

CODEP 38 apnée – MAJ Avril 2020

Support de cours - Apnéiste confirmé en eau libre

Philippe Péan – MEF2

www.apnealp.fr

La physique de l'ACEL

Pré-requis : Le cours « la physique du niveau 2 » constitue une approche qualitative des problématiques liées à la physique pour un apnéiste. Pour le niveau 3, on y ajoute l'aspect quantitatif : quelques lois physiques, et leur mise en application dans des exercices simples. Une bonne compréhension du cours de physique pour le N2 est donc un bon socle pour attaquer ce cours de physique N3 !

Note : pour les deux premières parties, quelques exercices d'application permettent de se tester sur le sujet. Le nombre d'étoiles (★ ★ ★) indique la difficulté. Un examen de niveau 3 contient des exercices de difficultés équivalentes à 2 étoiles. Les parties ne contenant pas d'exercices seront évaluées par le biais de questions simples sur le sujet concerné.

Sommaire :

1) La pression

Définition, Pressions partielles, Boyle-Mariotte . . .

2) La poussée d'Archimède

Enoncé, illustration, Le plomb de cou ...

3) Vision sous marine

Illusions d'optique.

4) Problèmes acoustiques

Propagation du son sous l'eau.

5) Correction des exercices

1) La Pression

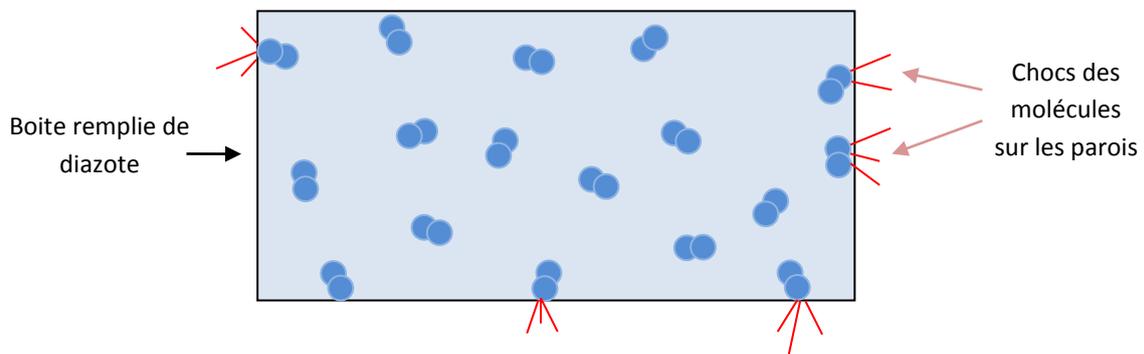
a) Définition

- La pression est une **Force** par unité de **surface**, exprimée en **Pascals**.

En règle générale, on utilise plusieurs autres unités, par exemple le **bar**. $1 \text{ bar} = 1013 \text{ hPa}$ = pression atmosphérique. (Au niveau de la mer) Il existe aussi le mm Hg (millimètre de mercure)

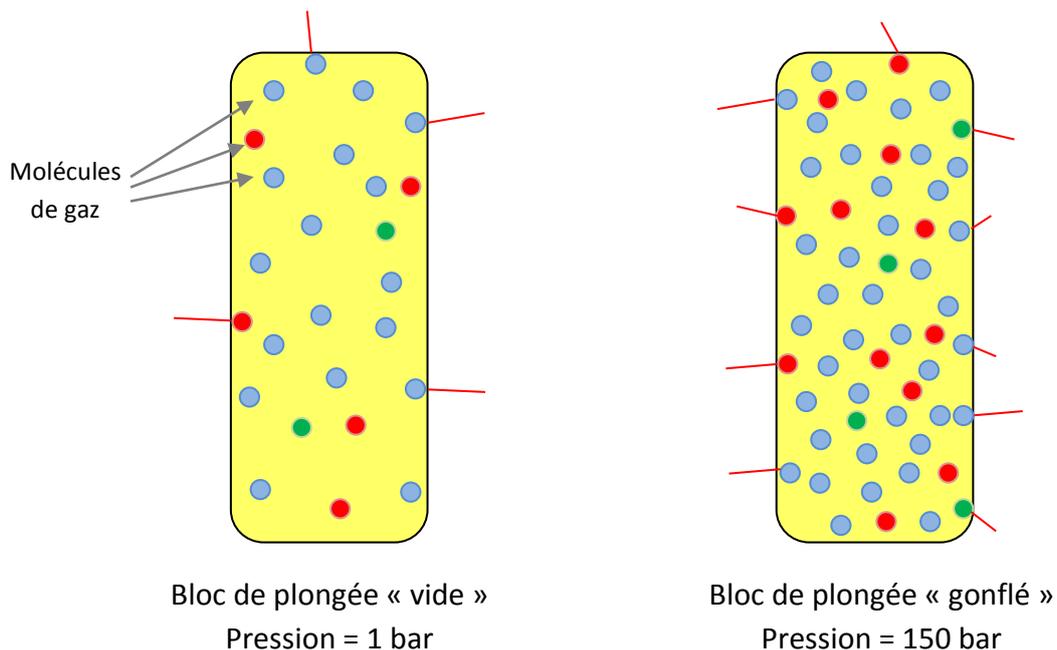
- Approche microscopique (pour la culture !) :

La pression est le résultat des chocs de toutes les molécules qui constituent un fluide sur les parois du récipient que le contient : (elles sont en mouvement permanent)



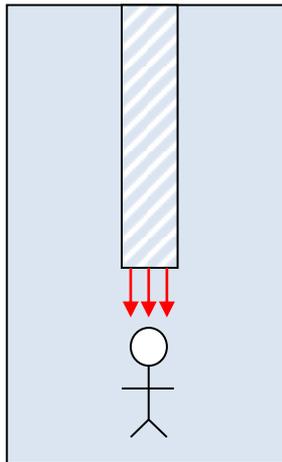
Plus il y a de chocs, plus la valeur de la pression est importante.

Lorsque l'on comprime de l'air dans une bouteille de plongée, on augmente la quantité de molécules à l'intérieur. Il y a donc plus de chocs qui se produisent contre les parois de la bouteille, et donc la pression augmente.



- La pression de l'eau **augmente** lorsque que l'on **descend** sous l'eau, mais **diminue** lorsqu'on **s'élève** en altitude. Par exemple à l'altitude où volent les gros avions, la pression est trop faible pour que l'être humain puisse respirer normalement. Il faut donc imposer une pression convenable dans la cabine = pressuriser cette dernière.

- En milieu sous marin, la pression peut être vue comme un effet du poids de l'eau qui se trouve au dessus d'une certaine profondeur :



Plus la profondeur est importante, plus il y a d'eau au dessus, plus la pression est grande.

