

Biophysique de la Circulation

Mécanique des Fluides

Les lois de l'hydrostatique

Anthime FLAUS

Marc Janier

Service de Médecine Nucléaire

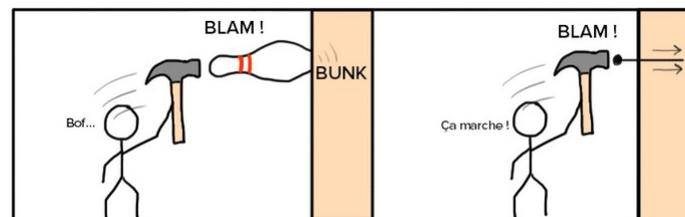
Hôpital GHE - cardiologie

Faculté Lyon-Est



1

Notion de pression



<https://fr.khanacademy.org/science/>

2

2

Notion de pression

Unité : le Pascal (Pa) $P = \frac{\|\vec{df}\|}{dS}$ $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Pression atmosphérique : 1.013×10^5 Pa (1 bar = 10^5 Pa)

En médecine :

- millimètre de mercure : 1 mmHg = 133,4 Pa

- centimètre d'eau : 1 cm H₂O = 98,1 Pa

Par Becarlson – Travail personnel, see <http://www.becarlson.com/>, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14728470>

3

3

Pression en pascal :

$$\left[\frac{\text{force}}{\text{aire}} \right] = \frac{\text{M} \cdot \text{L} \cdot \text{T}^{-2}}{\text{L}^2} = \text{M} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{T}^{-2}$$

Pression en joule par mètre cube :

$$\left[\frac{\text{énergie}}{\text{volume}} \right] = \frac{\text{M} \cdot \text{L}^2 \cdot \text{T}^{-2}}{\text{L}^3} = \text{M} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{T}^{-2}$$

Joule par m³

https://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-des-fluides/courtin/pression-dans-les-fluides/co/Pression%20dans%20les%20fluides_22.html

4

4

Question 1 :

Quelle est en mmHg la valeur moyenne arrondie de la pression atmosphérique ?

- A. 1033 mmHg
- B. 760 mmHg
- C. $13,5 \times 10^6$ mmHg
- D. 9×10^6 mmHg
- E. 135 mmHg

5

5

Question 1 :

Quelle est en mmHg la valeur moyenne arrondie de la pression atmosphérique ?

- A. 1033 mmHg
- B. 760 mmHg
- C. $13,5 \times 10^6$ mmHg
- D. 9×10^6 mmHg
- E. 135 mmHg

6

6

Question 1 :

Quelle est en mmHg la valeur moyenne arrondie de la pression atmosphérique ?

- A. 1033 mmHg
- B. 760 mmHg
- C. $13,5 \times 10^6$ mmHg
- D. 9×10^6 mmHg
- E. 135 mmHg

135 mmHg = pression artérielle systolique normale
Il s'agit d'une surpression par rapport à la pression atmosphérique

7

7

HYDROSTATIQUE

Les Unités : applications

Conversion des cm H₂O et mm Hg en Pa

- cm H₂O : soit une colonne d'eau ($\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$)
Quelle est la différence de pression exprimée en Pa correspondant à 2 points séparés de 1 cm dans la colonne d'eau?
On a $\Delta P + \rho g \Delta z = 0$
d'où $\Delta P = \rho g \Delta z = 1000 \times 9,81 \times 0,01 = 98,1 \text{ Pa}$
Donc 1 cm H₂O = 98,1 Pa
- mm Hg : soit une colonne de mercure ($\rho = 13,6 \text{ g.cm}^{-3}$)
Quelle est la différence de pression exprimée en Pa correspondant à 2 points séparés de 1 mm dans la colonne de mercure ?
On a $\Delta P + \rho g \Delta z = 0$ et $10^6 \text{ cm}^3 = 1 \text{ m}^3$ d'où $\rho = 13600 \text{ kg.m}^{-3}$
d'où $\Delta P = \rho g \Delta z = 13600 \times 9,81 \times 0,001 = 133,4 \text{ Pa}$
Donc 1 mm Hg = 133,4 Pa = 1,36 cm H₂O

Hydrostatique. Les unités de Pression 8

8

Définition

- **Fluide**: milieu facilement déformable pouvant s'écouler, changer de forme sous l'action de forces pouvant être aussi faibles que l'on veut à condition qu'elles agissent assez longtemps

9

9

Principes de l'hydrostatique

Ils s'appliquent :

- 1- à un fluide immobile
- 2- supposé incompressible
- 3- et isotherme = absence de courant de convection

2 et 3 permettant d'affirmer que la masse volumique du fluide est uniforme dans l'espace et dans le temps

10

10

Théorème de Pascal

Dans un fluide incompressible en équilibre, toute variation de pression produite en un point se transmet intégralement à tous les points du fluide.

