Chapitre 5.6 – Applications de l'hydrostatique

Transfusion sanguine

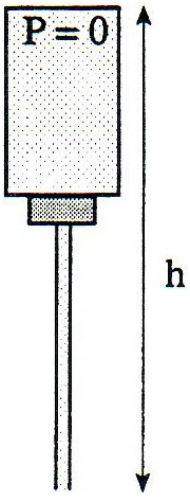
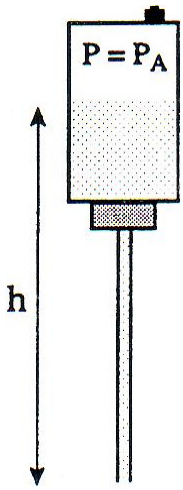
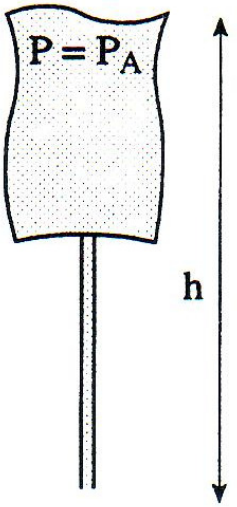
Pour effectuer une transfusion de sang à un patient, on utilise la force gravitationnelle :

1) Remplir un contenant avec le sang à administrer.
2) Suspendre le contenant à une hauteur supérieure au patient.
3) Raccorder le contenant à un tube d'écoulement.

Le choix du contenant est très important. Pour avoir un **écoulement**, il faut **briser l'équilibre statique** :

Écoulement vers le bas si : $P_{extérieur\ tube} < P_{haut\ contenant} + \rho\, g\, h$

Explication : Si la pression à l'extérieur du tube d'écoulement ne peut pas supporter la colonne de liquide, il y aura écoulement.

Bouteille rigide (sans entrée d'air)	Bouteille rigide (avec entrée d'air)	Bouteille de plastique souple (sans entrée d'air)
Non fonctionnelle	Fonctionnelle	Fonctionnelle idéale
		
$P = \rho gh$	$P = P_A + \rho gh$	$P = P_A + \rho gh$

- On branche le tube d'écoulement à une **veine** du patient, car la **pression sanguine** dans les veines est **légèrement supérieure** à la **pression atmosphérique**. Ceci empêche le sang de monter dans le contenant. Pour faciliter ou accélérer l'écoulement, il est préférable de suspendre le contenant à une hauteur très élevée (usage de support mobile).

- Il est préférable d'utiliser une bouteille de plastique souple, car ceci empêche de mélanger le sang avec des molécules et/ou des bactéries provenant de l'air.

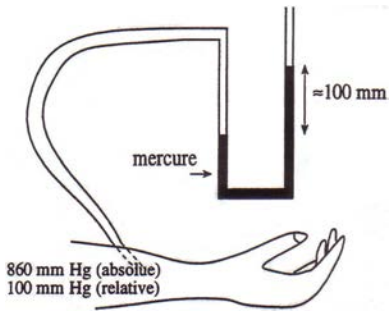
Pression sanguine en mode hydrostatique

Afin de mesurer la **pression sanguine** produite par le **cœur** (pression cardiaque moyenne), il est possible d'introduire dans **l'artère** d'un bras une **canule** (petit tube stérilisé) relié à un **manomètre en U**. La **pression** générée par le cœur pousse la colonne de mercure et une lecture de **pression relative** est possible. Il est important de réaliser que cette mesure de **pression** est **hydrostatique** (pression d'un liquide immobile) :

$$P_{relative} = h$$

où $P_{relative}$: Pression relative (mm Hg)

h : Hauteur de la colonne de mercure (mm)



Rappel : $1 \text{ mm Hg} = 133 \text{ Pa}$

$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm de Hg}$

- Typiquement, cette **pression relative** pour un patient est d'environ **100 mm Hg**.
- Cette pression est égale à la pression générée par **l'extension des vaisseaux sanguins**.
- La **pression sanguine absolue** (pression cardiaque moyenne) est typiquement égale à **860 mm Hg** ($P_{atmosphérique} + P_{relative}$).