- En milieu aérien, la pression peut également être vue comme l'effet du poids de l'air qui se trouve sur nos têtes. Ce poids étant bien sur très léger comparé à celui de l'eau, cela explique que la pression atmosphérique soit inférieure à la pression sous l'eau.

Plus l'altitude est importante, moins il y a d'air au dessus, moins la pression est grande.

- Effets ressentis par le corps humain : Essentiellement au niveau des **oreilles**.

Pourquoi donc ? Le son n'est ni plus ni moins qu'une variation de pression qui se propage dans l'espace. On parle d'onde sonore. Les oreilles sont donc conçues pour être sensibles aux variations de pression ! Passage dans un tunnel dans un train, plongée sous marine, conduite en montagne, toutes ces situations entraînent des **variations de pression** que l'on ressent dans nos oreilles . . .

b) Les variations de pression en chiffres

Sous l'eau : La pression **augmente** de 1 bar tous les 10m de descente.

En altitude : La pression **diminue** environ de 0.1 bar tous les 1000m d'ascension.

- Les variations de pression sont donc beaucoup plus perceptibles lorsque l'on plonge sous l'eau, que lorsqu'on grimpe en randonnée. . .

- On note qu'à -10m, la pression passe de 1 bar à 2 bars. Soit un doublement de sa valeur. C'est donc le moment de la descente où le corps va subir la plus importante variation de pression. Cette zone est donc importante pour le bon déroulement de l'apnée : il faut y **compenser les oreilles** de façon anticipée et répétée.

Sous l'eau, pour calculer la pression ambiante à une certaine profondeur z , on utilise la formule :

$$P(z) = P_{\text{atm}} + P_{\text{hydr}}$$

Avec z : profondeur en mètres, P_{atm} : Pression atmosphérique (1bar) et P_{hydr} : Pression hydrostatique (0.1 bar / mètre) .

On peut simplifier l'écriture : $P(z) = 1 + 0.1 * z$

Avec $P(z)$ en bar, et z en mètres de profondeur.

Par exemple, à -20m, $P(-20m) = 1 + 0.1 \times 20 = 1 + 2 = 3$ bars

c) Une pression . . . Partielle ?

Lorsqu'on s'intéresse aux gaz présents dans l'organisme humain, on parle souvent de « **pression partielle** ». Cette dernière traduit la **part de pression** liée à un composant d'un mélange gazeux.

On a la relation :

$$P(X) = \text{Fraction en X} * \text{Pression du mélange}$$

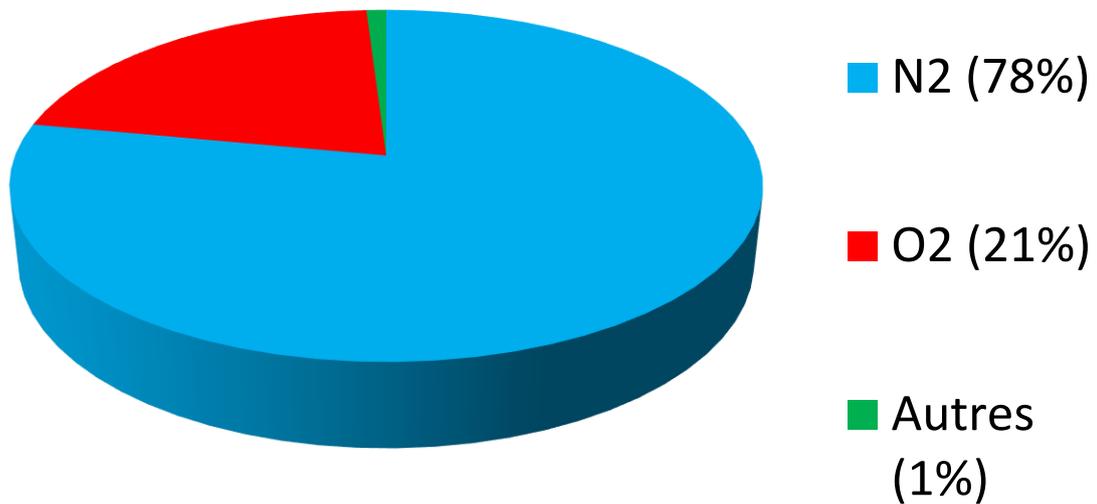
La pression partielle d'un composant X d'un mélange gazeux est égale à la fraction de ce mélange fois la pression totale du mélange.

La fraction en X peut s'interpréter comme le pourcentage de X dans le mélange.

Par exemple, dans l'atmosphère :

L'atmosphère terrestre est constituée à 78 % de diazote (formule chimique N_2), à 21 % de dioxygène (formule chimique O_2), et 1% de gaz rares (dont CO_2 et vapeur d'eau . . .)

L'air



On sait que la pression atmosphérique, c'est-à-dire de l'air, est de 1 bar.

La fraction de dioxygène est de 21 %. On a donc :

$$P(\text{O}_2) = 0.21 \times 1 = \mathbf{0.21 \text{ bar}}$$

La fraction de diazote est de 78 %. On a donc :

$$P(\text{N}_2) = 0.78 \times 1 = \mathbf{0.78 \text{ bar}}$$

Dans un bloc de plongée gonflé d'air à 200 bars :

$$P(\text{O}_2) = 0.21 \times 200 = 42 \text{ bars}$$

$$P(\text{N}_2) = 0.78 \times 200 = 156 \text{ bars}$$

d) La loi de Boyle - Mariotte

i) Enoncé (adapté)

Dans un système fermé rempli de gaz, on a, à tout instant, si la température est invariante, la relation :

$$\text{Pression} \times \text{Volume} = \text{Constante}$$

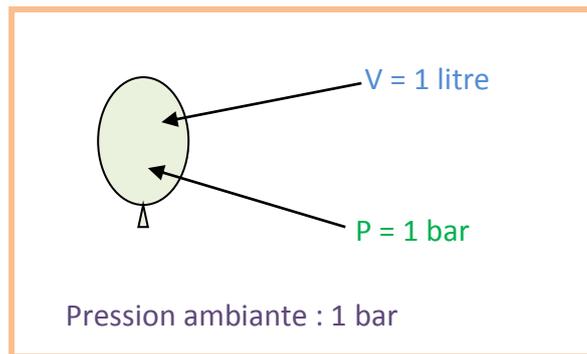
Que l'on note en général : $P \cdot V = \text{Cste}$

(Le « . » est équivalent à un signe « multiplié »)

ii) Exemple : le ballon de baudruche

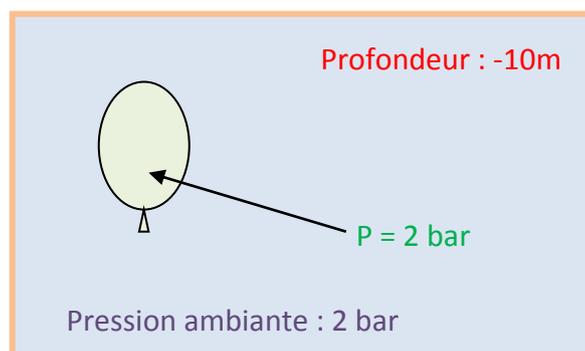
On considère un ballon de baudruche que l'on a gonflé à un volume d'1 litre. Le ballon est fermé par un nœud, pour éviter que l'air ne s'échappe. On a effectué le gonflement dans un environnement à pression ambiante (1bar).

