = $\frac{\text{Volume des cellules}}{\text{Volume total (=cellules+plasma)}} = 45\%$
- Rhéologie = déformations de la matière en écoulement
- Viscosité sang : interC
- Maladie Vaquez : gros vaisseaux
- Drépanocytose : petits vaisseaux

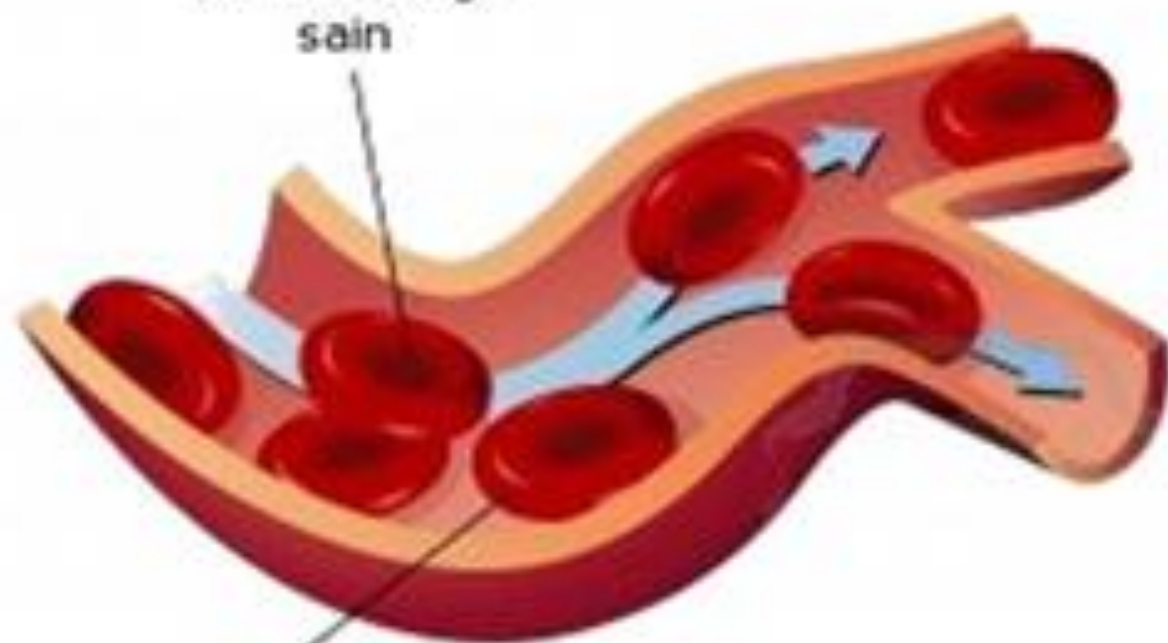


Les origines de la boxe sont incertaines, bien que certaines traces d'artefacts sumériens se trouvant dans l'actuelle Iraq remontent au 3e millénaire avant J-C. A la fin du 7e siècle avant J-C, la boxe s'ajoute aux épreuves disputées lors des Jeux Olympiques antiques. Alors, les combattants enveloppaient leurs poings et avant-bras de fines bandelettes de cuir afin de se protéger.

A la chute de l'Empire romain, la boxe semble disparaître. Mais la discipline réapparaît au 17e siècle, en Angleterre, où l'on trouve la trace de combats amateurs dès 1880. Initialement, cinq catégories de poids existaient : coq (moins de 54kg), plume (moins de 57kg), léger (moins de 63,5kg), moyen (moins de 73kg) et lourd (plus de 73kg). Via <https://www.paris2024.org/fr/sport/boxe/>