L'oreille et les changements de pression

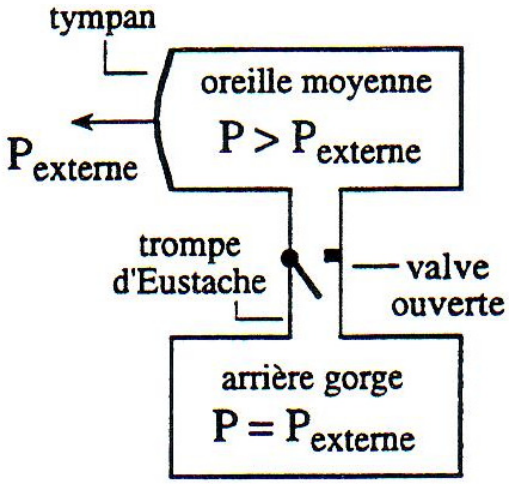
L'oreille est l'organe qui permet d'analyser la vibration des molécules d'air en traduisant cette information en « son ». Pour ce faire, le tympan doit être non déformé. Ainsi, l'oreille doit ajuster sa pression interne afin d'être égale à la pression externe.

<u>Baisse de pression du milieu externe</u>

Ex : Prendre de l'altitude en avion.

<u>Mécanisme de régulation :</u>

1) Le tympan est étiré vers **l'extérieur**.
2) Un **surplus d'air** est localisé dans **l'oreille moyenne**.
3) Transfert d'air de l'oreille moyenne à l'arrière gorge via un petit canal appelé trompe d'Eustache. La trompe d'Eustache se comporte alors comme une valve en position ouverte.
4) **Baisse de la pression** dans **l'oreille moyenne**.
5) Tympan retrouve sa forme normale.

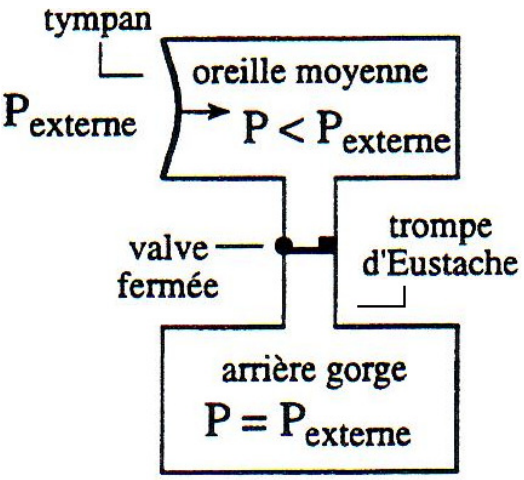


<u>Hausse de pression du milieu externe</u>

Ex : Perdre de l'altitude en avion.
Descendre dans le fond d'une piscine.

<u>Mécanisme de régulation :</u>

1) Le tympan est étiré vers **l'intérieur**.
2) Un **manque d'air** est localisé dans **l'oreille moyenne**.
3) Transfert difficile de l'air provenant de l'arrière gorge à l'oreille moyenne, car la trompe d'Eustache se comporte comme une petite valve en position fermée. Ceci occasionne des **<u>douleurs</u>**.
4) Déblocage mécanique de la trompe d'Eustache en avalant, mâchant ou en baillant.
5) **Hausse de la pression** dans **l'oreille moyenne**.
6) Tympan retrouve sa forme normale.



Les Poumons

Le rôle des poumons est d'effectuer les échanges gazeux du système. Ce mécanisme fonctionne via une **différence de pression** entre la pression à **l'intérieur des poumons** et la pression à **l'extérieur des poumons**.

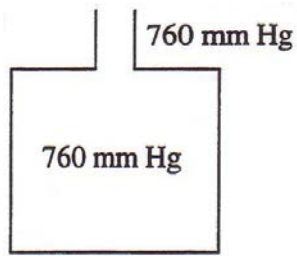
La pression à l'intérieur des poumons dépend du volume de chaque poumon. À l'aide de l'équation des gaz parfaits ($PV = nRT$), nous pouvons comprendre le mécanisme d'inspiration et d'expiration. Puisque la pression tend toujours à s'équilibrer, il y aura **échange gazeux** du milieu à **haute pression <u>vers</u>** le milieu à **basse pression**.