On note P la pression dans ce ballon, et V le volume de ce ballon. On peut représenter le système comme suit :



Supposons maintenant que l'on plonge ce même ballon sous l'eau. On le descend à une profondeur de **10 mètres**. Comme vu précédemment, la pression ambiante va passer à une valeur de **2 bars**. Comme le ballon est déformable, la pression de l'air à l'intérieur du ballon va s'équilibrer avec celle de l'eau à l'extérieur du ballon.

On a donc la situation suivante :



En vertu de la loi de Boyle-Mariotte, **le produit P x V doit rester une constante**. Au début de l'expérience, le ballon gonflé à 1 bar, avait un volume de 1 litre. Ainsi donc, le produit P x V valait 1 bar x 1 litre = **1** .

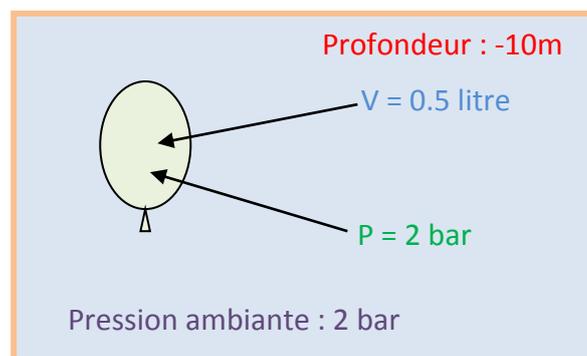
Maintenant que nous avons plongé notre ballon dans l'eau, la loi de Boyle Mariotte s'applique également. P x V doit garder cette même valeur de **1** . Or la pression dans le ballon est passée de 1 bar à 2 bars ! On a donc l'équation suivante :

$$P \times V = \mathbf{1} \text{ autrement dit, } 2 \text{ bars} \times V = \mathbf{1}$$

Que vaut donc V pour que cette équation soit vérifiée ? 0.5 litres bien sur ! On a alors :

$$P \times V = \mathbf{1} \text{ autrement dit, } 2 \text{ bars} \times 0.5 \text{ litres} = \mathbf{1}$$

Par conséquent le volume de notre ballon est passé de 1 litre à la surface à 0.5 litre à 10m de profondeur. Et il se passe exactement la même chose sur nos poumons lorsque l'on effectue une descente **en apnée** !



Si l'on avait monté notre ballon en altitude, le processus inverse se serait produit : Comme la pression de l'air **diminue** en altitude, la valeur de P aurait cette fois-ci **diminuée**, obligeant donc V à **augmenter** pour garder une valeur de P x V égale à **1**. Autrement dit, notre ballon aurait enflé !

c) Exercices d'application

Exercice 1 : ★

A pression atmosphérique, (altitude 0m) on gonfle un grand sac plastique de volume 15L avec de l'air. On le ferme bien, puis on plonge ensuite sous l'eau jusqu'à une profondeur de 15 mètres. Ensuite, on remonte à la surface, et on grimpe en altitude avec ce même ballon jusqu'à 2000m, au sommet d'une montagne.

Question A : Calculer le volume du sac une fois descendu sous l'eau.

Question B : Calculer le volume du sac une fois monté en altitude.

Exercice 2 : ★ ★

On utilise une gueuse freinée pour faire des descentes en no-limit. Pour remonter à la surface, il suffit de gonfler un parachute de plongée dont le volume est de 15 litres, avec une bouteille d'air comprimé de 12 litres embarquée sur la gueuse. Malheureusement la bouteille que l'on utilise aujourd'hui n'a pas de manomètre ! On sait juste qu'elle a été gonflée à 200 bars. On se demande combien de descente on peut réaliser, en étant sûr de pouvoir remonter. On considère par sécurité que l'on ne doit plus utiliser la bouteille quand il ne reste que 50 bars de pression dans la bouteille.

Question A : Au bout de combien de descentes à 30m doit on arrêter la pratique ?

Question B : Que se passerait-il à la remontée, si l'on venait à fermer hermétiquement le parachute une fois rempli ?

Exercice 3 : ★ ★

Un apnéiste, peu au courant des règles de sécurité, s'amuse avec un ami plongeur bouteille. Ils se mettent d'accord pour que le plongeur bouteille donne de temps en temps de l'air à l'apnéiste, quand ce dernier a envie de respirer. On considère que la capacité pulmonaire de l'apnéiste est de 7 litres.

Note : en plongée scaphandre, le détendeur est un dispositif muni d'un embout buccal, et qui permet à un plongeur de respirer de l'air à **pression ambiante**. En conséquence, il respire de l'air à 2 bars à 10mètres, 7 bars à 60m . . .

Voici leur cheminement :

- 1) L'apnéiste gonfle ses poumons, le plongeur prend son détendeur en bouche.
- 2) Les deux plongent ensemble jusqu'à une profondeur de 30m.
- 3) L'apnéiste explore une grotte, et commence à manquer d'air.
- 4) Il saisit le détendeur de son camarade, expire et inspire une goulée d'air frais.
- 5) Il poursuit ensuite un banc de poissons jusqu'à une profondeur de 50m.

- 6) Voyant qu'il n'arrive pas à rattraper ces créatures marines, il se retourne vers son camarade et reprend son détendeur. (Expiration, inspiration)
- 7) Les deux zouaves décident de remonter à la surface.
- 8) L'apnéiste décide de retourner dans la grotte, mais cette fois-ci en inspirant au préalable (à la surface) dans le détendeur de son camarade.

Question A : A l'issue de l'étape 2, quelle est la valeur de la pression dans les poumons de l'apnéiste ? Quel est le volume de ses poumons ?

Question B : A l'issue de l'étape 4, quelle est la valeur de la pression dans les poumons de l'apnéiste ? Quel est le volume de ses poumons ?

Question C : A l'issue de l'étape 6, quelle est la valeur de la pression dans les poumons de l'apnéiste ? Quel est le volume de ses poumons ?

