



PHYSIQUE

Guide de Palanquée – Niveau 4



Christophe Heidt
Hervé Boschian
29 Novembre 2023

Pourquoi de la Physique?

- **EPREUVE 12 – Aspects théoriques de l'activité : Coeff. 2**
- Cette épreuve est destinée à vérifier les connaissances théoriques du candidat dans des aspects utilisables dans la pratique habituelle de l'activité, en-dehors du matériel de plongée. Elle doit comporter au moins 3 problèmes différents et indépendants.

| Connaissances | Commentaires et évaluation |
|--------------------------|---|
| Flottabilité. | <ul style="list-style-type: none">- Notion de densité et de masse volumique- Notions de poids apparent, de poids réel et de poussée d'Archimède- Problèmes simples et en rapport avec la pratique : lestage des plongeurs, relevage d'objets utilisés dans la pratique de la plongée. |
| Compressibilité des gaz. | <ul style="list-style-type: none">- Consommation des plongeurs en surface et en immersion, conséquences pratiques. Se limiter à des problèmes dont les données chiffrées sont simples.- Influence de la température sur la pression des blocs.- La formule $PV = nRT$ et les calculs associés (Charles, Gay-Lussac) sont hors sujet. |
| Pressions partielles. | <ul style="list-style-type: none">- Limites de toxicité de l'oxygène et de l'azote en fonction de la profondeur.- Les mélanges autres que l'air n'ont pas à être traités. |
| Optique. | <ul style="list-style-type: none">- Description et conséquences pour le plongeur :<ul style="list-style-type: none">- De l'absorption des couleurs en fonction de la profondeur.- De la réflexion et de la réfraction des rayons lumineux dans l'eau en plongée diurne et nocturne. Pas de calculs ni d'utilisation de formules trigonométriques.- Du rétrécissement du champ de vision en immersion : conséquences.- Les explications peuvent être illustrées par des situations en lien avec l'activité de GP. |
| Acoustique. | <ul style="list-style-type: none">- Description et conséquences pour le plongeur des différences des vitesses de propagation du son dans l'air et dans l'eau.- Les explications peuvent être illustrées par des calculs simples. |

Pourquoi de la Physique?

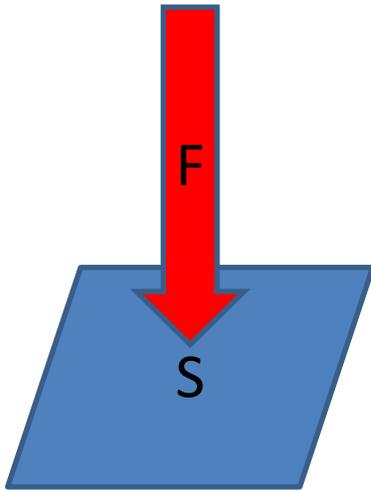
- En tant de GdP il faudra connaître, savoir se représenter et comprendre les phénomènes physiques pour appréhender les mécanismes fins:
 - de phénomènes physiologiques et prévention d'accidents (barotraumatismes, toxicité gaz, saturation/désaturation, . . .)
 - de la flottabilité des plongeurs de votre palanquée (immersion, équilibre, remontées, position dans l'eau, lestage. . .)
 - du fonctionnement du matériel (détendeur, compresseur, gilet, pression des blocs, ordinateur, . . .)
 - autonomie (consommation, . . .)

PRESSION

Définition :

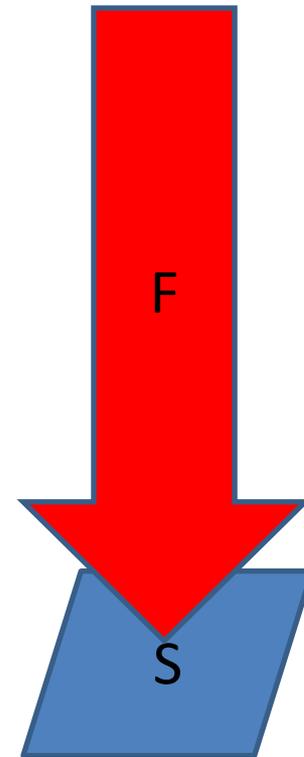
Quand une force s'exerce sur une surface il en résulte une pression.

