

Prénom : ..... NOM : .....

C'est en août 1937, près de Toulon, que Jacques-Yves Cousteau s'initie à la plongée sous-marine. Son destin sera alors définitivement lié au monde aquatique.

« J'enfile mes palmes, simples palettes de caoutchouc. [...] J'ajuste mes lunettes sous-marines. Je me penche. Je plonge la tête dans l'eau. Les yeux grands ouverts, je vois clair et net. C'est une révélation. [...] J'ignore, en mettant le nez dans cet univers fabuleux, que je me précipite dans une succession de bonheurs et de problèmes qui durera 60 ans. »



© Marine nationale - Cephismer

Mais plonger n'est pas une chose si aisée ! Comme tout plongeur, Jacques-Yves Cousteau s'est heurté aux nombreuses contraintes qui interviennent dès que l'on cherche à descendre sous l'eau : deux d'entre elles sont la pression et la respiration sous l'eau.

## 1. Pression et plongée sous-marine

Lorsque l'on s'enfonce sous la surface de l'eau, la poussée d'Archimède tend à nous faire remonter et d'étranges forces agissent sur les plongeurs : les forces pressantes.



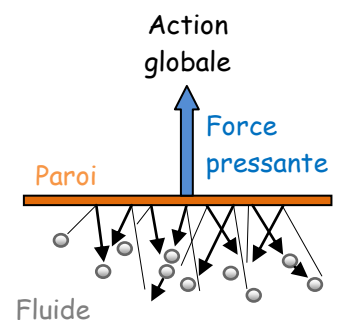
© Derek Keats

Si on note  $S$  l'aire de la surface pressée et  $F$  la valeur de la force pressante, alors la pression  $P$  correspond à l'ensemble de ces forces pressantes exercées par l'eau, par unité de surface.

Quelle relation semble exister entre les grandeurs  $P$  et  $S$  pour une même force pressante  $F$  ?

- $P = F / S$
- $P = S / F$
- $P = F \times S$

Pour vous aider : pensez à la différence de traces dans la neige entre des chaussures et des raquettes, ou dans du sable entre des baskets et des talons aiguille.



**Correction :** Le calcul de la pression utilise la formule :

$P =$

Selon les Unités du Système International :

$P$  = pression (en pascal - Pa)

$F$  = force (en newton - N)

$S$  = surface (en  $m^2$ )

Remarque : Le Système International des Unités de mesure de la pression est le newton par mètre carré ( $N.m^{-2}$ ), couramment appelé pascal (Pa) :  $1 Pa = 1 N.m^{-2}$ .

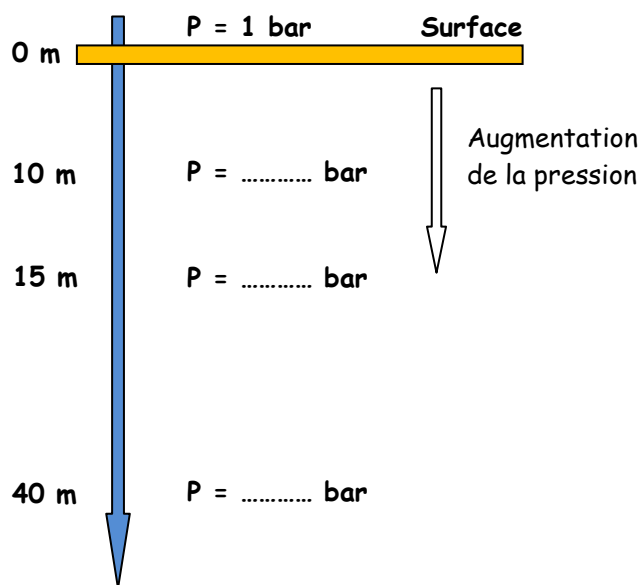
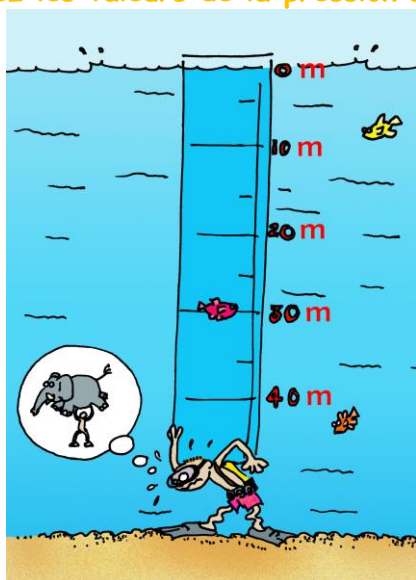
En plongée, on utilise le bar : 1 bar correspond à 100 000 Pa (soit  $10^5 Pa$ ).