Question D : Quelle(s) précaution(s) doit prendre l'apnéiste en remontant à l'étape 7 ? Expliquez brièvement pourquoi.

Question E : Quelles sont les éventuelles différences entre les situations 8 et 3 ?

Note : ce genre de pratique est à déconseiller pour des raisons de sécurité que vous avez du mettre en lumière en résolvant cet exercice !

2) La poussée d'Archimède

a) Enoncé "brut" :

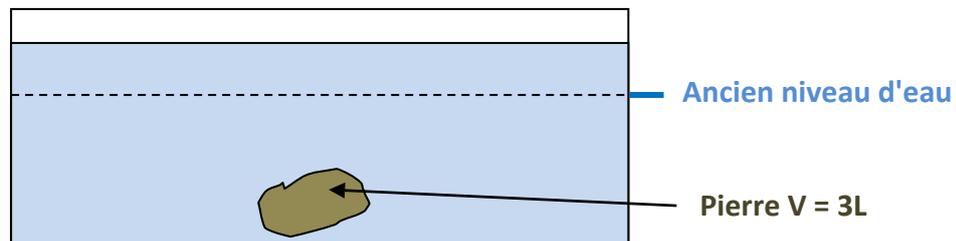
Tout corps plongé dans un fluide subit une force orientée vers le haut et égale à l'opposé du poids du volume de fluide déplacé.

b) Illustration

Considérons un aquarium rempli de 50 litres d'eau :



Dans lequel on plonge une pierre dont le volume est de 3 litres :

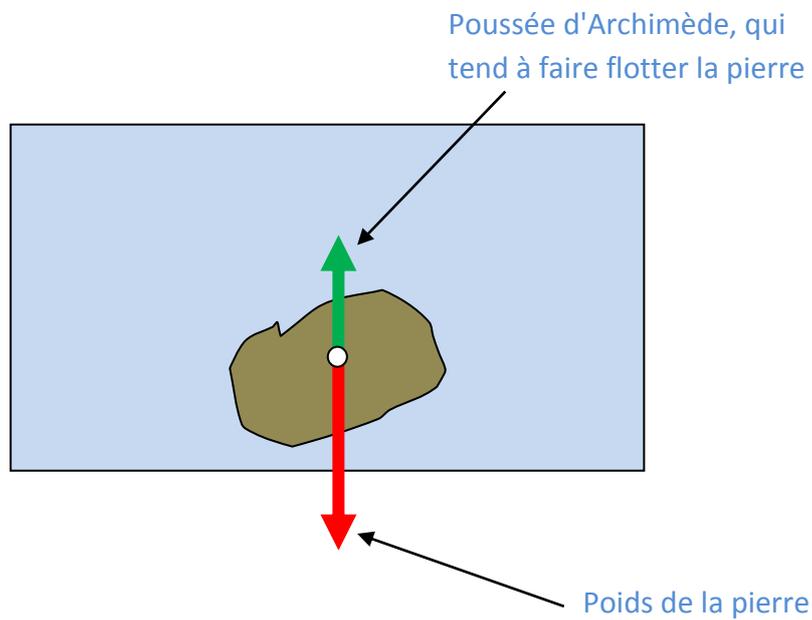


On constate bien entendu que le niveau de l'eau monte. On dit alors qu'un certain volume d'eau a été **déplacé**. Ce volume correspond tout simplement à la place qu'occupe la pierre : elle a chassé l'eau de cette zone.

La poussée d'Archimède dit simplement que la pierre va subir une force qui est l'opposée du poids de cette eau. On rappelle que le poids est une force que subit tout corps ayant une masse non nulle, et qui "l'attire" vers le sol.

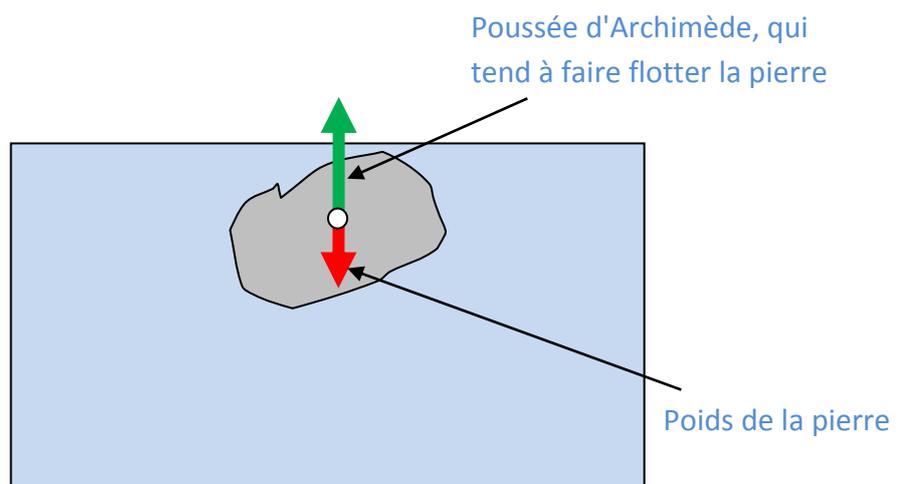
Et bien la même force va s'appliquer sur la pierre, mais orientée vers le ciel ! Cette force va donc avoir tendance à ramener la pierre vers la surface. Oui mais attendez . . . Une pierre dans l'eau ça ne remonte pas ! Alors la poussée d'Archimède elle marche plus ?

Si si, elle marche, mais en plus de cette force liée à la poussée d'Archimède qui s'applique sur la pierre, celle-ci subit également la force de son propre poids ! On peut représenter cela comme suit :



Ici on voit que le poids de la pierre est plus fort que la poussée d'Archimède. Résultat des courses : la pierre coule.

Si l'on considère maintenant une pierre ponce du même volume (3litres) : cette dernière est beaucoup plus légère.



La poussée d'Archimède qui ne dépend pas de la nature de la pierre, mais uniquement de son volume, n'est pas modifiée. Par contre le poids de la pierre lui est beaucoup plus petit. C'est la poussée d'Archimède qui est la plus forte, et la pierre flotte !

d) Pourquoi je flotte ?

L'être humain est en grand partie constitué d'eau, qui n'est a priori pas plus légère que l'eau dans laquelle nous baignons. Seulement il possède deux poumons, qui sont remplis d'air. Et cet air est très léger ! Ainsi donc, par rapport au volume d'eau que l'on **déplace** en se mettant à l'eau, le poids de notre corps est **moins important**.