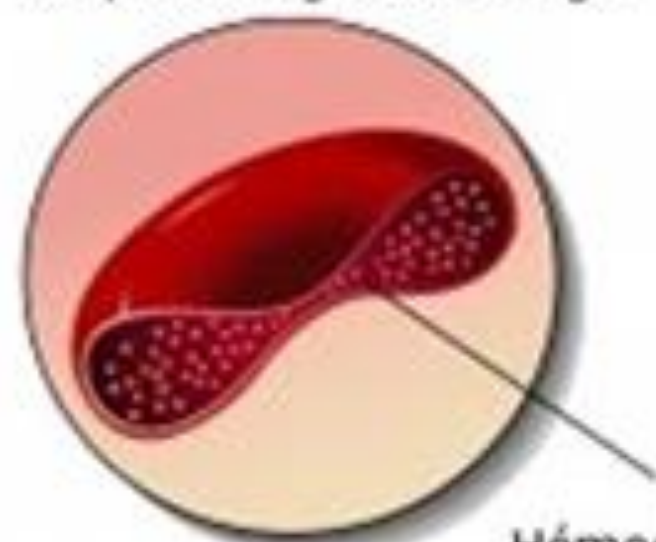


Globule rouge
sain

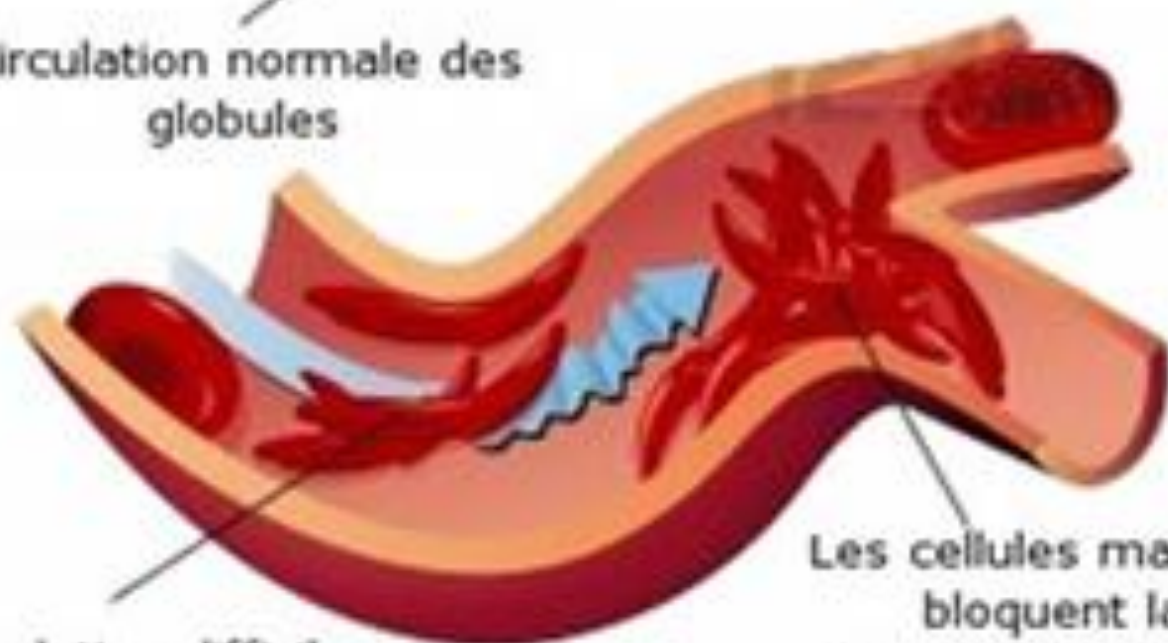


Circulation normale des
globules

Coupe d'un globule rouge

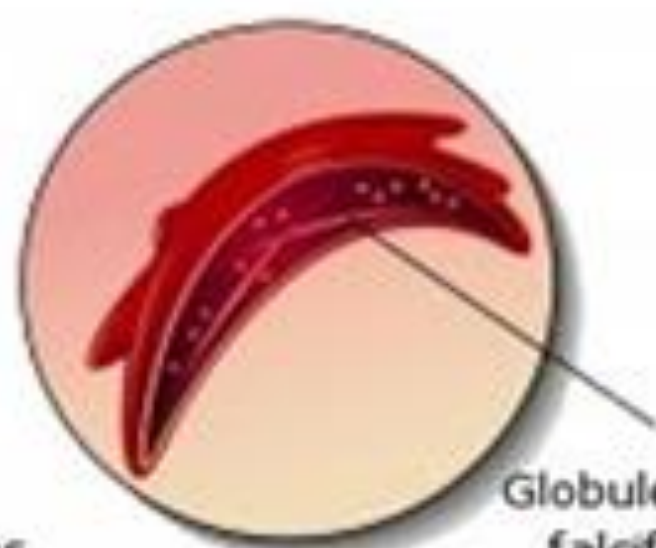


Hémoglobine
saine



Circulation difficile

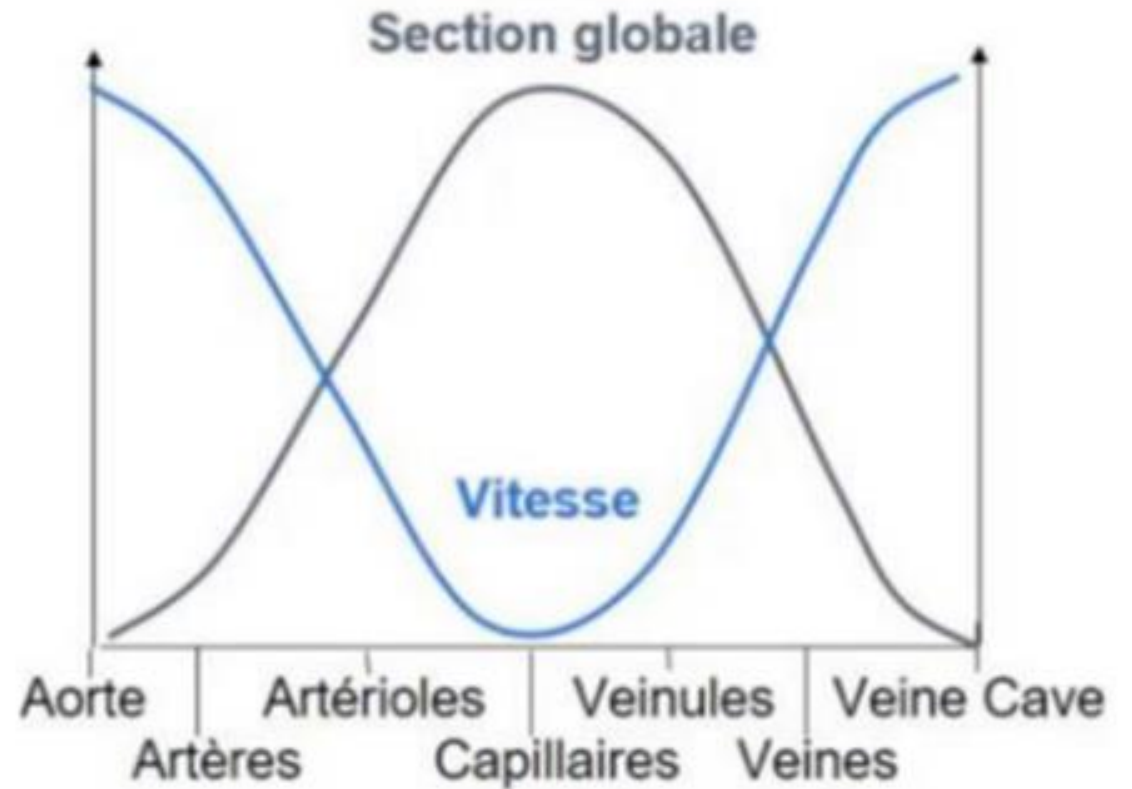
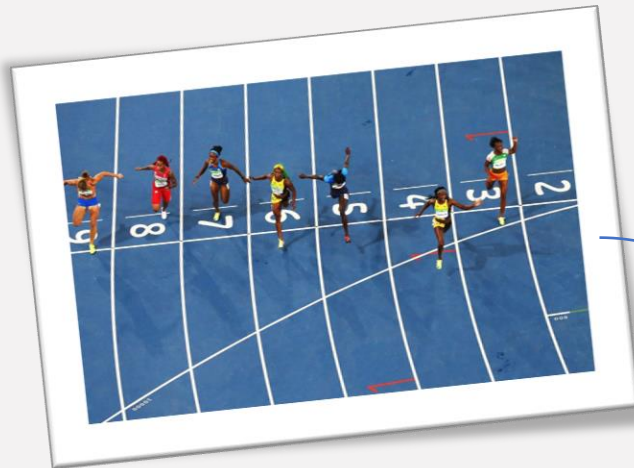
Les cellules malades
bloquent la
circulation sanguine