- À l'équilibre, le volume du poumon est tel que la pression du gaz dans le poumon est égale à la pression extérieure. Pas d'échange gazeux.
- $\uparrow V_{poumon} \Rightarrow \downarrow P_{poumon} \Rightarrow$ inspiration ($\uparrow$ % O_2) ($P_{poumon} < P_{extérieur}$)
- $\downarrow V_{poumon} \Rightarrow \uparrow P_{poumon} \Rightarrow$ expiration ($\downarrow$ % CO_2) ($P_{poumon} > P_{extérieur}$)

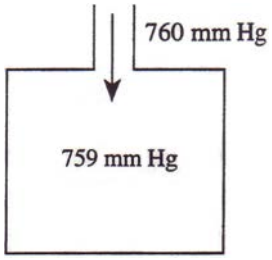
Schéma : Pression à l'équilibre : $P_{équilibre} = P_A = 101 \text{ kPa} = 760 \text{ mm de Hg}$

Variation de pression : $\Delta P = \pm 1 \text{ mm de Hg}$ (respiration normale)

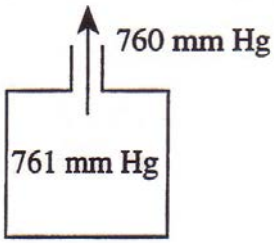
<u>Poumon à l'équilibre</u>



<u>Poumon en inspiration</u>



<u>Poumon expiration</u>



Mécanisme détaillé de la respiration

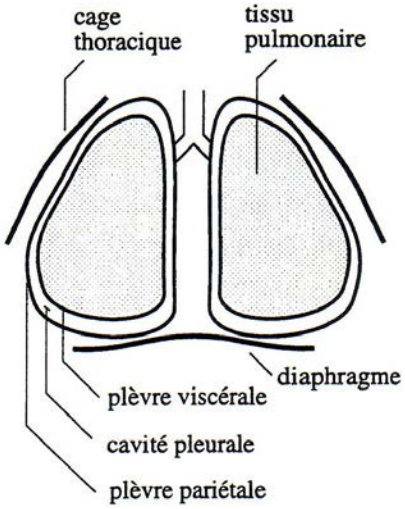
Plèvre viscérale : Membrane qui entoure le tissu pulmonaire.

Plèvre pariétale : Membrane qui entoure la plèvre viscérale.

Cavité pleurale : Cavité à pression relative négative **empêchant l'affaissement des tissus pulmonaire** et **contrôlant** le **volume du poumon**.

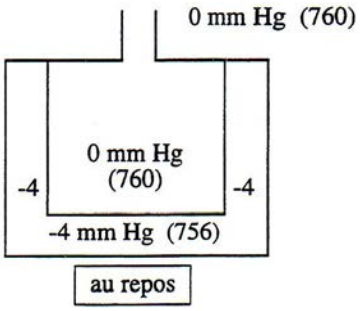
Diaphragme : Muscle qui augmente ou diminue le volume de la cavité pleurale.

Cage thoracique : Augmente ou diminue le volume de la cavité pleurale via les muscles respiratoires.



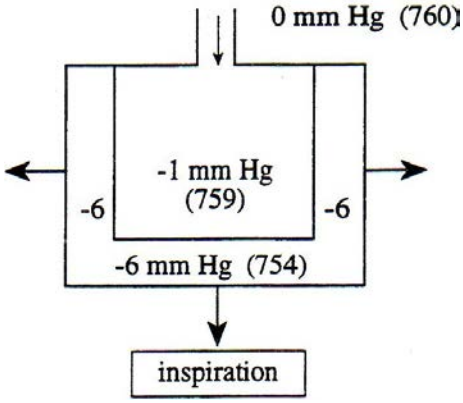
Pression aux repos

- La pression relative à l'intérieur des poumons est de 0 mm Hg (pression atmosphérique de 760 mm Hg).
- La cavité pleurale possède une pression relative de -4 mm Hg.
- **Le tissu pulmonaire est étiré au repos**. Le tissu pulmonaire applique une pression de 4 mm Hg sur le gaz dans les poumons