$$P = F / S$$



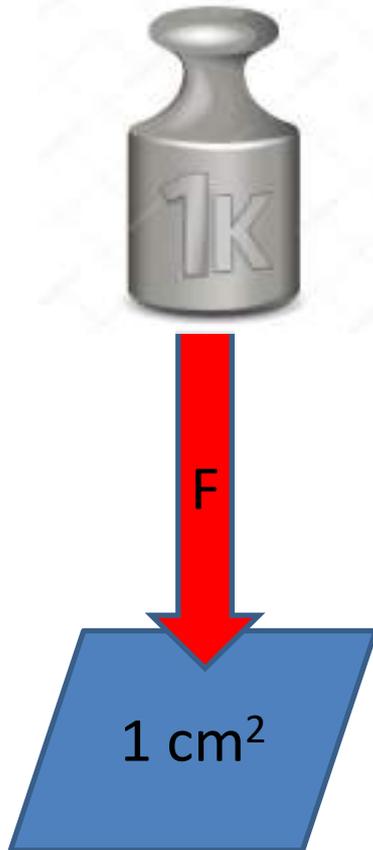
La pression est d'autant plus grande que :

- La force exercée est grande
- La surface est petite



PRESSION & Unités

- En plongée nous utilisons le **Bar** comme unité de pression.



$$1 \text{ Bar} = 1 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

Il existe d'autres grandeurs :

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ kg} / \text{cm}^2 = 760 \text{ mmHg} = 1000 \text{ hPa} = 1000 \text{ mbar}$$

PRESSION & Plongée

En plongée nous utilisons différentes pressions :

- La pression atmosphérique : Elle correspond au poids de l'air au dessus de nous.
- La pression hydrostatique : Elle correspond au poids de l'eau au dessus de nous.
- La pression absolue : Elle résulte des 2 pressions précédentes.

La pression hydrostatique:

Comme 1 colonne d'eau de 10m de haut sur 1 cm² = 1 kg

Il s'exerce 1 bar de pression d'eau (appelée pression hydrostatique) tous les 10m.

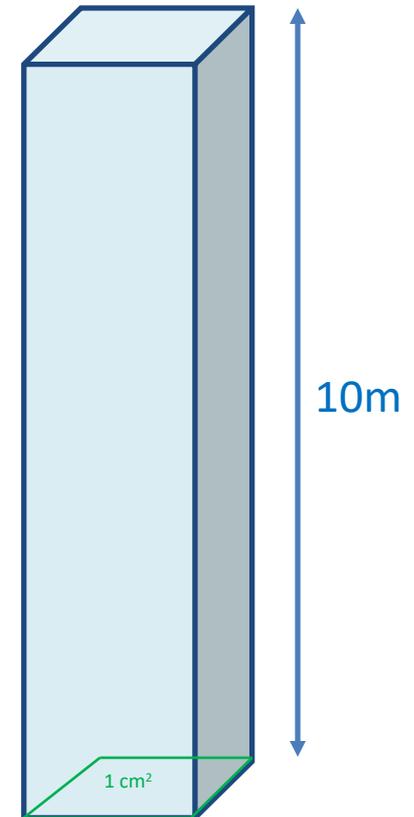
Formule :