Globule rouge
falciforme

5) Particularités liées à l'anatomie

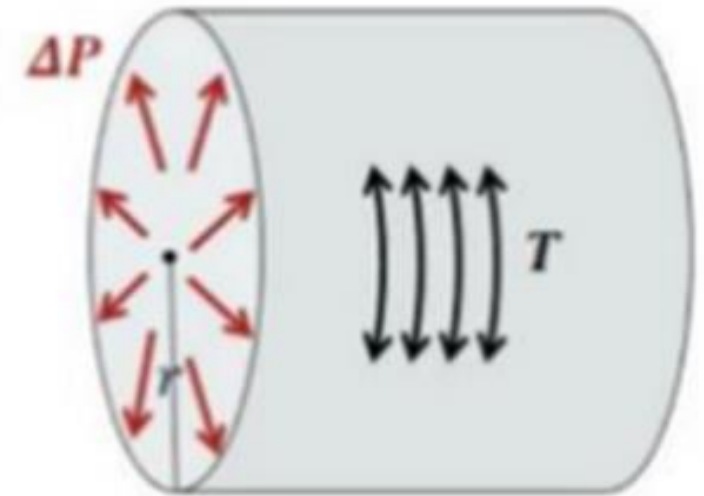
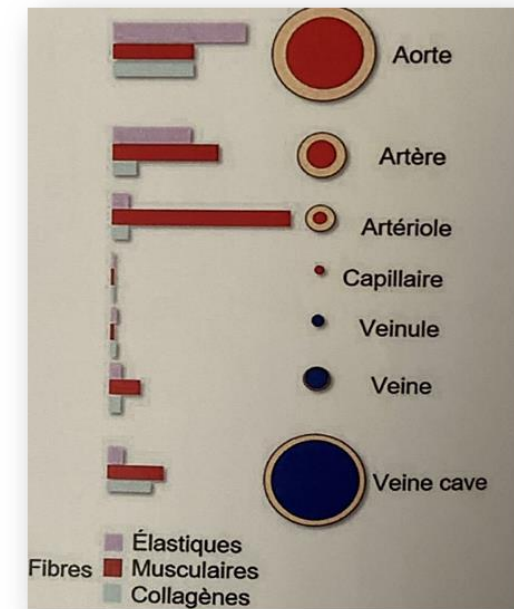
- 2 circulations
- 3 secteurs (veineux, artériel, pulmonaire)



L'athlétisme est le sport le plus ancien dont nous avons des traces, puisqu'il apparaît dès les Jeux Olympiques de l'Antiquité. Il est possible de trouver les champions d'athlétisme depuis 776 avant J-C. A l'époque, les Jeux Olympiques antiques comprennent des épreuves telles que des courses à pied et un pentathlon composé d'épreuves s'apparentant à une course, un saut en longueur, un lancer de disque, de la lutte et un lancer de javelot. Les premiers rassemblements modernes pouvant s'apparenter à des compétitions d'athlétisme ont lieu en Angleterre en 1840, dans le Shropshire. Ces championnats se développent et se multiplient dans les années 1880, ils prennent place initialement en Angleterre, aux USA et en Europe notamment. En 1912, la fédération internationale gérant les compétitions internationales d'athlétisme, l'IAAF (aujourd'hui World Athletics), est créée. Via <https://www.paris2024.org/fr/sport/athletisme/>

6) Constitution des parois des vaisseaux et comportement des vaisseaux élastiques

- Fibres : élastiques/de collagène/musculaires
- Forces en jeu sur parois élastiques → 2 phénomènes :
 - Gradient de pression
 - Tension des parois de ce vaisseau