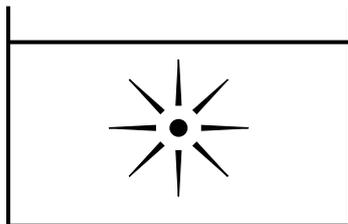
11

11

Théorème de Pascal

En chaque point d'un système fluide confiné, il existe une pression dite hydrostatique qui agit également dans toutes les directions

Notion voisine de celle rencontrée pour la pression d'un gaz



12

12

Expérience

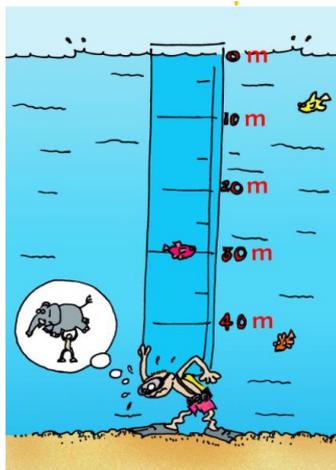
En chaque point d'un système fluide, il existe une pression qui agit également dans toutes les directions



13

13

Principe fondamental de l'hydrostatique

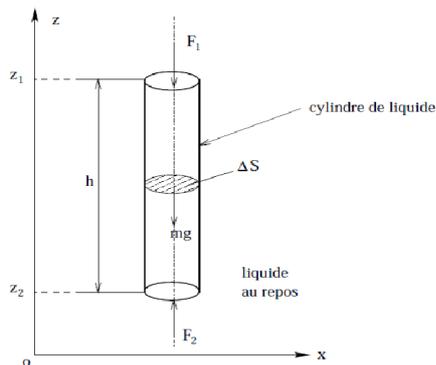


<https://www.citedelamer.com/wp-content/uploads/2017/11/QUESTIONNAIRE-2de-Pression.pdf>

14

14

Principe fondamental de l'hydrostatique



Sur l'axe vertical, l'équilibre s'écrit :

$$\vec{P} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$$

Avec ρ , la masse volumique du fluide et P_1 et P_2 les pressions sur les deux bases :

$$(P_2 - P_1)S = \rho ghS$$

$$(P_2 - P_1) = \rho gh$$

15

15

Principe fondamental de l'hydrostatique

$$P_2 - P_1 = \rho gh$$

P la pression en un point

ρ la masse volumique du liquide (supposée uniforme)

g l'accélération de la pesanteur (supposée constante)

h la différence de hauteur entre les deux points (orienté + vers le haut)

16

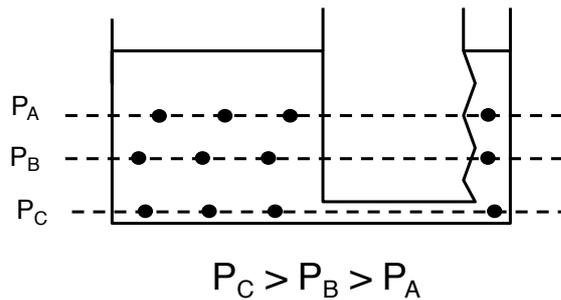
16

Conséquence du principe fondamental de l'hydrostatique

Exprime les modifications de cette pression sous l'influence de la pesanteur, lorsque l'on passe d'un niveau à un autre

La pression hydrostatique est la même en tous les points, dans un fluide continu cohérent, au même niveau

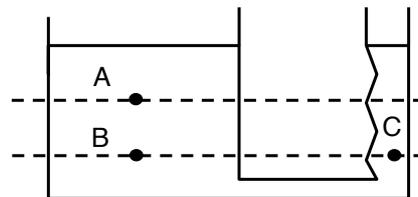
La pression augmente avec la profondeur d'une quantité $\rho g z$