$$\mathbf{Phydro = H / 10}$$

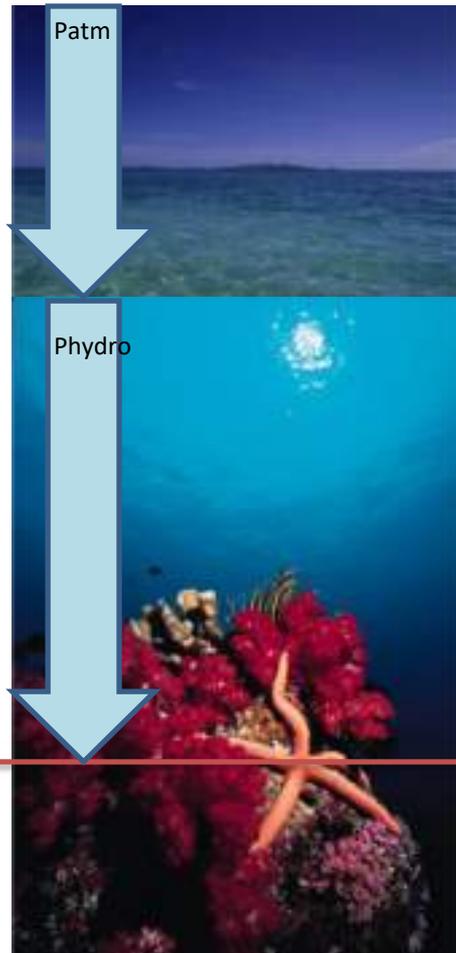
Avec H hauteur d'eau en mètres

Exemple : À 35 m la pression hydro est de 3,5 bars

$$\text{Calcul : } 35 / 10 = 3,5$$



PRESSION Absolue

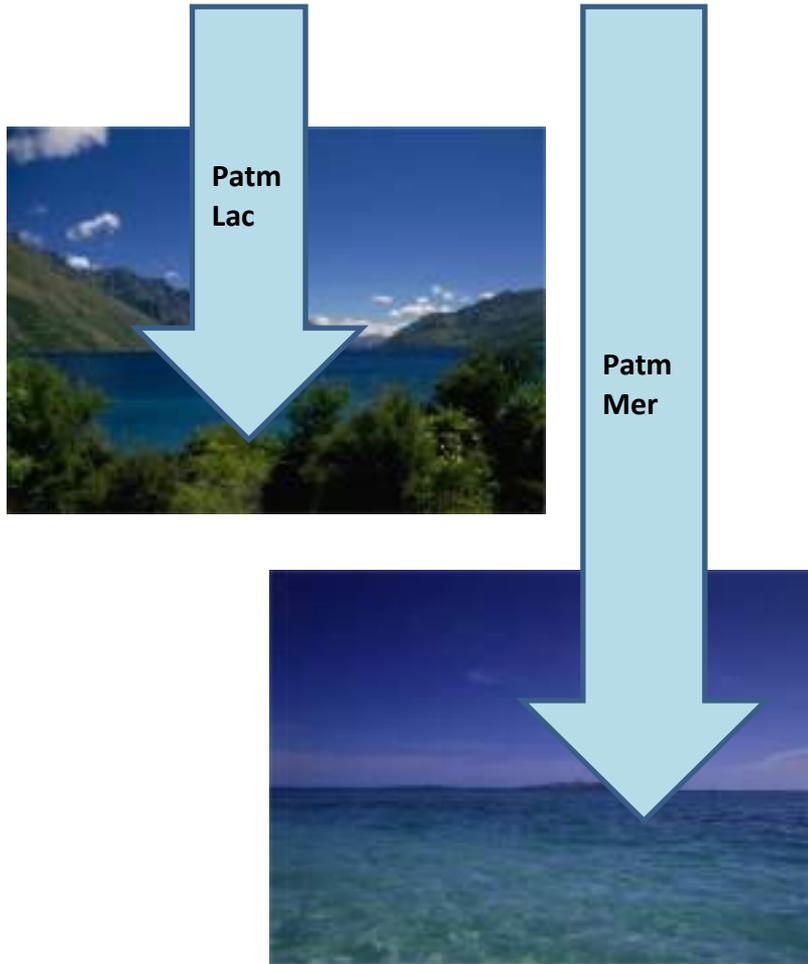


Il s'exerce sur l'étoile de mer une pression totale appelée pression absolue (P_{abs}) qui est égale à la somme de la pression atmosphérique et de la pression hydrostatique.

On considère que la pression atmosphérique au niveau de la mer est de :
 $P_{atm} = 1 \text{ bar}$

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{hydro}$$

PRESSION & Altitude



- En altitude la pression atmosphérique est plus petite qu'au niveau de la mer
- Pabs différente pour la même profondeur d'immersion.
- Lecture des instruments.
- Procédures de décompression différentes.

PRESSION & Altitude

EXERCICES

- 1) Un plongeur s'immerge à 37m en mer
 - a) Quelle est la pression hydrostatique à cette profondeur?
 - b) Quelle est la pression absolue à cette profondeur?
- 2) Un plongeur s'immerge à 37m dans un lac où la pression atmosphérique est de 608 mmHg
 - a) Convertissez la pression atmosphérique en bar.
 - b) Quelle est la pression absolue à cette profondeur?

• REPONSES

- 1) Un plongeur s'immerge à 37m en mer
 - a) $P_{\text{hydro}} = 37/10 = 3,7$ bars
 - b) $P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{hydro}} = 1 + 3,7 = 4,7$ bars
- 2) Un plongeur s'immerge à 37m dans un lac où la pression atmosphérique est de 608 mmHg
 - a) $P_{\text{atm}} = 608 / 760 = 0,8$ bar
 - b) $P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{hydro}} = 0,8 + 3,7 = 4,5$ bars

Consommation & Autonomie

En plongée l'air est délivré par le détendeur à la pression ambiante, donc à la pression absolue.

Plus nous plongeons profond plus notre consommation d'air sera importante, le temps de plongée sera donc plus court.

EXEMPLE :

Si à la surface je consomme 20 litres/minute, à 30 m la pression absolue étant de 4 bars

Je consommerai $20 \times 4 = 80$ litres/min,

Ma consommation est 4 fois plus importante.