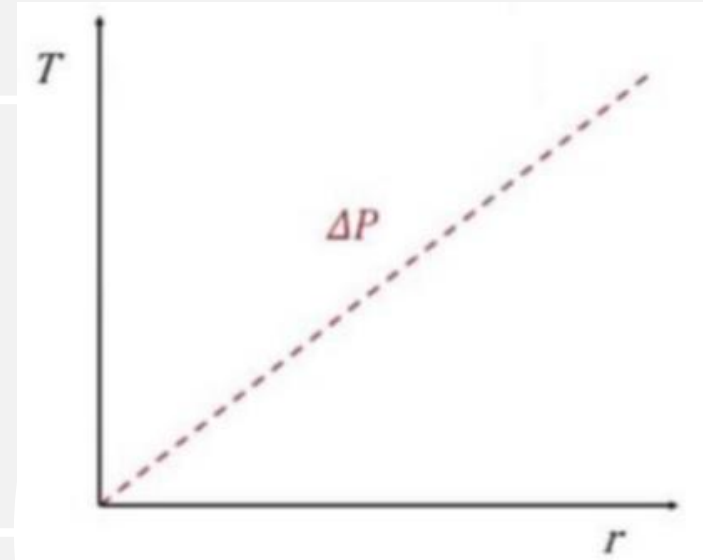
La gymnastique fait partie des sports historiques des Jeux de l'ère moderne. Elle a été au programme olympique de chacune des éditions organisées depuis les Jeux de 1896, à Athènes, où seuls les hommes étaient autorisés à participer. Les épreuves féminines de gymnastique artistique seront incorporées au programme olympique en 1928, lors des Jeux Olympiques d'Amsterdam. Le programme de la gymnastique a beaucoup évolué au cours de la première moitié du 20^e siècle, mais n'a ensuite plus bougé depuis 1960 pour les femmes, et 1936 pour les hommes.

Dans les années 1960 et 1970, le Japon dominait le palmarès olympique, pour ensuite marquer le pas devant l'Union Soviétique et l'Allemagne de l'Est. Aujourd'hui, les pays qui dominent les débats en gymnastique artistique sont le Japon, les Etats-Unis, la Russie et la Chine. Via <https://www.paris2024.org/fr/sport/gymnastique-artistique/>

La gymnastique demande donc forcément une certaine souplesse/élasticité

2 lois pour la relation tension-rayon

- Loi de Laplace : relation tension/pression
 - Tendence à la dilatation du vaisseau
 - Augmentation de la tension jusqu'à équilibre



$$\Delta P = \frac{T}{r} \rightarrow T = \Delta P * r$$

- Loi de Hooke : relation tension/élasticité

L'élasticité est la relation entre l'allongement d'un corps élastique et la force qui s'oppose à cet allongement.