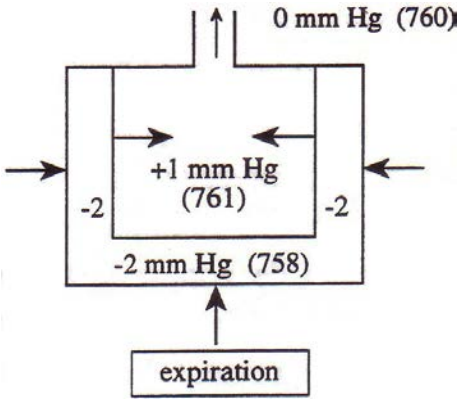
Poumon en inspiration normale

1) Augmentation du volume de la cavité pleurale (diaphragme et muscles de la cage thoracique tirent sur la plèvre pariétale).
2) Réduction de la pression relative à l'intérieur de la cavité pleurale (-4 mm Hg $\rightarrow$ -6 mm Hg).
3) Augmentation du volume des poumons ($\uparrow V_{poumon}$).
4) Réduction de la pression relative à l'intérieur des poumons (0 mm Hg $\rightarrow$ -1 mm Hg).
5) L'air externe entre dans les poumons jusqu'à ce que la pression relative à l'intérieur des poumons soit égale à 0 mm Hg ($P_{poumon} = P_{extérieur}$).



Poumon en expiration normale

1) Réduction du volume de la cavité pleurale (diaphragme et muscles de la cage thoracique pousse sur la plèvre pariétale).
2) Augmentation de la pression relative à l'intérieur de la cavité pleurale (-6 mm Hg $\rightarrow$ -2 mm Hg).
3) Réduction du volume des poumons ($\downarrow V_{poumon}$).
4) Augmentation de la pression relative à l'intérieur des poumons (0 mm Hg $\rightarrow$ +1 mm Hg).
5) L'air sort des poumons jusqu'à ce que la pression relative à l'intérieur des poumons soit égale à 0 mm Hg ($P_{poumon} = P_{extérieur}$).



La plongée sous-marine

La respiration est possible grâce au diaphragme et aux muscles de la cage thoracique. Ceux-ci déforment la cavité pleurale ce qui a pour conséquence de déformer le volume des poumons. Si le volume des poumons augmente, l'air peut entrer dans les poumons.

Fait expérimental :

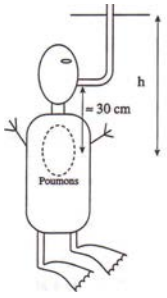
- Lorsque la pression extérieure dépasse la pression des poumons d'environ **85 mm Hg**, les muscles ne sont plus assez forts pour augmenter le volume des poumons (extension des poumons) et le sujet ne peut plus respirer, car **l'air ne peut plus entrer**.
- Lorsque la pression des poumons dépasse la pression extérieure d'environ **85 mm Hg**, les muscles ne sont pas assez forts pour diminuer le volume des poumons (compression des poumons) et le sujet ne peut plus respirer, car **l'air ne peut plus sortir**.

Plongée avec tuba

La pression de l'air respiré en plongée avec tuba est toujours égale à la **pression atmosphérique**, car le plongeur prend son **air** à la **surface de l'eau**. Ainsi, le plongeur est confronté à **respirer** de **l'air** dont la **pression est inférieure** à la **pression extérieure de l'eau** :

$$P_{poumon} = P_{air} = 760 \text{ mm Hg}$$
$$P_{eau} = P_{air} + \rho g h$$

Situation A : ***La profondeur critique*****.** Un plongeur effectue de la plongée sous-marine avec un tuba de 1,0 m de long. La distance entre sa bouche et ses poumons est de 30 cm. Le plongeur peut respirer si la différence de pression entre l'eau et la pression à l'intérieur de ses poumons est inférieure à 85 mm Hg. On désire déterminer si le plongeur peut respirer à cette profondeur.



Les poumons sont situés à la distance suivante de la surface :

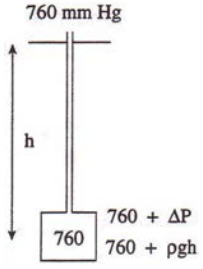
$$h = L_{tuba} + d_{poumon-bouche} = (1{,}0) + (0{,}3) = 1{,}3 \text{ m}$$

Évaluons notre différence de pression :

$$\Delta P = P_{eau} - P_{poumon} = (P_A + \rho g h) - (P_A) = \rho g h = (1000)(9{,}8)(1{,}3) = 12{,}7 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Nous pouvons évaluer rapidement la différence de pression en mm Hg :

$$\Delta P = 12700 \text{ Pa} = 12700 \text{ Pa} * \frac{1 \text{ mmHg}}{133 \text{ Pa}} = 95{,}5 \text{ mm Hg}$$



Puisque : $\Delta P = 95{,}5 \text{ mm Hg} > 85 \text{ mm Hg}$

Le plongeur ne peut pas respirer. Pour respirer confortablement, il faut que la différence de pression soit inférieure à environ 40 mm Hg.