Consommation & Autonomie

Exercice:

Pour une consommation estimée à 20 litres/min (estimé en surface), bloc de 15 l gonflé au départ à 200 bars et une réserve tarée à 50 bars, quelle sera l'autonomie pour une plongée à 45 mètres? (On néglige le temps de descente à cette profondeur)

REPONSE :

A 45 m, $P_{abs} = 5,5$ bars

consommation : $20 \times 5,5 = 110$ litres/min

volume d'air disponible : $P \times V = (200 - 50) \times 15 = 2250$ litres

autonomie :

C'est le temps qu'il me faudra pour consommer l'air à ma disposition

$2250 / 110 = 20$ min 27 sec

Boyle - Mariotte

À température constante, le volume occupé par un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il subit.

En clair :

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

$$P1 \times V1 = P2 \times V2$$

| | VOLUME | PRESSION | | P x V |
|--|-----------|----------|---|-------------|
| En Surface  | 10 litres | 1 bar |  | 10 x 1 = 10 |
| à 10m  | 5 litres | 2 bar |  | 5 x 2 = 10 |
| à 40m  | 2 litres | 5 bar |  | 2 x 5 = 10 |

Applications à la plongée :

- Accidents de plongée liés aux variations de volumes
- Stabilisation (utilisation du gilet)
- Gonflage des blocs
- Consommation d'air
- Certains types de profondimètres mécaniques

Boyle - Mariotte

Exercice 1

EXERCICE 1

- Un plongeur met 10 litres d'air dans son gilet à 30 mètres. S'il remonte à 10 m combien d'air devrait contenir le gilet ?

REPONSE :

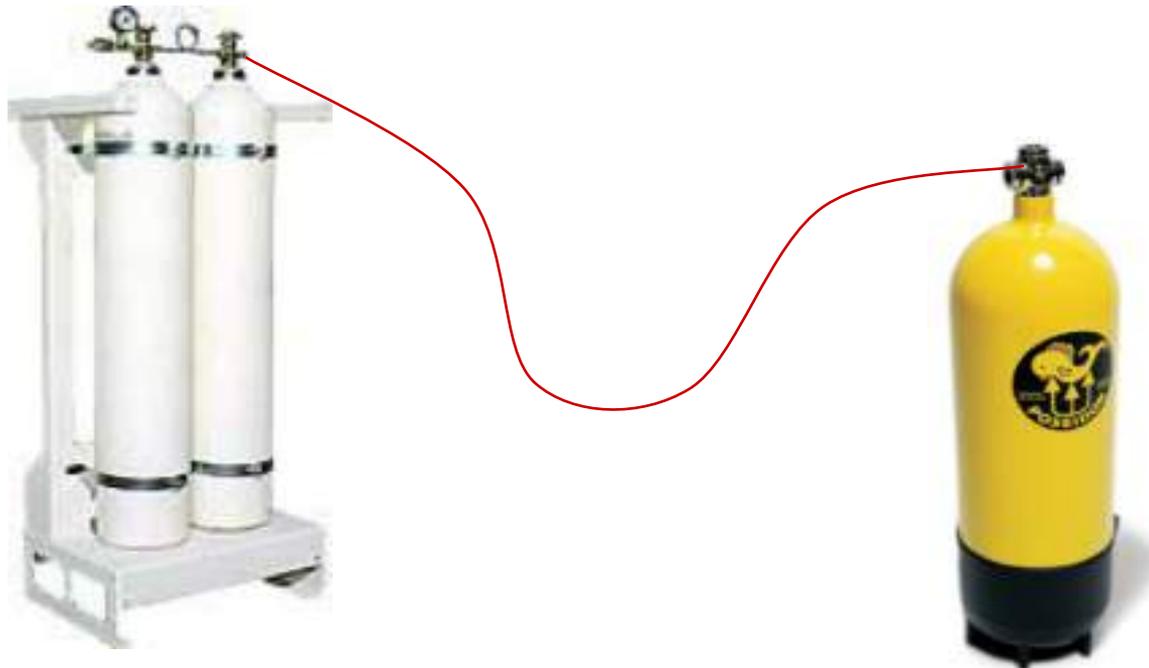
- $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$
- $P_1 = 4 \text{ b}$ (pression absolue à 30m) ; $P_2 = 2 \text{ b}$ (pression absolue à 10m); $V_1 = 10 \text{ l}$
- $4 \times 10 = 40 = 2 \times V_2$
- $\rightarrow V_2 = 40 / 2 = 20 \text{ l}$

Boyle - Mariotte

Exercice 2

EXERCICE 2

- On dispose de 2 blocs tampons de 50 l chacun, tous 2 gonflés à 200 bars.
- On veut gonfler un bloc de 10 l dans lequel la pression résiduel est de 20 bars.
- Quelle méthode utiliseriez-vous pour gonfler les blocs à pression maximale ?
 - 1) Gonflage sur les 2 tampons en même temps.
 - 2) Gonflage successif sur un tampon, puis l'autre.