$$F = \gamma S \frac{\Delta L}{L}$$

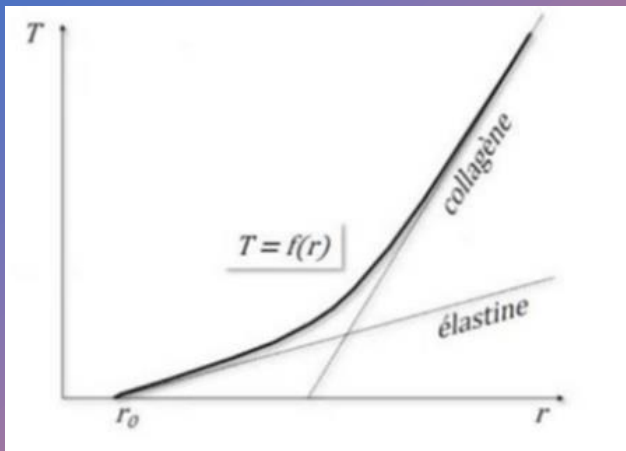
γ = module d'élasticité de Young

S = surface de la section

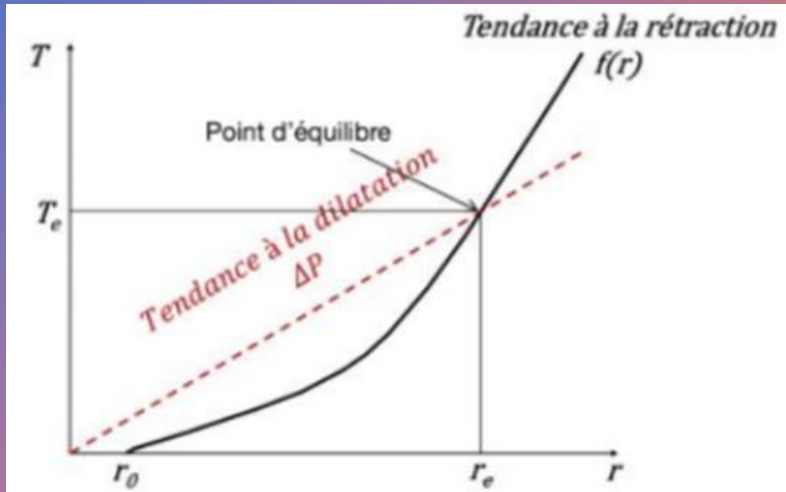
$\Delta L/L$ = allongement

○

+

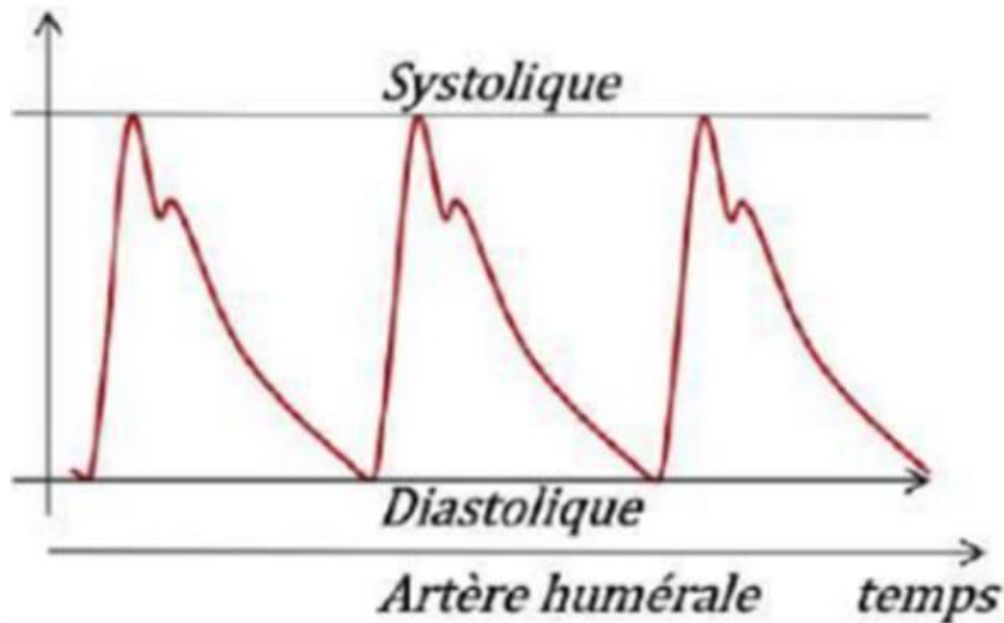


- Elasticité due à au moins 2 éléments élastiques : élastine + collagène



- Rayon d'équilibre : courbe caractéristique + ΔP

7) Mesure des pressions



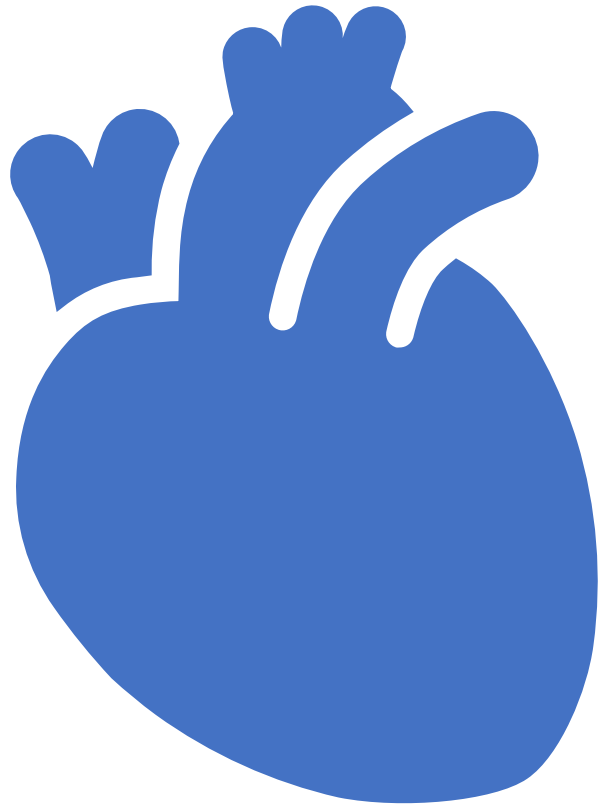
- Unités hors SI :
 - mmHg : $1 \text{ mmHg} = 133 \text{ Pa}$
 - cmH₂O : $1 \text{ cmH}_2\text{O} = 98 \text{ Pa}$
- PA = pression du sang produite par le cœur dans les artères
- Minimum : diastole = 80 mmHg /
Maximum : systole = 140 mmHg
- Conditions de mesure de la PA :
debout/assis

L'haltérophilie était présente dès les premiers Jeux Olympiques modernes d'Athènes, en 1896. Si pendant quelques éditions (1900, 1908 et 1912), elle quitte le programme olympique, l'haltérophilie revient ensuite au programme des Jeux d'Anvers en 1920, pour ne plus le quitter. Les femmes ont eu leurs épreuves à partir des Jeux Olympiques de Sydney, en 2000.

Au début du 20^e siècle, les pays européens dominent l'haltérophilie, en particulier l'Allemagne, l'Autriche et la France. Les athlètes soviétiques trustent ensuite les podiums à partir des années 50, avant que la Chine, la Turquie, la Grèce et l'Iran n'arrivent sur le devant de la scène dans les années 1990. Côté féminin, la Chine domine depuis l'arrivée de la discipline chez les femmes. Via <https://www.paris2024.org/fr/sport/halterophilie/>

La PA augmente lors de l'effort, en particulier en haltérophilie où beaucoup d'athlètes ont recours à la manœuvre de Valsalva (= inspirer et bloquer sa respiration, pour équilibrer les pressions)





- La pression veineuse centrale PVC
 - 1kPa
 - Réf : PV au niveau du cœur : $PVC(0) = 5\text{cmH}_2\text{O} = 500\text{Pa}$
 - Debout : PV dépend distance au cœur (+ sur MI)

La voile consiste à se déplacer avec un bateau, seulement à l'aide de la force du vent. Les conditions, toujours changeantes, requièrent beaucoup de technique et d'expérience de la part des athlètes pour être maîtrisées. Les règles de la fédération internationale de voile, World Sailing, sont appliquées pour les épreuves olympiques. Les compétitions sont composées de régates en flottes, qui opposent des bateaux identiques sur un même parcours varié. Via <https://www.paris2024.org/fr/sport/voile/> Cependant en voile, si la taille (ou diamètre) de la voile diminue, la vitesse aussi...