17

17

Soient 3 points A, B et C



- $z_B = z_C$ alors $P_B = P_C$

- $z_A > z_B$ alors $P_A - P_B = \rho g (z_B - z_A) = -\rho g (z_A - z_B)$
or $z_A > z_B$ d'où $P_A < P_B$

$$\Delta P + \rho g \Delta z = 0$$

Hydrostatique. Lois de Pascal .. Définition 18

18

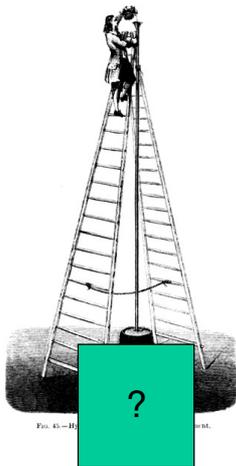
Que se passe-t-il en apesanteur simulée avec une chute libre ?



19

19

Question 2 : Est-ce qu'un tonneau peut exploser à cause d'un mince tube d'eau ?

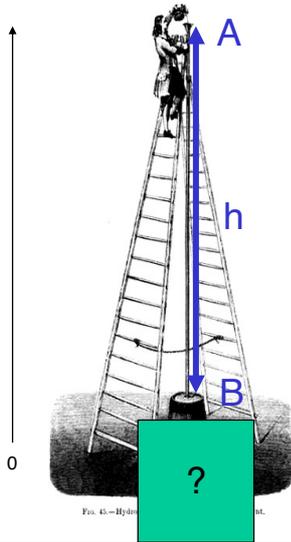


- A. Oui
- B. Non
- C. Je ne sais pas

20

20

Question 2 : Est-ce qu'un tonneau peut exploser à cause d'un mince tube d'eau ?



Sur l'axe vertical, l'équilibre s'écrit :

$$\vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_B = \vec{0}$$

Avec ρ , la masse volumique du fluide et P_A et P_B les pressions sur les deux bases :

$$(P_B - P_A)S = \rho ghS$$

$$(P_B - P_A) = \rho gh$$

Ne dépend pas du diamètre du tube

21

21

Exemple :

Données :

- $h = 3 \text{ m}$

- Surface du tonneau = 1 m^2

$$\Delta P = \rho g \Delta z = 1000 * 9.81 * 3 \approx 3.10^3 \text{ Pa}$$

Ce qui correspond à une force:

$$F = P \times S = 3.10^3 \text{ N}$$

Force de gravité: $F = m \times g$

Donc correspond à une force exercée par une masse de 3000kg

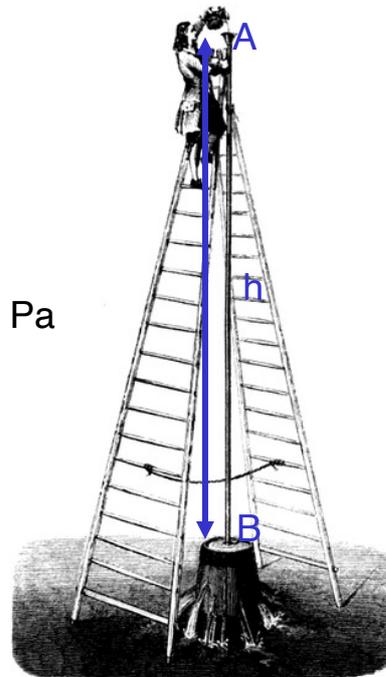
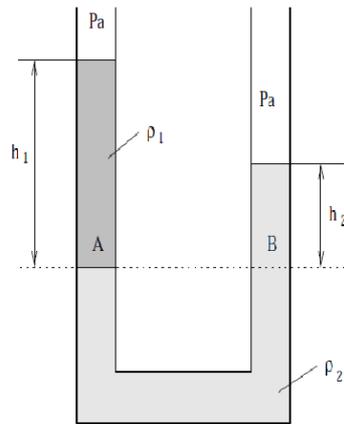


FIG. 45.—Hydrostatic paradox. Pascal's experiment.