Boyle - Mariotte

Exercice 2

REPONSE :

1) Les tampons gonflent en même temps le bloc.

Avec :

P1 pression de départ dans les tampons

P2 pression de départ dans le bloc

Pf pression finale (les tampons et le bloc sont à la même pression)

VT volume total des tampons soit 2 x 50 litres = 100 litres

- $P_1V_1 + P_2V_2 = P_fV_T + P_fV_2$
- $(200 \times 100) + (20 \times 10) = P_f(100 + 10)$
- $P_f = \frac{(200 \times 100) + (20 \times 10)}{(100 + 10)}$
- $P_f = 183,6 \text{ bars}$



Boyle - Mariotte

Exercice 2

REPONSE :

2) Le bloc est gonflé en 2 étapes.

1ère étape on gonfle le bloc sur le 1er bloc tampon.

- $P_1V_1 + P_2V_2 = P_fV_1 + P_fV_2$
- $(200 \times 50) + (20 \times 10) = P_f(50 + 10)$
- $P_f = \frac{(200 \times 50) + (20 \times 10)}{(50 + 10)}$
- $P_f = 170$ bars

2ème étape on continue de gonfler le bloc sur le 2ème bloc tampon.

- $P_1V_1 + P_fV_2 = P_fV_1 + P_fV_2$
- $(200 \times 50) + (170 \times 10) = P_f(50 + 10)$
- $P_f = \frac{(200 \times 50) + (170 \times 10)}{(50 + 10)}$
- $P_f = 195$ bars

La 2ème méthode est plus efficace que la première, le bloc étant plus gonflé (195 bars au lieu de 183,6 bars).

Loi de DALTON

« La pression totale exercée par un mélange de gaz est égale à la somme des pressions partielles (P_p) des constituants. »

En surface $P_{atm} = 1 \text{ bar}$

Nous respirons de l'air.

La composition de l'air est de: 21% d'oxygène, 79 % d'azote

Loi de DALTON

Nitrox

Mélange gazeux dans lequel on a augmenté le taux d'oxygène et abaissé le taux d'azote.

Un mélange gazeux comportant 32% d'O₂ et 68% de N₂ est donc un Nitrox

A la surface, on aura les pressions partielles suivantes:

$$P_{pO_2} = 32/100 = 0,32 \text{ bar}$$

$$P_{pN_2} = 68/100 = 0,68 \text{ bar}$$

Pression du Nitrox = $0,32 + 0,68 = 1 \text{ bar}$, soit la somme des pressions partielles

Ce sont des illustrations de la Loi de Dalton

Loi de DALTON

En immersion, en prenant l'exemple de la pression partielle d'O₂

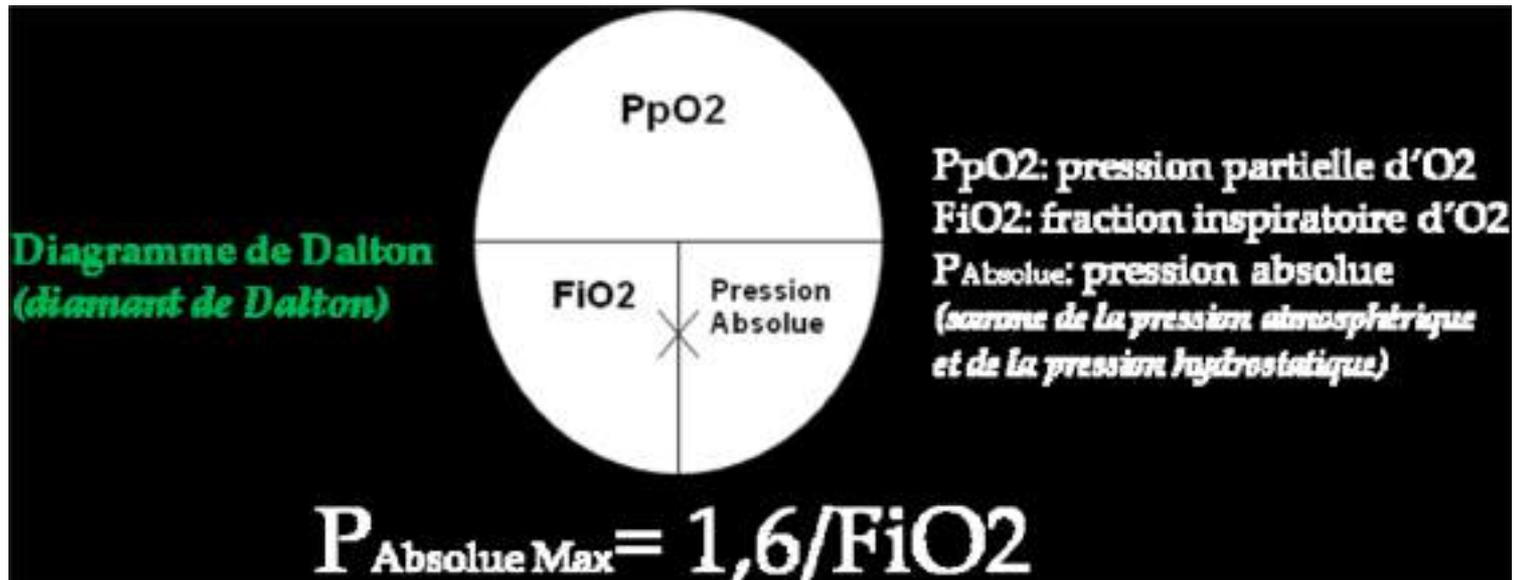
$$P_{pO_2} = F_{iO_2} \times P_{Absolue}$$