Plus un plongeur descend, plus la colonne d'eau au-dessus pèse sur lui. Très vite, il ressent le changement de pression qui s'exerce : cette pression due à l'eau se ressent surtout au niveau des oreilles.

La pression est le facteur général déterminant qui a freiné le développement de l'exploration sous-marine.

La pression de l'eau s'élève donc avec la profondeur : elle augmente de 1 bar tous les 10 mètres. Cette pression s'ajoute à celle de l'air atmosphérique qui a une valeur de 1 bar à la surface de l'eau.

Complétez les valeurs de la pression sur le diagramme ci-dessous :



Archimède, bathyscaphe présent dans la Nef d'Accueil de La Cité de la Mer, est descendu en 1962 jusqu'à 9 545 m de profondeur, dans la fosse des Kouriles (au nord du Japon).

À quelle pression a-t-il dû résister (en bar et en Pa) ? Pour simplifier les calculs, on admettra qu'il est descendu à 10 000 m de profondeur.

.....  
.....

Calculez la force pressante s'exerçant alors sur la surface du hublot de  $0,25 m^2$ .

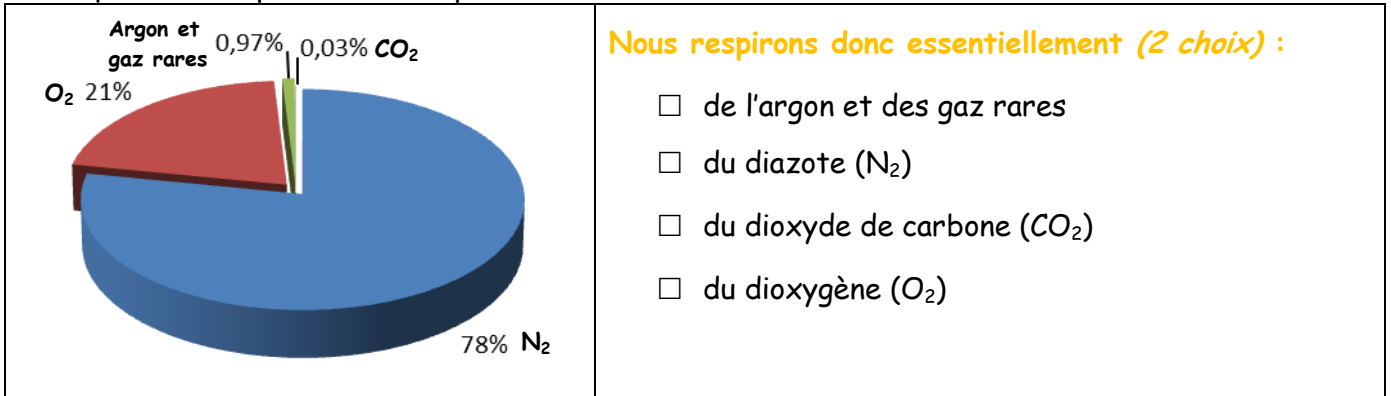
.....  
.....

Le saviez-vous ? Ce résultat correspond à environ 500 éléphants adultes ou 2 400 voitures posés sur le hublot ! C'est la raison pour laquelle les sous-marins sont construits avec des matériaux très résistants, capables de supporter l'énorme pression de l'eau à de grandes profondeurs.

Lorsque le plongeur descend en profondeur, quelques phénomènes physiques viennent le perturber : les oreilles se bouchent, les sinus sont douloureux... Si le plongeur ne réagit pas à ces problèmes et ne respecte pas certaines règles de sécurité, des accidents graves peuvent survenir. Certaines précautions doivent être prises.