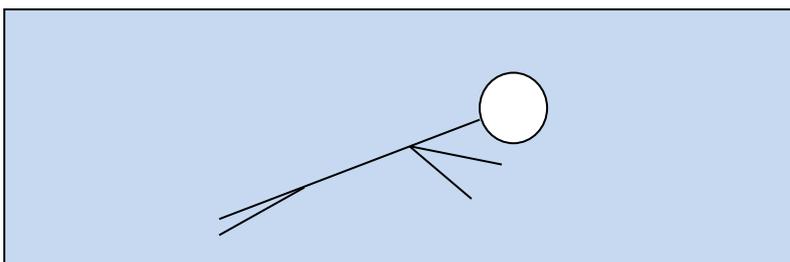
Plus les poumons sont gonflés, plus on déplace un **volume d'eau important**, plus la poussée d'Archimède est **grande**. Or lorsque l'on gonfle nos poumons, notre poids n'augmente quasiment pas. Donc, la poussée d'Archimède nous fait flotter.

Inversement, si l'on vide les poumons, on déplace un **volume d'eau moins important**, la poussée d'Archimède est donc plus **faible**. Notre poids ne diminue quasiment pas lorsque l'on vide l'air des poumons, résultat le corps est trop lourd et coule.

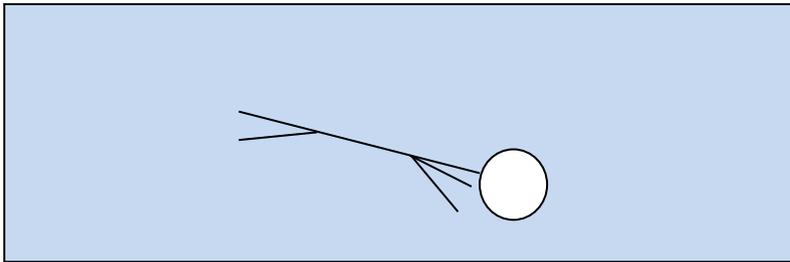
e) Qu'apporte un plomb de cou ?

En piscine, lorsque l'on nage au fond de la piscine, poumons pleins d'air, en vertu de la poussée d'Archimède, il existe une force qui tend à nous faire **remonter**. Pour pallier à ce problème, on se leste en accrochant plusieurs kilos de plombs à la ceinture.

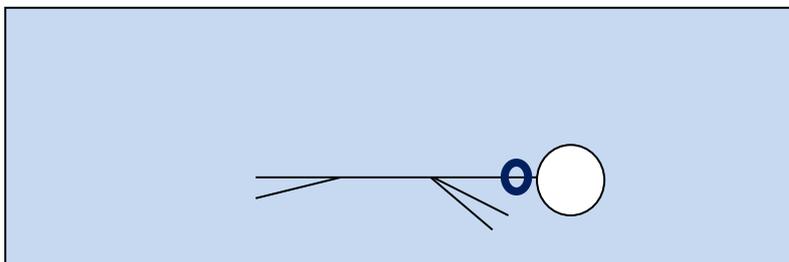
Le problème, c'est que la poussée d'Archimède est coriace ! Même si on est suffisamment lesté de plombs pour ne pas remonter à la surface, elle a tendance à tirer le haut du corps (là où se trouvent les poumons) vers la surface :



Pour compenser cet effet, les apnéiste ont inconsciemment tendance à **piquer du nez** vers le fond :



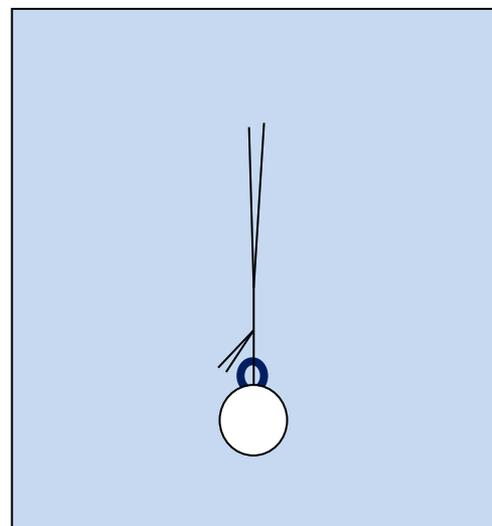
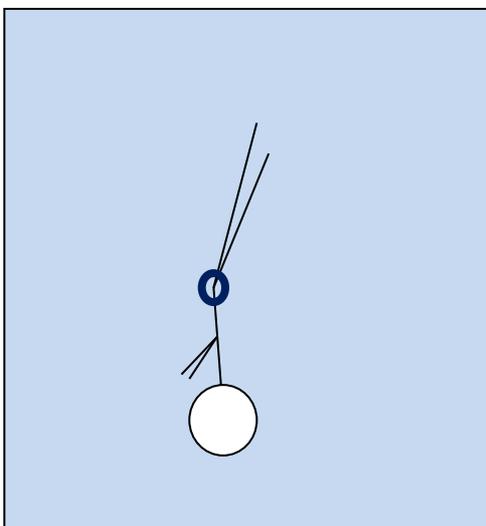
Porter un plomb de cou empêche la situation de la première figure de se produire. En effet, il **compense** efficacement la poussée d'Archimède, qui est forte près des poumons :



Au final, bien que cela puisse paraître paradoxal, un apnéiste qui nage la tête collée au fond, et les jambes en hauteur, peut utiliser un plomb de cou pour se stabiliser. Lors de la pratique de l'apnée en profondeur, (à la verticale) l'usage du plomb de cou peut aussi stabiliser l'apnéiste en descendant son centre de gravité.

Intérêt en profondeur :

Le plomb de cou utilisé en profondeur abaisse le centre de gravité de l'apnéiste. Ceci va augmenter sa stabilité verticale. (Principe du culbuto)



f) Exercices d'application

Exercice 1 : ★★

On prend une caisse en bois pesant 50kg et de contenance 1m³. (1000 litres) On la ferme hermétiquement, et on la jette dans une piscine.