Avec :

P_{pO_2} : pression partielle d'O₂

F_{iO_2} : fraction inspiratoire d'O₂ (% du GAZ)

$P_{Absolue}$: pression absolue (somme de la pression atmosphérique et de la pression hydrostatique)



Loi de DALTON

Exemple d'application:

Vous disposez d'un Nitrox contenant 37% d'O₂, marquage bouteille « Nx37 »

- quelle sera la P_pO₂ que vous respirerez à 30m ?
- quelle sera la P_pN₂ que vous respirerez à 30m ?

Solutions:

Un Nx37 à 30m:

$$- P_{pO_2} = (37/100) * 4 = 1,48 \text{ bars}$$

Un Nx37 contient 100-37= 63% d'Azote (63/100)

$$P_{pN_2} = (63/100) * 4 = 2,52 \text{ bars}$$

$$P_{Abs} = 1,48 + 2,52 = 4 \text{ bars (soit 30m)}$$

Loi de DALTON -> Limitations

Lors d'une plongée à l'air, nous sommes limité à 60m!!!

Cette limite étant déterminée par la PpN₂ (narcose), qui ne doit pas dépasser $(80/100)*7 = 5,6$ bars (composition de l'air arrondie à 20/80)

En plongée loisirs FFESSM, la PpO₂ ne doit pas dépasser 1,6 bars, l'oxygène devenant toxique pour l'organisme au delà de cette limite.

Quelle est donc, de ce point de vue, la Profondeur Maximale d'Utilisation « PMU » de l'Air en plongée ?

L'Air est un Nx₂₁, PpO₂ maximum autorisé = 1,6 bars

$$1,6 = (21/100) * P_{Abs}$$

$$P_{Abs} = 1,6 / 0,21 = 7,6 \text{ bars soient } 66\text{m}$$

Loi de DALTON

Exemple d'application du diagramme de Dalton

Mon analyseur d'O₂ indique 39%

$$FiO_2 = 39/100=0,39$$

$$P_{\text{Absolue Max}} = 1,6/0,39 = 4,103 \text{ bars}$$

$$PMU = 31 \text{ mètres (31,03m avant arrondi)}$$

Loi de DALTON

Quelques exercices:

Bonnie analyse son bloc et lit 33% d'O₂ PMU ?

Clyde analyse son bloc et lit 37% d'O₂ PMU ?

Une sortie à la Gravière du Fort,

- sachant que la profondeur maximale est de 38m,

- quel est le % d'O₂ maximum que pourra contenir le Nitrox,
pour être certain que le seuil de 1,6 bars de PpO₂ ne pourra pas
être dépassé ?