Plongée sous-marine avec bouteille

Pour effectuer de la plongée sous-marine à grande profondeur, il faut utiliser une technique plus sophistiquée que l'usage d'un tuba, car la pression externe exercée par l'eau augmente très rapidement en fonction de la profondeur.

Ex : 30 m de profondeur $(1\ \text{atm} = 101\ \text{kPa})$

$$P_{eau} = P_A + P_{gravitationnelle} = P_A + \rho\, g\, h = (101\times10^3) + (1000)(9{,}8)(30) = 395\ \text{kPa}$$

$$\Rightarrow \qquad P_{eau} = 3{,}91\ \text{atm}$$

Remarque : De façon approximative, on remarque que la pression de l'eau s'élève de 1 atm pour chaque tranche de 10 m de profondeur.

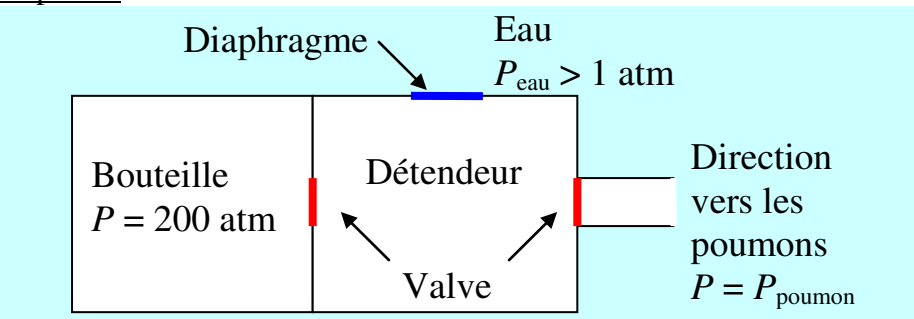
La bouteille d'air :

La bouteille d'air est un contenant métallique en forme de cylindre (plus résistant à la pression de l'air) contenant une grande quantité d'air causant une très grande pression sur son contenant. L'objectif de la bouteille est de **fournir l'air** au **plongeur** afin que celui-ci puisse **respirer**.

Le détendeur :

Le détendeur est une chambre de dépressurisation permettant à une petite quantité d'air contenu dans la bouteille d'atteindre une pression particulière. L'objectif du détendeur est de **fournir l'air** au plongeur à la **pression de l'eau** (variable selon la profondeur) afin d'aider les muscles respiratoires à fonctionner normalement (comme à la surface).

Schéma simplifié :



Description :

Bouteille : Contenant pour l'air. Ce gaz est pressurisé à 200 atm environ.

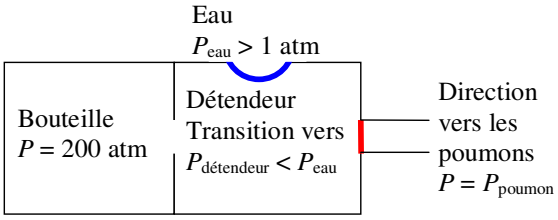
Valve : Porte fermée ou ouverte permettant le passage de l'air de la bouteille au détendeur et du détendeur aux poumons (**en rouge**).

Diaphragme : Membrane déformable contrôlant chaque valve (**en bleu**).

Fonctionnement de la bouteille et du détendeur :

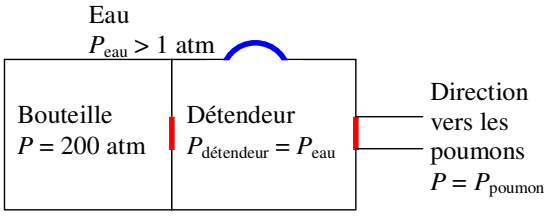
1) Remplir le détendeur d'air :

Action : Ouverture valve Bouteille-Détendeur.



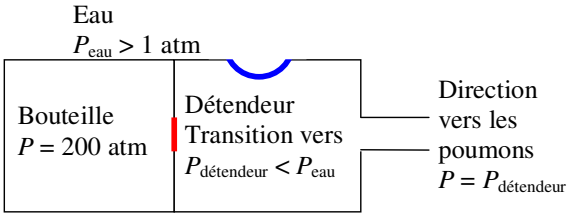
2) Détendeur rempli d'air à la pression extérieur :

Action : Fermeture valve Bouteille-Détendeur.