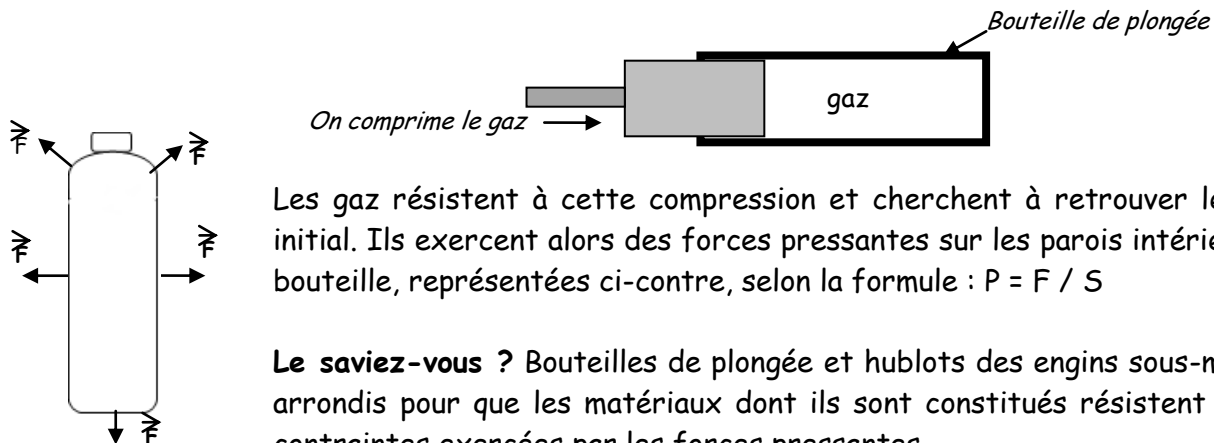
## 2. Respiration et plongée sous-marine

L'air que nous respirons est composé de :



### 2.1 La bouteille de plongée

La bouteille de plongée contient un mélange de gaz, dont du dioxygène et du diazote, qui permettra au plongeur de respirer sous l'eau. Pour stocker ces gaz dans la bouteille, en quantité suffisante, il est nécessaire de les comprimer, comme schématisé ci-dessous :



**Mais de quel volume d'air dispose le Commandant Cousteau dans sa bouteille de plongée ?**

Et bien tout dépend évidemment du volume d'air comprimé dans la bouteille mais aussi de la profondeur à laquelle il va plonger.

Appliquons la loi de **Boyle-Mariotte** dont l'étude expérimentale a permis d'établir que « ... à une température donnée et pour une quantité de gaz déterminée, le produit Pression x Volume est constant... », soit :

$$P \times V = \text{constante}$$

Prenons l'exemple d'un ballon rempli d'un volume d'air  $V = 0,5 \text{ L}$  à 10 m de profondeur. Les forces pressantes exercées par les gaz et celles exercées par l'eau s'équilibrent de part et d'autre de sa paroi déformable : c'est le volume qui change. La pression intérieure et la pression extérieure sont alors les mêmes !

La pression  $P$  à 10 m est de : ..... bar

Donc  $P \times V =$  .....

Lorsque le ballon remonte, la pression augmente / diminue. (Rayez la mauvaise réponse)

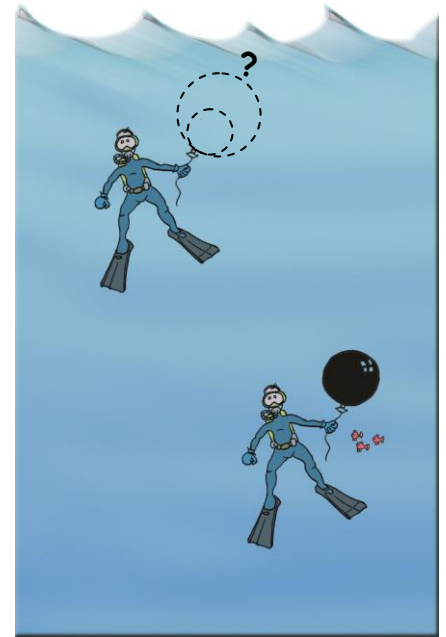
À 5 m de profondeur, la pression  $P'$  est de ..... bar