8) Applications en santé

- Auscultation cardio vasculaire :

Le **diamètre** est un facteur de turbulence et est lié à la **vitesse** (elle-même un facteur de turbulence) : si d diminue, v augmente.

Si d diminue, le risque de turbulence diminue aussi.

ATTENTION +++ Ceci ne s'applique que si le diamètre varie de manière isolée

En pratique, si d diminue, v augmente (principe de continuité du débit).

Il faut donc réécrire la formule en introduisant le débit, ce qui donne :

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\eta} = \frac{\rho \cdot 4Q}{\eta \cdot \pi \cdot d}$$



**Causes
LÉSIONNELLES**

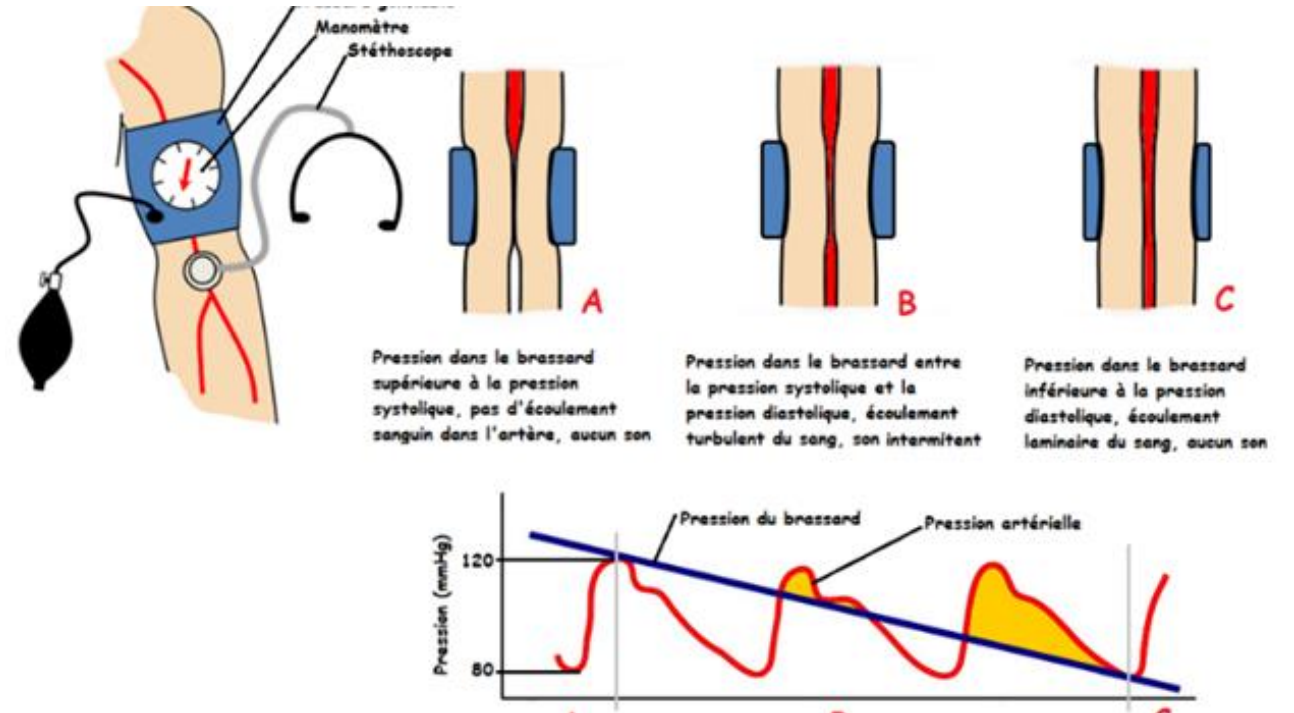
- $d \downarrow$ ✓ Souffle vasculaire : sténose vasculaire
✓ Souffle cardiaque : sténose ou fuite valvulaire cardiaque

**Causes
FONCTIONNELLES**

- $Q \uparrow$
 $\eta \downarrow$ ✓ Souffle d'effort
✓ Souffle lié à l'anémie (anémie: $n \downarrow$ et $Q \uparrow$)

- Mesure auscultatoire de la PA
- Non invasive
- Indirecte
- Création d'une sténose
- Artère humérale