22

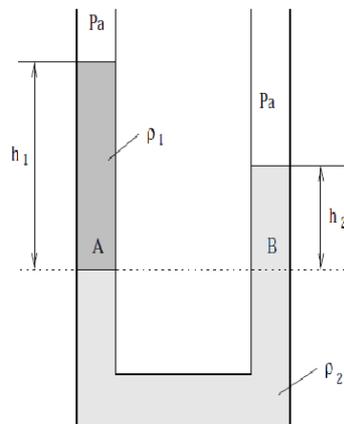
Question 3 : déterminer l'expression de la masse volumique du liquide 2 en fonction des autres variables



23

23

Question 3 : déterminer l'expression de la masse volumique du liquide 2 en fonction des autres variables

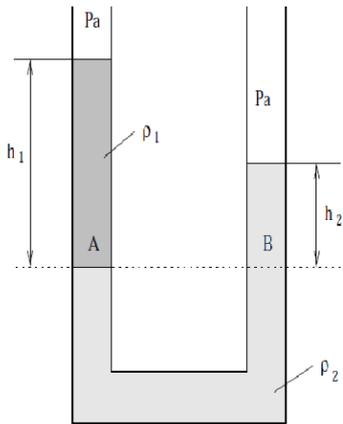


- A. $\rho_2 = \rho_1 \cdot h_1/h_2$
- B. $\rho_2 = \rho_1 \cdot h_2/h_1$
- C. $\rho_2 = h_1 \cdot h_2/\rho_1$
- D. $\rho_2 = h_2 \cdot \rho_1/h_1$

24

24

Question 3 : déterminer l'expression de la masse volumique du liquide 2 en fonction des autres variables



En appliquant la loi fondamentale de l'hydrostatique :

$$P_A = P_a + \rho_1 g h_1 \text{ et } P_B = P_a + \rho_2 g h_2$$

$$P_A - P_B = g(\rho_1 h_1 - \rho_2 h_2)$$

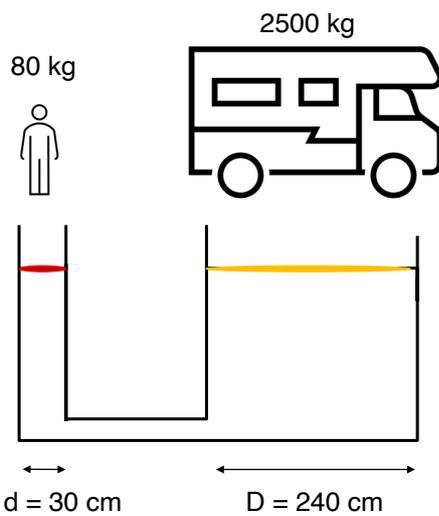
Or $P_A = P_B$ car même fluide et même plan horizontal

$$\text{Donc } \rho_1 h_1 = \rho_2 h_2 \text{ et } \rho_2 = \rho_1 h_1 / h_2$$

25

25

Question 4 : le mécanicien peut-il soulever la voiture avec une presse hydraulique ?



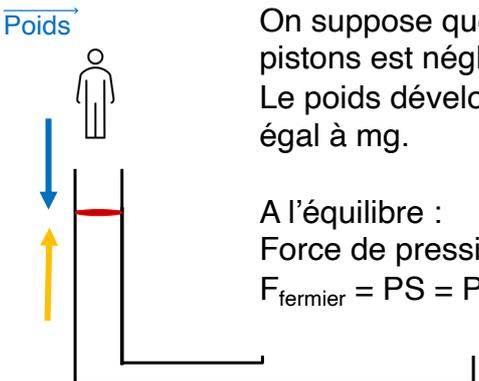
- A. Oui
- B. Non
- C. Je ne sais pas
- D. Oui et même plusieurs camping-cars

26

26

Question 4 : le mécanicien peut-il soulever la voiture avec une presse hydraulique ?

Poids



On suppose que la variation d'altitude entre les deux pistons est négligeable.
Le poids développé par le fermier sur le piston est égal à mg .

A l'équilibre :
Force de pression hydrostatique = poids
 $F_{\text{fermier}} = PS = P (\pi d^2/4)$

Pression hydrostatique

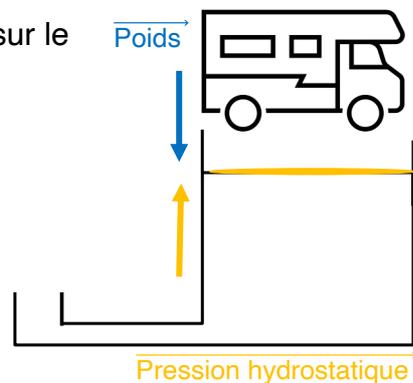
27

27

Question 4 : le mécanicien peut-il soulever la voiture avec une presse hydraulique ?