Calculez alors le volume  $V'$  du ballon à cette profondeur :

$P \times V = P' \times V'$  donc  $V' = P \times V / P'$  soit  $V' =$  ..... L

D'après ce calcul, lorsque le plongeur remonte, le volume du ballon va :

- augmenter
- diminuer



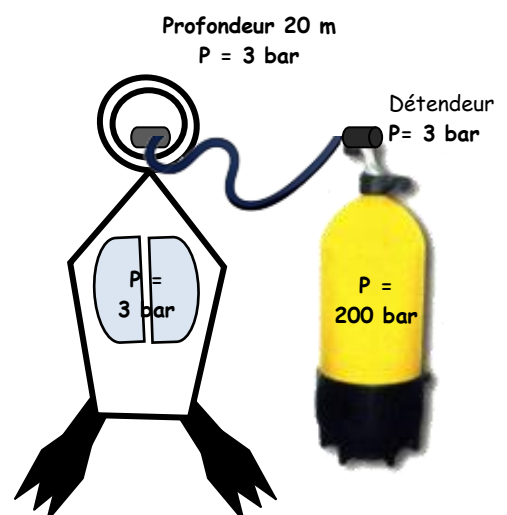
Oui... mais la bouteille de plongée est solide, elle ne change pas de volume !

## 2.2 Comment respirer sous l'eau avec une bouteille de plongée ?

Le corps du plongeur est constitué de beaucoup de liquides (sang, lymphe, eau dans les organes...) et des parties solides incompressibles (squelette). Mais en profondeur, la pression augmente, donc le volume d'air des poumons diminue sans que la quantité d'air ne change. Pour ne pas que ses poumons soient écrasés, le plongeur doit respirer l'air à la même pression que son environnement. Il est ainsi en équi-pression avec le milieu et son corps n'a pas de raison de se déformer.

Avec le détendeur mis au point par le Commandant Cousteau et Émile Gagnan en 1943, il n'y a plus de problème : la quantité de gaz envoyée dans les poumons est toujours adaptée à la pression environnante.

Le détendeur détend le gaz comprimé dans la bouteille et le délivre au plongeur à la pression du lieu où il se trouve.



Un des plongeurs de la *Calypso* (bateau de l'équipage du Commandant Cousteau) a une bouteille d'un volume  $V = 10$  L. Il la remplit avec de l'air à la pression de 200 bar. À 10 m de fond, de quel volume d'air  $V'$  dispose-t-il pour respirer ?

*N'oubliez pas que le plongeur doit respirer l'air à la même pression que celle de son environnement pour que sa cage thoracique ne soit pas comprimée.*

À 10 m de profondeur, le plongeur subit une pression  $P'$  de : ..... bar

Grâce au détendeur placé sur sa bouteille, il respire l'air à la pression de : ..... bar

D'après la loi de Boyle-Mariotte,  $P \times V$  en surface =  $P' \times V'$  à 10 m.

Donc  $V' = P \times V / P'$  soit  $V' =$  ..... L

Refaites le calcul à la profondeur de 25 m :

.....

.....

.....

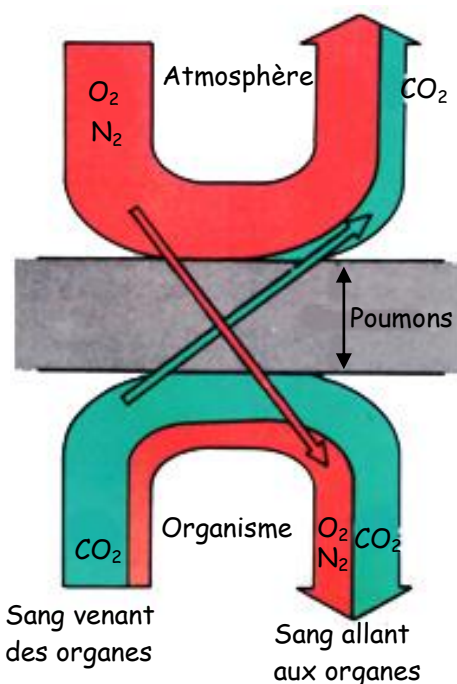
.....