3) Vidage partiel du détendeur et respiration du plongeur :

Action : Ouverture valve Détendeur-Poumon.



Dangers de la plongée sous-marine :

Surpression pulmonaire : Si un plongeur remonte vers la surface sans libérer l'air de ses poumons, ceux-ci vont gonfler car la pression externe de l'eau diminue et les muscles respiratoires ne pourront pas supporter la pression à l'intérieur des poumons. Ceci peut occasionner la déchirure des poumons (pneumothorax).

Ivresse des profondeurs : Une trop grande quantité de gaz (O_2 et N_2) dans le sang affecte le système nerveux. Pour un mélange d'air normal (20% O_2 et 80% N_2), un plongeur est limité à une profondeur de 90 m. Avec un mélange composé de 2% O_2 et 98% He, les records de plongée oscillent autour de 500 m.

Remontée trop rapide : Formation de bulle de N_2 au cerveau ce qui peut causer une embolie cérébrale. Pour éviter ce problème, il faut remonter tranquillement en arrêtant à plusieurs paliers de décompression.

Exemple : vitesse maximum : 15 m/min (1h à une profondeur de 35 m)
palier #1 : 22 minutes à 6m
palier #2 : 50 minutes à 3m

Effet de la position sur la pression sanguine

À l'aide d'une canule et d'un manomètre en U, il est possible de mesurer la pression hydrostatique sanguine produite par le cœur (pression cardiaque moyenne). Cependant, cette pression n'est pas uniforme partout. Cela dépend de la position (verticale ou horizontale) de la personne. Cette **pression hydrostatique** est **influencée** par la **pression gravitationnelle**.

Exemple : Une personne de 1,80 m.

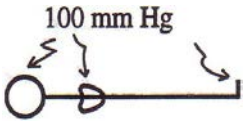
- Pression cardiaque de 100 mm Hg ($P_{coeur} = 100 \ \text{mm Hg}$).
- Distance de 0,45 m entre le Cœur et la Tête.
- Distance de 1,35 m entre le Cœur et les Pieds.

Nous avons les relations suivantes : ($g = 9{,}8 \ \text{N/kg}$)

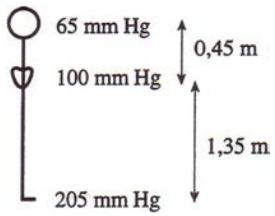
- $1 \ \text{mm Hg} = 133 \ \text{Pa}$
- $\Delta P_{1 \text{ cm}} = \rho \, g \, h_{1 \text{ cm}} = (1050)(9{,}8)(0{,}01) = 102{,}9 \ \text{Pa} = 0{,}77 \ \text{mm Hg}$

Position horizontale

La pression est uniforme.



Position verticale



$$P_{tête} = P_{coeur} - \Delta P_{45 \text{ cm}} = P_{coeur} - 45 \ \Delta P_{1 \text{ cm}} = (100) - 45 \ (0{,}77) = 65{,}35 \ \text{mm Hg}$$

$$P_{pieds} = P_{coeur} + \Delta P_{135 \text{ cm}} = P_{coeur} + 135 \ \Delta P_{1 \text{ cm}} = (100) + 135 \ (0{,}77) = 204{,}0 \ \text{mm Hg}$$

Situation : Que ce passe-t-il lorsqu'une personne passe de la position horizontale à la position verticale trop rapidement ?

Conséquences : **Réduction de la pression** au **niveau du cerveau** ce qui provoque des **étourdissements** et même un **évanouissement**. Cette réduction de pression au cerveau est causée par une accumulation de sang dans les membres inférieurs.

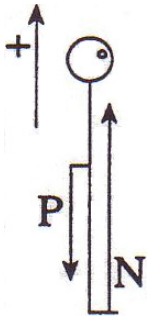
Solutions développées par le corps humain :

- Conscription des vaisseaux sanguins des membres inférieurs.
- Dilatation des vaisseaux sanguins du cerveau.
- Accélération du rythme cardiaque.
- Augmentation de l'activité musculaire au niveau des jambes pour réduire l'accumulation de sang.