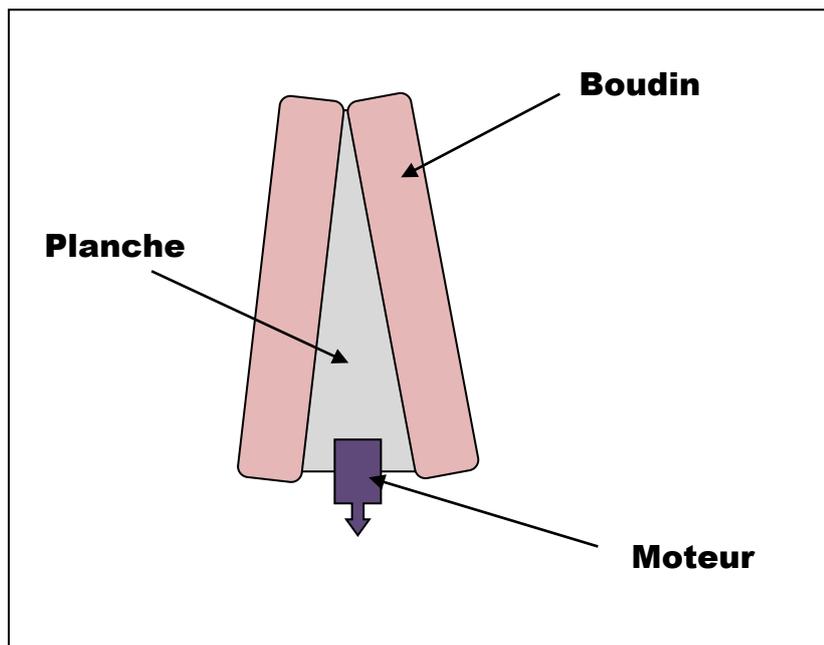
Question A : Expliquer brièvement pourquoi cette caisse flotte.

Question B : Combien de disques de fonte de 15kg chacun faut il placer dans la caisse pour que celle-ci coule au fond de la piscine ?

Exercice 2 : (hors programme A3) ★★★

On considère un petit bateau hors-bord constitué d'une planche rigide en fibres de verre pesant 30 kg, et de 2 boudins latéraux, chacun pesant 5kg et pouvant contenir 200 litres d'air. Le zodiaque possède aussi un moteur pesant 20 kg (essence comprise).

Schéma :



Question A : Combien de personnes pesant 80kg peuvent monter à bord sans faire couler le bateau si un seul boudin est gonflé ?

Question B : Les deux boudins sont maintenant gonflés, mais l'un d'entre eux fuit, à un rythme de 1 litre/minutes. 4 apnéistes pesant chacun 80 kg sont à bord. Combien d'apnéiste devra t il rester à bord du bateau, pour que ce dernier ne coule pas, une fois le boudin dégonflé entièrement ? Au bout de combien de temps le 1^{er} devra t il sauter à l'eau pour ne pas faire couler le bateau ? Donner les durées au bout desquelles les éventuels suivants devront se jeter à l'eau.

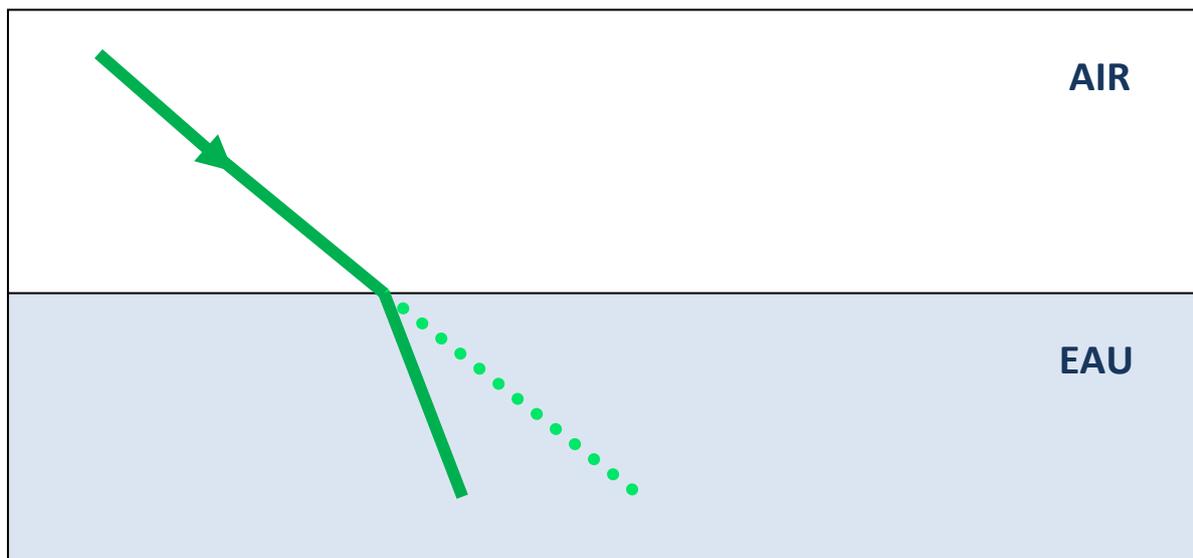
3) Vision sous marine

1) Conséquences de la loi de Snell-Descartes

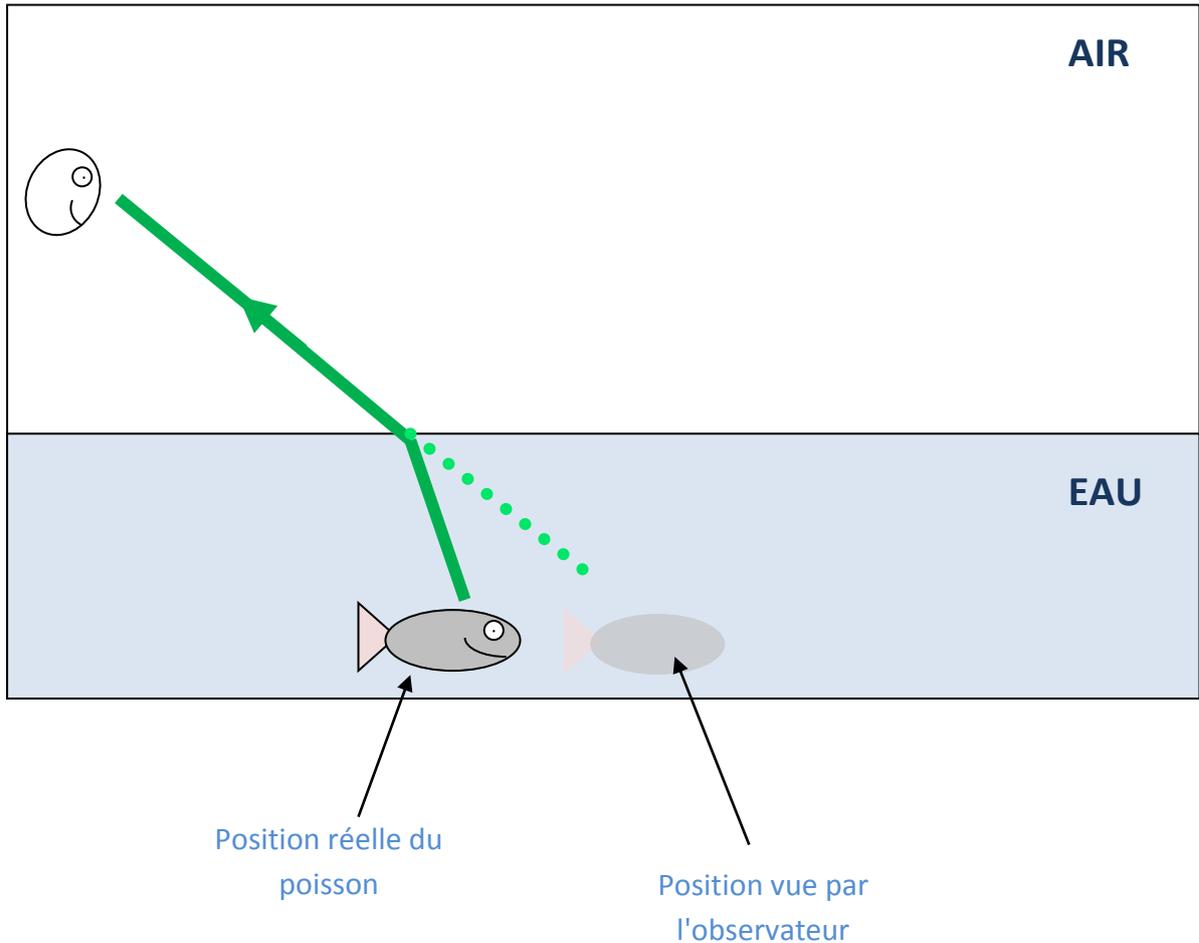
Nos yeux sont des **récepteurs de la lumière**. Ils interprètent tous les rayons lumineux qu'ils reçoivent, et les envoient au cerveau où une image est reconstituée. Ces rayons lumineux proviennent d'une source de lumière (par exemple le soleil), et peuvent être de différentes couleurs.