**En conclusion :** Plus le plongeur plonge profond, moins le volume de gaz à sa disposition est ....., donc plus le temps de plongée sera .....

Pour certains, la plongée est un loisir, pour d'autres, un travail quotidien : réparations sur les plateformes pétrolières, les ponts, les barrages ou images sous-marines tournées pour l'élaboration de films ne peuvent être réalisées que par des plongeurs professionnels. **Mais que deviennent les gaz respirés par le plongeur ?**

### 2.3 Dissolution des gaz dans les liquides.

Lors de la respiration, la majorité des gaz inspirés par le plongeur vont dans les poumons et une partie de ces gaz va se dissoudre dans le sang.



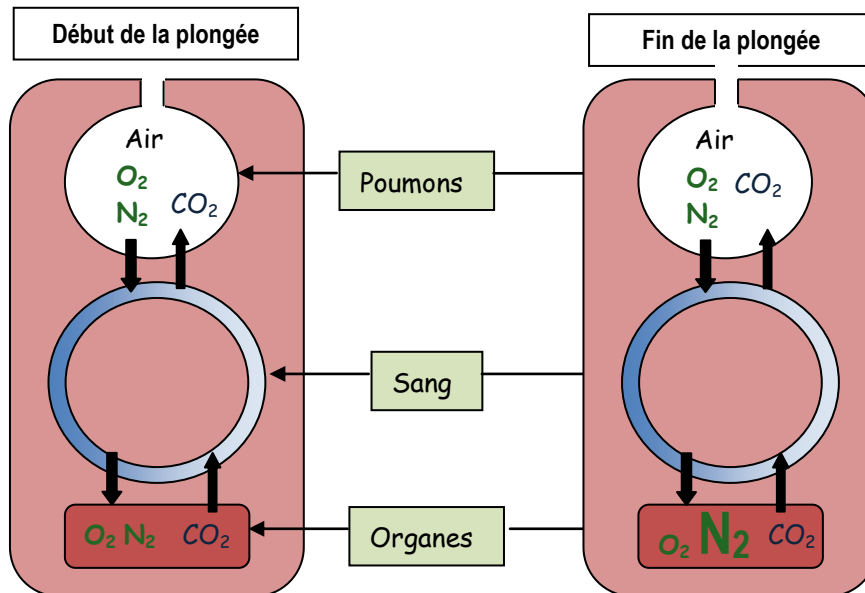
L'air de la bouteille est essentiellement constitué de dioxygène ( $O_2$ ) et de diazote ( $N_2$ ).

Plus le plongeur descend, plus la pression extérieure augmente. Or, **plus la pression augmente, plus les gaz deviennent solubles dans le sang.**

**Complétez le texte suivant :**

Plus le plongeur descend, plus la pression de l'air respiré ..... et donc la pression due au  $O_2$  et au  $N_2$  dans ses poumons ..... Davantage de gaz se dissolvent donc dans le ..... et les tissus.

Mais comme le plongeur réalise des efforts physiques, ses muscles et tout son organisme consomment le ..... dissous. Par contre, le ..... dissous, non consommé, s'accumule dans le sang et les tissus.



Quand le plongeur remonte, c'est l'inverse : les gaz deviennent moins solubles et reprennent leur forme gazeuse.

### Complétez le texte suivant :

Si la remontée du plongeur est lente et que ce dernier respecte des paliers de décompression, la pression des gaz dans les tissus et les poumons ..... lentement. Le  $N_2$  en supplément, dissous dans le sang et les tissus, est acheminé par la circulation sanguine vers les poumons où il peut alors être évacué progressivement.

Si la remontée du plongeur est trop rapide, le  $N_2$  en supplément, dissous du fait de la diminution de pression, va reprendre rapidement sa forme ..... : de petites bulles de gaz circulent dans le sang, obstruant les vaisseaux sanguins. De plus, en remontant, ces bulles deviennent de plus en plus ..... : les conséquences peuvent être mortelles !