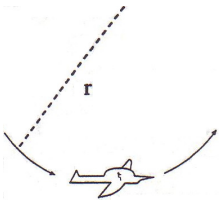
Pression et accélération

Lorsqu'un corps est en mouvement circulaire, le poids apparent est influencé par l'accélération centripète :

Exemple : Looping vers le bas, pilote en position verticale



2ième loi de Newton : $\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad \Rightarrow \quad \vec{n} + m\vec{g} = m\vec{a}$



$$\Rightarrow \quad n - mg = ma_C = m\frac{v^2}{r}$$

$$\Rightarrow \quad n = m\left(g + \frac{v^2}{r}\right)$$

On peut imposer la définition suivante à la force normale. Celle-ci nous donnera l'expression suivante pour l'accélération gravitationnelle :

$$n = m\,g' \quad \Rightarrow \quad g' = g + \frac{v^2}{r} \qquad (\textit{looping} \text{ vers le bas})$$

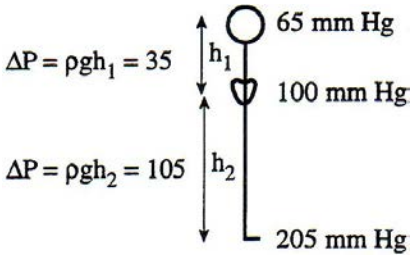
$$g' = g - \frac{v^2}{r} \qquad (\textit{looping} \text{ vers le haut})$$

Comparons la différence de pression entre le cœur et les pieds d'un pilote d'avion dans les deux situations suivantes : (g = 10 m/s^2)

Rappel : $P_{coeur} = 100 \text{ mm de Hg} \qquad h_1 = 0{,}45 \text{ m} \qquad h_2 = 1{,}35 \text{ m}$

Situation 1 : Trajectoire rectiligne ($r = \infty$) :

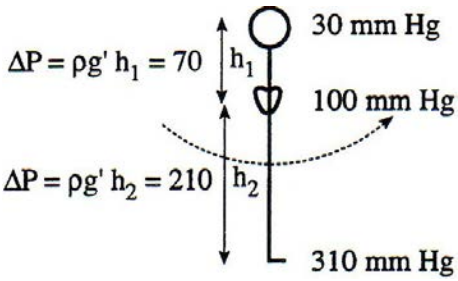
$$g'_1 = g + \frac{v_1^{\,2}}{r_2} = (10) + \frac{v_1^{\,2}}{(\infty)} = 10 \text{ m/s}^2$$



- La différence de pression est normale.

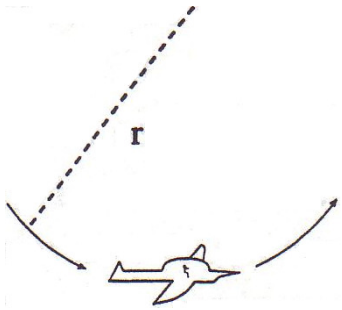
Situation 2 : Looping est le bas (v = 200 m/s et r = 4 km) :

$$g'_2 = g + \frac{v_2^{\,2}}{r_2} = (10) + \frac{(200)^2}{(4\times10^3)} = 20 \text{ m/s}^2$$



- La différence de pression a doublée.
- Baisse de pression au cerveau.

Chute de pression au cerveau



Problème :

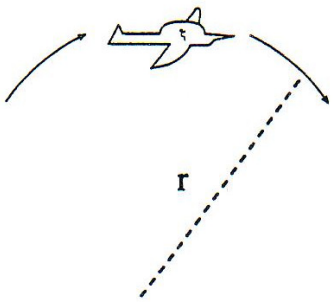
- Réduction de l'alimentation du cerveau en sang.
- Réduction de l'alimentation des yeux en sang.
- Perte de vision (« voile noir »).
- Évanouissement.
- Accumulation de sang au niveau des jambes.

Solution :

- Le pilote doit être assis.
- Porter une combinaison « anti-g » (combinaison serrant les jambes réduisant l'expansion des vaisseaux sanguins).

Conclusion : Un pilote de F18 (avion de chasse) peut supporter pendant quelques secondes une accélération gravitationnelle apparente de l'ordre de 10 g.

Hausse de pression au cerveau



Problème :

- Trop grande alimentation du cerveau en sang.
- Éclatement de petits vaisseaux sanguins du cerveau.
- Trop grande alimentation des yeux en sang.
- Saignement des paupières et du globe oculaire (« voile rouge »).

Solution :

- Aucune

Conclusion : Éviter cette situation.