Ces rayons sont ensuite en partie **réfléchis** par les objets que nous voyons. Par exemple, un objet bleu ne renvoie que les rayons bleus, un objet blanc renvoie tous les rayons, un objet noir ne renvoie aucun rayon etc . . .

Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à l'autre, il est **dévié**. C'est-à-dire que sa trajectoire n'est plus droite, mais forme une **ligne brisée** :



Pour le cerveau, les rayons lumineux sont **toujours droits**. On peut donc avoir une idée erronée de la position d'un objet sous l'eau : (Sur la figure suivante, le rayon vert représente l'ensemble des rayons envoyés par le poisson)

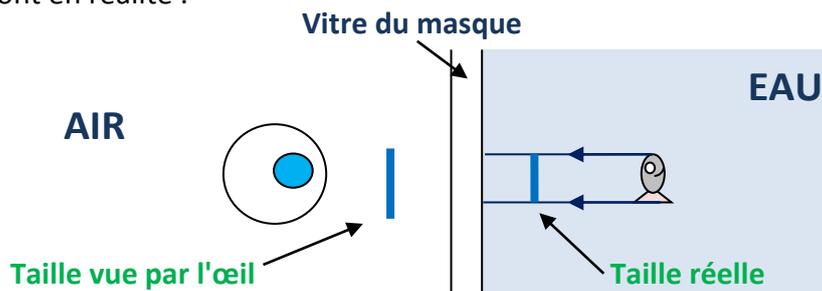


Ce phénomène se produit **toujours** au passage d'un milieu à un autre.

2) Application en apnée

Un observateur qui est sur le bord du bassin (dans l'air) ne **voit pas la position réelle** d'une personne sous l'eau. Méfiance donc lorsqu'une personne effectue une sécurité de surface...

On retrouve aussi ce phénomène au niveau du masque de plongée : Les rayons sont tout d'abord déviés à l'interface *eau-vitre du masque*, puis une nouvelle fois à l'interface *vitre du masque-air dans le masque*. Les objets que l'on voit nous paraissent **plus gros** qu'ils ne le sont en réalité :

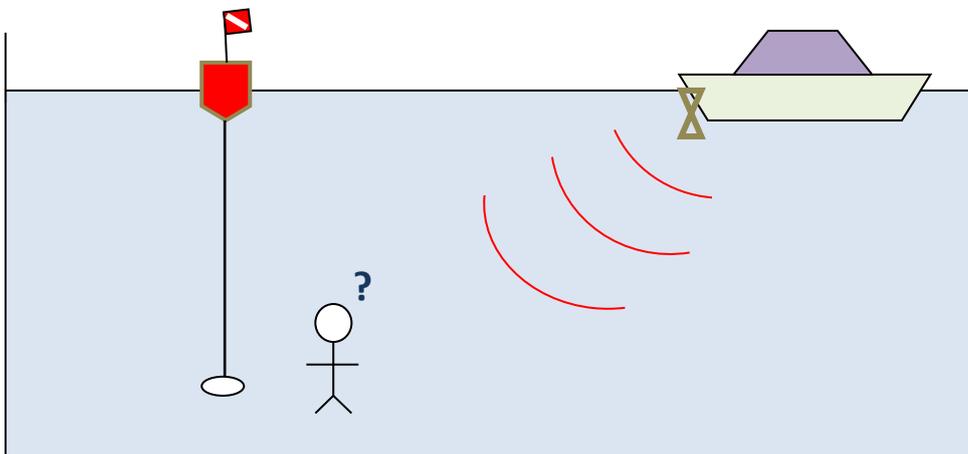


Dans l'eau, on peut retenir que l'on voit les objets aux **4/3 de leur taille réelle**, (Un objet grand de 30cm sera perçu comme mesurant 40 cm) et que l'on apprécie les distances aux **3/4 de leur valeur réelle**. (Un autre apnéiste situé à 4 m de nous semblera situé à 3m)

4) Problèmes acoustiques

Les ondes sonores se propagent **différemment** selon les milieux. Dans l'air, les sons se déplacent à 300m / secondes. Dans l'eau, les ondes sonores se propagent **beaucoup plus vite**. (De l'ordre de 1500 m / secondes) C'est en partie pour cette raison que l'on utilise les sonars dans les sous-marins, afin de détecter les bâtiments environnants.

L'un des principaux dangers de la mer pour les apnéistes, pendant une sortie, est la présence de bateaux dans les environs. Si les conducteurs ne sont pas attentifs à la signalisation normalement mise en place sur une zone de plongée (pavillon alpha...) ils peuvent blesser gravement les apnéistes en surface.



Note : la lumière se déplaçant à 300 000 km / secondes, cette dernière est beaucoup plus rapide que le son. Ceci explique le décalage entre la perception d'un éclair et du tonnerre pendant un orage. Ces deux phénomènes lumineux et acoustiques sont bel et bien produits en même temps, mais le son met plus de temps à nous parvenir que la lumière de l'éclair.