Il est donc nécessaire de respecter les paliers de décompression et de bien souffler pour éliminer le  $N_2$  lors de la remontée.

### Que se passe-t-il si le plongeur ne vide pas suffisamment ses poumons ?

En plongée, les gaz contenus dans les poumons, les sinus, l'oreille interne... sont comprimés lors de la descente mais dilatés lors de la remontée. S'ils ne sont pas éliminés, ils peuvent provoquer des lésions graves.

Si un plongeur bloque sa respiration en remontant vers la surface, la pression diminuant, le volume d'air contenu dans ses organes creux va augmenter (loi de Boyle-Mariotte).

Considérons un plongeur qui remonte de 20 m de profondeur en bloquant sa respiration.  
Les poumons du plongeur contiennent en moyenne 5 L d'air.

**Pression subie par ses poumons à 20 m :** ..... bar

**Pression subie par ses poumons à la surface :** ..... bar

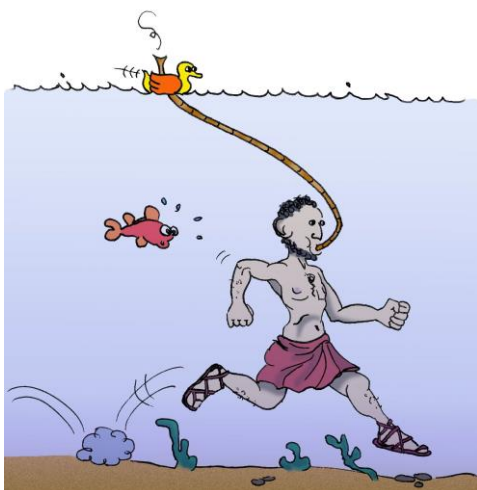
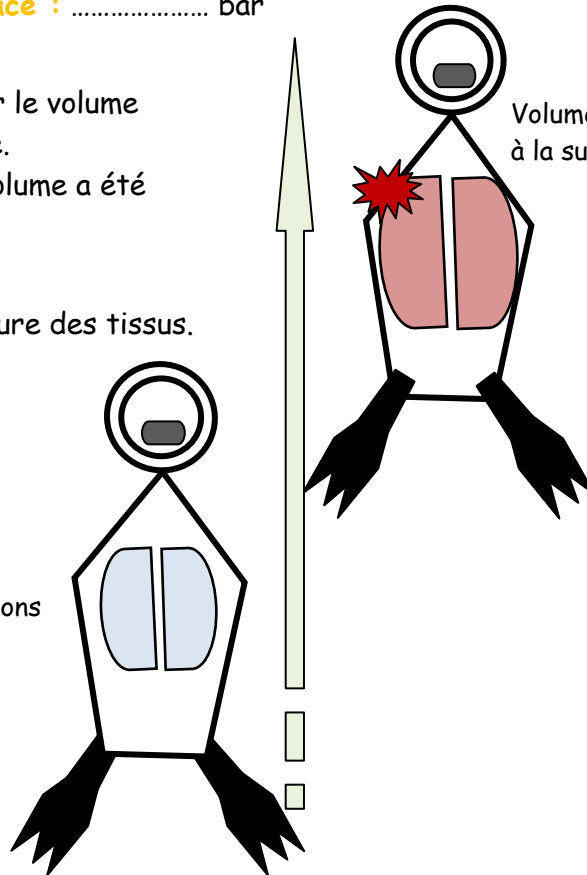
La loi de Boyle-Mariotte permet de calculer le volume occupé par l'air de ses poumons à la surface.

Puisque la pression a été divisée par 3, le volume a été multiplié par 3, **soit :** ..... L

Cette augmentation peut engendrer la rupture des tissus.

Volume des poumons à 20 m : ..... L

Volume des poumons à la surface : ..... L



**Un petit exercice de réflexion**

Léonard de Vinci, inventeur génial et touche-à-tout, n'a pas toujours eu que des bonnes idées ! Heureusement que son invention illustrée par le dessin ci-contre n'a jamais été testée : elle n'aurait jamais pu fonctionner. **Pouvez-vous expliquer pourquoi ?**

.....

.....

.....

.....

.....

.....