Loi de DALTON

Solutions:

Bonnie: $P_{Abs} = 1,6 / (33/100) = 4,85$ bars PMU = 38m

Clyde: $P_{Abs} = 1,6 / (37/100) = 4,32$ bars PMU = 33m

Une sortie à la Gravière du fort,

- P_{Abs} à 38m = 4,8 bars

- $1,6 = FiO_2 * 4,8$

- utilisation du diagramme de Dalton

$FiO_2 = 1,6 / 4,8 = 0,333$ soient 33%

(arrondi dans le sens de la sécurité)

Instruments & Altitude

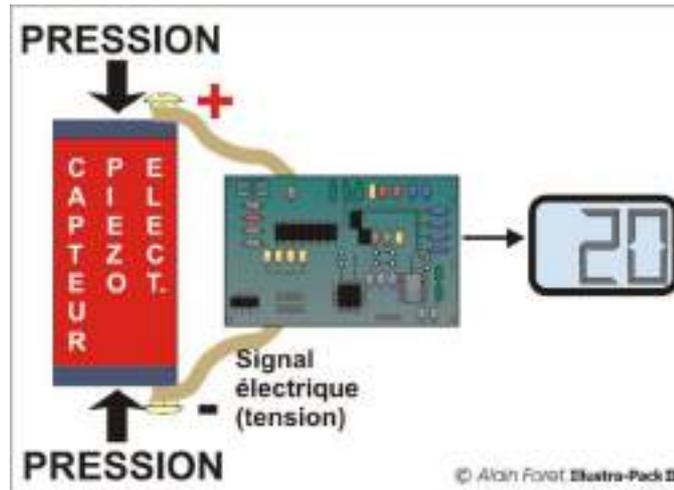
La profondeur affichée par les instruments peut varier selon la technologie utilisée.

Il existe 3 grandes familles d'appareils :

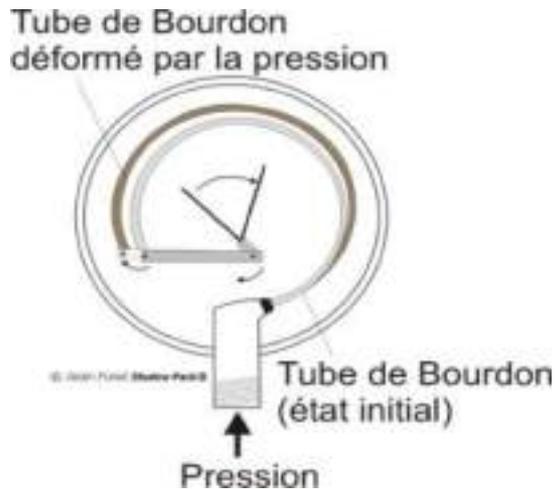
- Les appareils électroniques (profondimètres et ordinateurs)
- Les appareils mécanique (à tube de Bourdon)
- Les appareils à capillaire

LES APPAREILS ELECTRONIQUES:

Ils indiquent la profondeur réelle, selon les appareils il est parfois nécessaire de régler l'altitude à laquelle on se trouve avant de plonger.



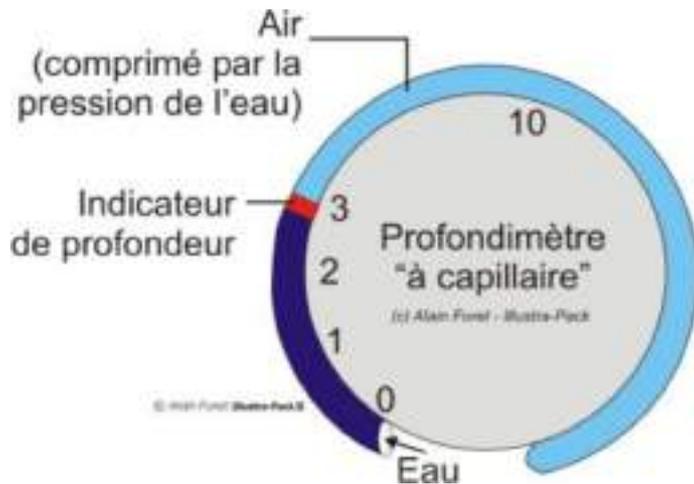
Instruments & Altitude



LES APPAREILS A TUBE DE BOURDON:

Un tube de Bourdon se déforme sous la pression subie, il suffit de rajouter un aiguille pour afficher la pression (manomètre) ou la profondeur (profondimètre).

- Les profondimètres de ce type sont étalonnés pour se déclencher au-delà d'un bar de pression, en altitude ils ont un « retard » correspondant à la différence entre 1bar et la pression atmosphérique.



LES PROFONDIMETRES A CAPILLAIRE:

Ces appareils contiennent de l'air à la pression atmosphérique dont le volume diminue quand la pression augmente (Mariotte).

Prévu pour fonctionner en mer, ils indiquent 10m quand la pression double, 20m quand elle triple. Or en altitude quand la pression double la profondeur atteinte n'est pas 10m.

Ces instruments n'indiquent pas la profondeur réelle mais la profondeur équivalente mer.