Auscultation en aval :
interprétation des bruits de
Korotkov



1 - $P_{\text{brassard}} > PA_{\text{systole}}$: **aucun bruit**

⇒ On gonfle le brassard jusqu'à contrer la PA :
cela collabe l'artère

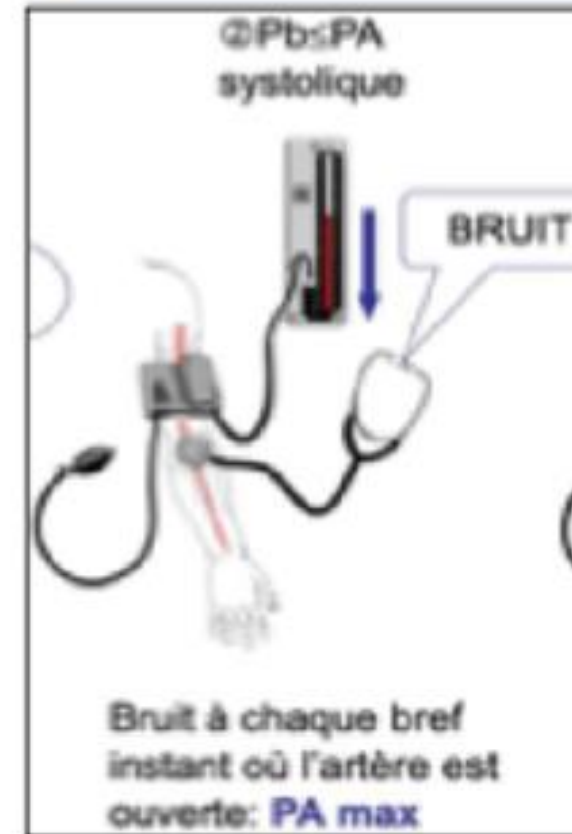
On n'entend **rien** car **le sang ne circule pas !**

① $P_b > PA_{\text{systolique}}$



2 - $P_{\text{brassard}} \leq P_{A_{\text{systole}}}$:
Bruit sec intermittent

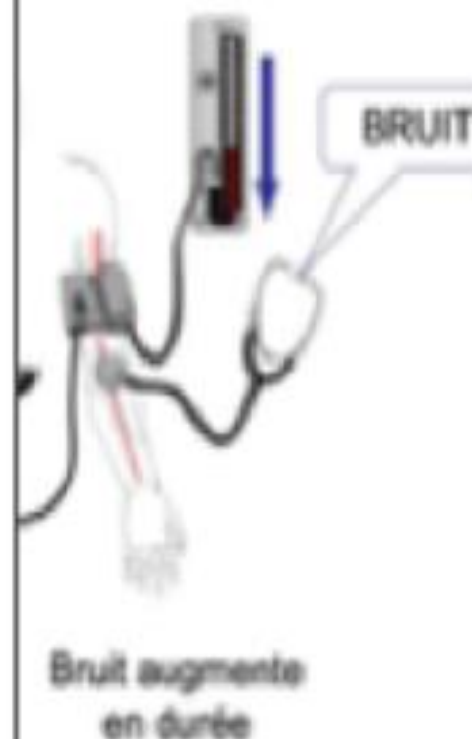
- ⇒ Peu à peu on diminue la pression du brassard jusqu'à passer en dessous de la PA maximale = P_{systole}
- ⇒ Bruit bref audible à chaque moment où l'artère est perméable (ouverte) sous l'effet de la pression artérielle
 - ⇒ On entend un bruit dû à l'écoulement **turbulent en systole**.
 - ⇒ **Apparition du 1er bruit sec: c'est la PA maximale soit la PA systolique**



3 - $PA_{diastole} < Pb < PA_{systole}$:
Bruit qui s'allonge et qui persiste

- ⇒ On continue à diminuer la pression du brassard, on entend alors un **bruit qui augmente en durée et change de timbre**
- ⇒ En systole, la circulation est redevenue laminaire, mais est turbulente en diastole

$Pb < PA_{systolique}$
 $Pb > PA_{diastolique}$



4 - $P_b < P_{A_{diastole}}$
Disparition de tout bruit

奈 On diminue toujours la pression du brassard jusqu'à ne plus rien entendre
le sang circule à nouveau de manière **laminaire** en **diastole** et en **systole**, l'artère n'est plus compressée.

On obtient donc la **PA minimale = PA diastolique ++**

④ $P_b < P_{A_{diastolique}}$



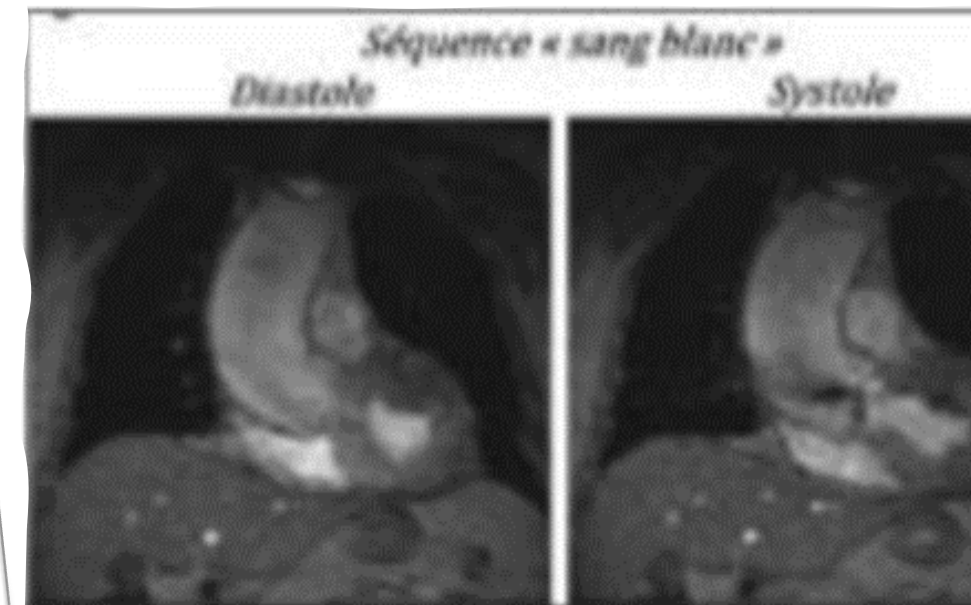
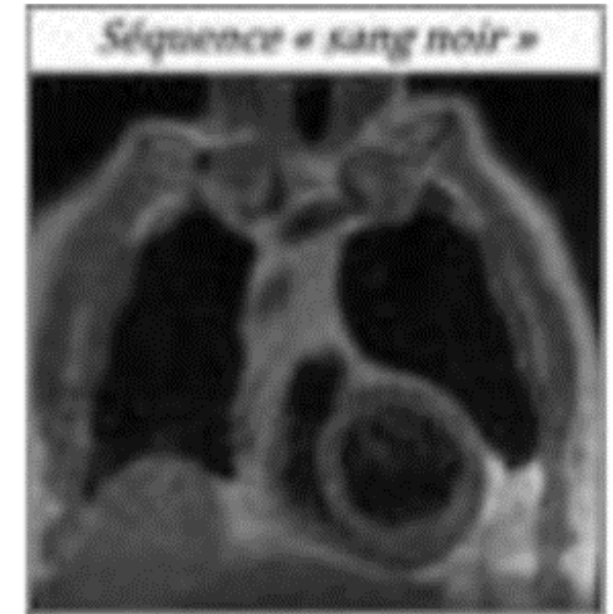
Disparition de tout bruit:
PA min