Pour des raisons chimiques, les ondes sonores de **plus hautes fréquences**, (c'est-à-dire plus aigues) sont **plus vite absorbées** dans l'eau que les ondes à **basses fréquences** (c'est-à-dire plus graves).

Un apnéiste entend donc parfaitement le bruit grave des moteurs d'un gros paquebot situé à quelques milles de là, alors qu'il ne peut entendre que **tardivement** le bruit aigu d'un moteur de jet-ski ou zodiaque qui s'approche.

Ces derniers étant le plus susceptibles d'être dangereux de par leur vitesse, il faut donc être **particulièrement attentif** aux sons de moteurs aigus lors d'une remontée. Pour un humain, il est **très difficile** de déterminer avec précision de quelle direction vient un tel son. Il ne faut donc **jamais s'éloigner du câble** lors d'une remontée en mer.

5) Correction des exercices

Partie 1 : la Pression

Exercice 1

A l'altitude 0 mètre, on gonfle notre sac. Il a donc volume de 15 litres, et la pression à l'intérieur vaut 1 bar.

- **A)** A -15m, la pression de l'eau vaut $1 + 15 \times 0.1 = 1 + 1.5 = 2.5$ bars. (augmentation de la pression de 0.1bar / mètres)

En appliquant la loi de Mariotte, on a :

$$P.V (\text{Surface}) = P.V (-15\text{m})$$

En remplaçant, on a :

$$1 \times 15 = 2.5 \times V \Leftrightarrow 15 = 2.5 \times V$$

Soit $V = 15 / 2.5 = 6$ litres.

- **B)** A +2000m, la pression de l'air vaut $1 - 0.1 \times 2 = 0.8$ bars.

En appliquant la loi de Mariotte, on a :

$$P.V (0\text{m}) = P.V (2000\text{m})$$

En remplaçant, on a :

$$1 \times 15 = 0.8 \times V \Leftrightarrow 15 = 0.8 \times V$$

Soit $V = 15 / 0.8 = 18.75$ litres.

Remarque : si le sac n'est pas élastique, PANG ! Il va éclater. . .

Exercice 2

On va raisonner en termes de volume équivalent à pression atmosphérique. Au démarrage, on dispose d'un bloc de 12 l gonflé à 200 bars, soit $12 \times 200 = 2400$ litres d'air à pression 1bar. On se garde une marge de sécurité de 50 bars. $50 \times 12 = 600$ litres. On dispose donc de $2400 - 600 = 1800$ litres d'air pour nos descentes.

- **A)** A -30m, la pression de l'eau vaut $1 + 30 \times 0.1 = 1 + 3 = 4$ bars.

En appliquant la loi de Mariotte au parachute, on a :

$$P.V (-30\text{m}) = P.V(\text{Surface})$$

En remplaçant, on a :

$$4 \times 15 = 1 \times V \Leftrightarrow V = 4 \times 15 = 60 \text{ litres .}$$

1 remontée à la gueuse consomme donc **60 litres** d'air à pression atmosphérique.

On dispose de 1800 litres, on peut donc effectuer :

$$1800 / 60 = 30 \text{ descentes à la gueuse.}$$

- **B)** Pour les mêmes raisons que dans l'exercice 1, **PANG !**

Exercice3

- **A)** P = Pression ambiante = $1 + 3 = 4$ bars.

$$\text{Mariotte: } P.V (0\text{m}) = P.V (-30\text{m}) \Leftrightarrow 1 \times 7 = 4 \times V$$

$$\text{D'où } V = 7 / 4 = 1.75 \text{ litres. (*)}$$

- **B)** L'apnéiste gonfle ses poumons grâce au détendeur, donc à pression ambiante. $V = 7$ litres, $P = 4$ bars.

- **C)** A nouveau, il gonfle ses poumons à pression ambiante. $V = 7$ litres, $P = 1 + 5 = 6$ bars.

- **D)** Si l'apnéiste ne prend pas de précautions, Mariotte :

$$P.V(-50\text{m}) = P.V (\text{Surface}) \Leftrightarrow 4 \times 7 = 1 \times V$$

Soit $V = 28$ litres. => Les poumons auront **explosé** bien avant !

L'apnéiste doit **expirer** l'air dès le début de sa remontée. . .

- **E)** Aucune différence ! Le détendeur fournit de l'air à pression 1 bar à la surface.

(*) Il existe une limite à la valeur du volume pulmonaire, lié à leur emprisonnement dans la cage thoracique (limite haute) et à l'élasticité de cette dernière (limite basse).

Partie 2 : la poussée d'Archimède

Exercice 1

- **A)** Volume d'eau déplacé par la caisse : 1m^3 . Masse équivalente d'eau : **1000 kg**. ($1\text{m}^3 = 1000$ litres, 1 litre pèse 1 Kg) La caisse pèse 50kg, $50 < 1000$ donc la poussée d'Archimède est plus forte que le poids de la caisse. **Elle flotte.**
- **B)** Il manque $1000 - 50 = 950$ kg à la caisse pour la faire couler. On a des disques de 15kg chacun. $950 / 15 = 63.33$. Il faudra donc **64 disques** pour faire couler la caisse.

Exercice2

- A) Un seul boudin gonflé. Le volume de celui-ci est de 200litres. Il déplace 200l d'eau, soit 200kg. Le zodiaque pèse $30 + 2 \times 5 + 20 = 60$ Kg. Il flotte car $60 < 200$. Si une personne monte à bord, l'ensemble pèsera $60 + 80 = 140$ Kg. $140 < 200$ Le **zodiaque flottera toujours**. Une deuxième personne à bord donnerait une masse de 220 kg. $220 > 200 \Rightarrow$ **le zodiaque coulerait !**

- B) Initialement, les 2 boudins gonflés déplacent 400 l d'eau. La charge utile du zodiaque est donc de $400 - (30 + 2 \times 5 + 20) = 340$ Kg. 4 apnéistes à bord, soit 320 Kg. Il faudra qu'un premier apnéistes saute à l'eau quand la charge utile tombera à 320kg. Soit $340 - 320 = 20$ litres d'air en moins, soit **20 minutes**, car le boudin fuit à 1 litre par minutes.

Pour le 2^{ème} : il doit se jeter à l'eau lorsque la charge utile atteint $3 \times 80 = 240$ Kg. Soit $340 - 240 = 100$ litres d'air perdus. Soit **100 minutes**, c'est à dire **1 h 40**. Le 3^{ème} devra se jeter à l'eau quand la charge utile atteindra $2 \times 80 = 160$ Kg. Soit $340 - 160 = 180$ litres d'air perdus. Soit **180 minutes**, c'est-à-dire **3 heures**.

On a calculé en A qu'avec un boudin, 1 personne pouvait rester sur le bateau. Le dernier restera donc à bord !