Le poids développé par le camping-car sur le piston est égal à mg .

A l'équilibre :
Force de pression hydrostatique = poids
 $F_{\text{camping-car}} = PS = P (\pi D^2/4)$



28

28

Question 4 : le mécanicien peut-il soulever la voiture avec une presse hydraulique ?

On en déduit :

$$4 F_{\text{fermier}} / (\pi d^2) = 4 F_{\text{camping-car}} / (\pi D^2)$$

Soit :

$$F_{\text{camping-car}} = F_{\text{fermier}} (D/d)^2$$

Soit :

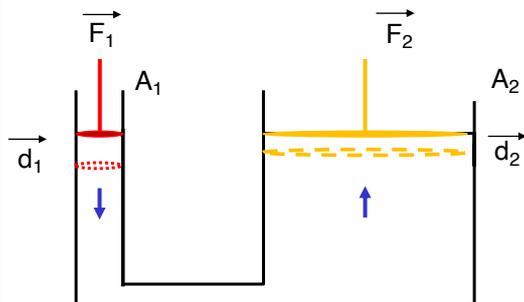
$$M_{\text{camping-car}} = M_{\text{fermier}} (D/d)^2$$

$$\text{A.N. } M_{\text{camping-car}} = 80 * 64 = 5120\text{kg}$$

29

29

$F_1 > F_2$ ou $F_1 < F_2$?



$F_2 > F_1$ et $d_2 < d_1$

Principe de conservation énergie

$$W_1 = W_2$$

$$F_1 \times d_1 = F_2 \times d_2$$

$$F_1/A_1 \times A_1 \times d_1 = F_2/A_2 \times A_2 \times d_2$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}$$

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

Fluide incompressible donc volume conservé

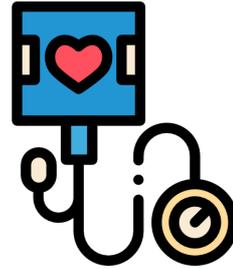
$$P_1 = P_2$$

30

30

Hydrostatique et pression artérielle

- Il s'agit de la pression en un point du système cardiovasculaire
- Effet de la pompe cardiaque
- Elle s'exprime en mmHg
- Surpression par rapport à la pression atm



31

31

Hydrostatique et pression artérielle

Taille (cm)

180

130

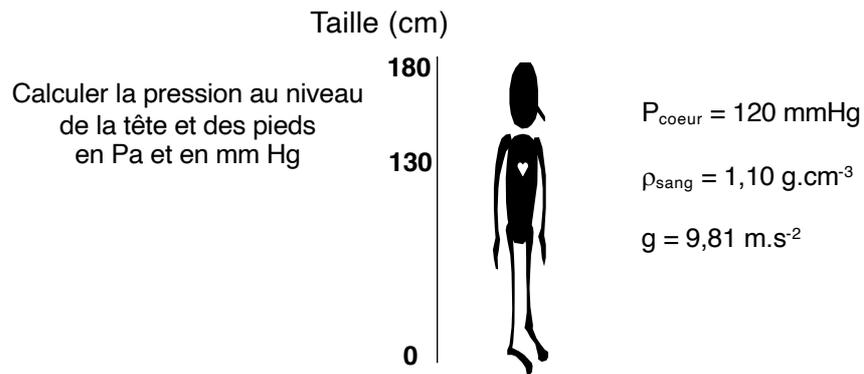
0



32

32

Hydrostatique et pression artérielle



33

33

Hydrostatique et pression artérielle

$\Delta P + \rho g \Delta z = 0$	masse volumique du sang (g.cm^{-3})	masse volumique du sang (kg.m^{-3})	g (m.s^{-2})	hauteur (m)
	1,1	1100	9,81	0,5

$$P_{\text{cœur}} (\text{Pa}) = 120 \cdot 133,3 = 15996 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{tête}} - P_{\text{cœur}} + \rho g z_{\text{tête}} - z_{\text{cœur}} = 0$$

$$P_{\text{tête}} = P_{\text{cœur}} - \rho g z_{\text{tête}} - z_{\text{cœur}}$$

$$P_{\text{tête}} = 15996 - 0,5 \cdot 9,81 \cdot 1100 = 15996 - 5395,5 = 10600,5$$