- Pression max = PA systolique
- Pression min \approx PA diastolique donc
 $PA_{min} = PA_{diast} + 2mmHg$
- PA moyenne :

$$PA_{moy} = \frac{PA_{sys} + 2PA_{diast}}{3} = 13 \text{ kPa (98 mmHg)}$$

9) Applications à l'imagerie médicale

- IRM cardiaque : **imagerie par résonance magnétique** nucléaire avec visualisation d'un signal lié aux protons.
- On utilise 2 types de séquences :
 - sang noir : relaxation protons du sang en mvt
 - sang blanc : sang en hypersignal lié aux protons qui circulent en laminaire ; perte de signal si turbulent (sang noir) = rétrécissement de la valve aortique



La formule moderne du pentathlon combine quatre épreuves, issues de cinq sports : La natation, avec un 200m nage libre ; L'escrime, avec premièrement un tournoi de classement sous la forme de matchs d'une minute contre tous les autres athlètes. En fonction du classement de ce tournoi, les athlètes entament ensuite une épreuve d'escrime bonus, qui se déroule sous la forme d'un tournoi à élimination directe. Les combats durent 30 secondes, et chaque victoire apporte un point bonus au score de l'athlète à l'épreuve de classement ; L'équitation, avec un parcours de saut d'obstacles sur un cheval que l'athlète ne connaît pas et qu'il a tiré au sort vingt minutes avant le début de l'épreuve ; La course à pied et le tir, avec un laser-run où les athlètes enchaînent phases de course à pied et phases de tir sur cinq cibles, à une distance de dix mètres. Via <https://www.paris2024.org/fr/sport/pentathlon/moderne/>

Conseil : à éviter en cas de rétrécissement de la valve aortique



QCMs

QCM 1 : Concernant les lois de Pascal...

- A) La 1^{ère} loi de Pascal dit que la pression est la même en tout point de même profondeur
- B) La 3^{ème} loi de Pascal dit que la pression est la même tout point de même profondeur
- C) La 2^{ème} loi de Pascal dit que la différence de pression entre 2 points est proportionnelle à la différence de hauteur entre ces 2 points
- D) La 1^{ère} loi de Pascal dit que la pression est la même dans toutes les directions
- E) ABCD sont fausses

D

QCM 2 : Concernant la dynamique d'un fluide idéal...

- A) La perte de charge est due à la viscosité
- B) Le nombre de Reynolds permet de déterminer si un écoulement est turbulent ou laminaire
- C) L'effet Venturi permet de calculer la perte de charge
- D) Le sang est un fluide non newtonien
- E) ABCD sont fausses

E

QCM 3 : Concernant la biophysique de la circulation

A) $1\text{mmHg} = 400/3 \text{ Pa}$

B) Une mesure normale de la PA nous donnera 140mmHg en diastole et 80mmHg en systole

C) La loi de Poiseuille permet de calculer la perte de charge pour des fluides réels en écoulement laminaire seulement

D) Les bruits de Korotkov correspondent aux bruits qu'on entend dans le stéthoscope lors de la mesure de la PA au brassard à partir de l'apparition du 1^{er} bruit (systole) jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bruit (diastole)

E) ABCD sont fausses

ACD

QCM 4 : A propos du cours de circulation

- A) La loi de Laplace permet de modéliser la relation tension-élasticité
- B) En IRM, la séquence en sang noir montre un sang en hypersignal
- C) L'élasticité des fibres de collagène dépend du tonus musculaire
- D) Un hématoците normal est de 45%
- E) ABCD sont fausses

D

QCM 22 - Quelle est, en pascal, la chute de pression induite par un réseau capillaire sanguin suivant : $5 \cdot 10^9$ capillaires en parallèle, de rayon $4 \mu m$, de longueur $0,5 \text{ mm}$ et dont le débit sanguin global est égal à $3,84 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$? On considère une viscosité apparente égale à $3,14 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ dans ces conditions de circulation.

- A) 200
- B) 500
- C) 920
- D) 1300
- E) 3200

A



**Voilà c'est finito
mes ptits pessi**