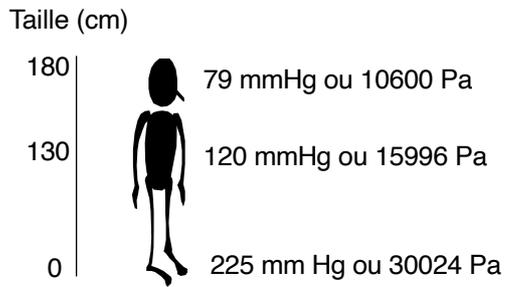
$$P_{\text{tête}} = 10600,5 \text{ Pa ou } 79,5 \text{ mmHg}$$

Hydrostatique. Applications

34

34

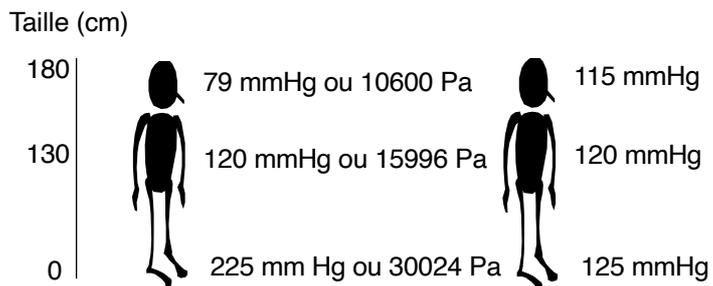
Hydrostatique et pression artérielle



35

35

Hydrostatique et pression artérielle



Régulation **SANS**
AVEC
Tonus vasculaire
Si sujet allongé alors équilibre des pressions

36

36

Hydrostatique et pression

Dans les conditions habituelles, le tonus vasculaire va permettre l'adaptation à ces conditions statiques et éviter les conséquences des variations de pression

artérielle

Cette adaptation est dépassée dans deux cas :

- augmentation brutale de l'accélération: pilotes de chasse et combinaisons anti-G
- hypotension orthostatique par ralentissement des phénomènes d'adaptation réflexe (âge, médicaments, pesanteur-apesanteur)

37

37

Autres pressions physiologiques

- Pression veineuse
- Pression du liquide céphalo-rachidien
- Pression intra-oculaire

38

38

- Pression exercée par le sang sur les parois des veines. **Pression veineuse**

- **Pression veineuse périphérique** : ponction d'une veine au pli du creux du coude chez un sujet allongé, comprise entre 3 et 12 cm d'eau

- **Pression veineuse centrale** : cathétérisme dans la veine cave supérieure à l'entrée de l'oreillette droite, inférieure à 8 cm d'eau

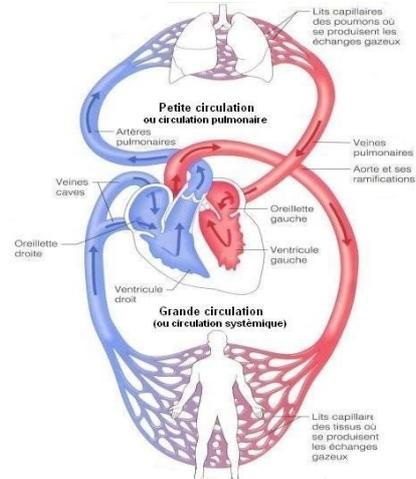
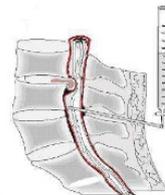
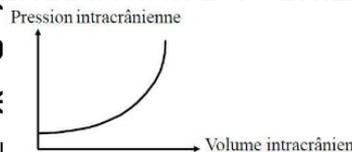


Image de Thèse Meddah, Karim, 2021/10/09. Implémentation sur FPGA d'un système intelligent pour la surveillance de l'état de santé des patients souffrants d'arythmie cardiaque

Pression du liquide céphalo-rachidien

- Mesurée par ponction lombaire, de l'ordre de 10 à 15 cm d'eau (1 à 1,5 kPa) : reflet de la pression intracérébrale

- Hypertension intracranienne : pression intracranienne augmente (ex : tumeur)



pression de la tumeur qui traduit l'augmentation du volume du crâne

file:///Users/anthimeflaus/Downloads/M%C3%A9canique%20des%20fluides.pdf

Pression intra-oculaire

- Pression de l'humeur aqueuse : maintien du globe oculaire en état de distension permanente, de l'ordre de 12-21 mm Hg.

- Pathologie type glaucome aiguë :

augmentation de la pression intra-oculaire