Instruments & Altitude

Démonstration :

Un plongeur s'immerge à 42,5 m dans un lac où la pression atmosphérique est de 646 mmHg

a) Convertissez la pression atmosphérique en bar.

b) Quelle profondeur indiquera son profondimètre s'il utilise :

- Un profondimètre électronique,
- Un profondimètre à tube de Bourdon,
- Un profondimètre à capillaire ?

REPOSE :

a) $P_{atm} = 646 / 760 = 0,85 \text{ bar}$

b) **Profondimètre électronique :**

Profondeur lue = profondeur réelle = 42,5 m

Profondimètre à tube de Bourdon :

Retard : $1 \text{ b} - 0,85 \text{ b} = 0,15 \text{ b}$

→ retard = 1,5 m

Profondeur lue = profondeur réelle - retard

= $42,5 \text{ m} - 1,5 \text{ m} = 41 \text{ m}$

Profondimètre à capillaire :

$P_{atm} = 0,85 \text{ b}$

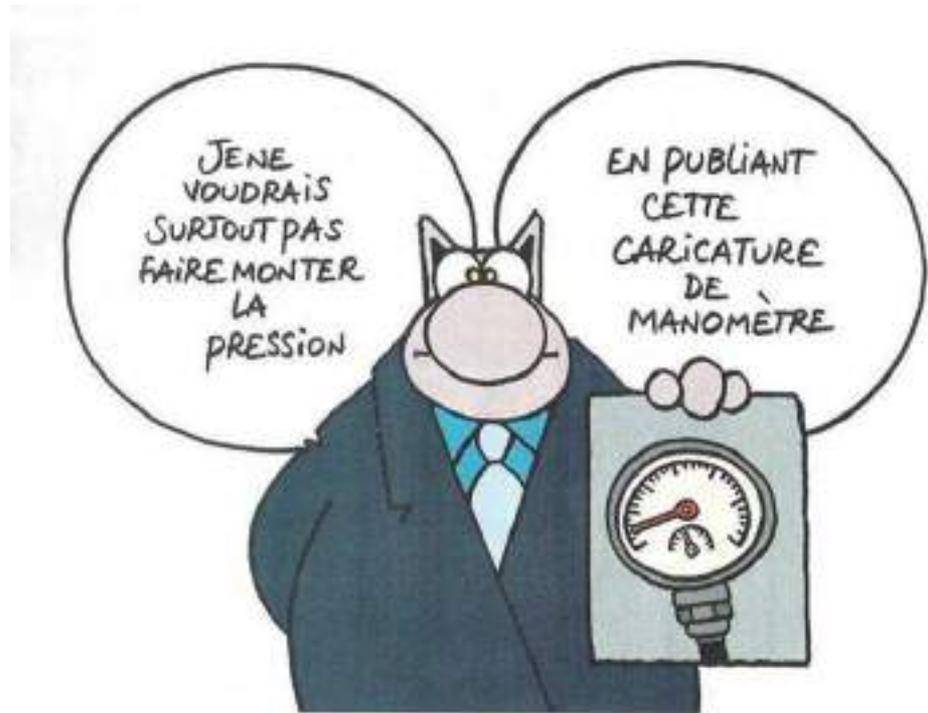
$P_{abs} = P_{atm} + P_{hydro} = 0,85 + 4,25$

$P_{abs} = 5,1 \text{ b}$

P_{abs} est 6 fois plus grande que P_{atm} ($5,1 / 0,85 = 6$)

Rapportée à la mer : $P_{abs} = 6 \times P_{atm} = 6 \times 1 = 6 \text{ bars}$

Profondeur mer = profondeur lue = 50 m



LOI DE CHARLES

À volume constant la pression d'un volume de gaz donné varie proportionnellement à la température.

$$P1 / T1 = P2 / T2$$

Avec :

P1 : pression initiale en bar

T1 : température initiale en Kelvin

P2 : pression finale en bar

T2 : température finale en Kelvin

0 K = -273° C 20° C = 293 K

LOI DE CHARLES

Quand est-il en plongée?

- Si la température varie alors la pression à l'intérieur d'un bloc variera. **Par conséquent le volume de gaz a disposition du plongeur dépendra de la température extérieure. (autonomie)**

- Si la pression augmente dans un bloc, la température du gaz augmente. **Un bloc chauffe quand on le gonfle.**

- Si la pression diminue dans un bloc la température du gaz diminue. **Un bloc se refroidit quand on le vide.**

Givrage des détendeurs (la détente d'un gaz produit du froid).

LOI DE CHARLES

Premier exercice:

- Après avoir été gonflé à 230 bars un bloc de 15l est à une température de 37°C.

Une fois rangé sa température redescend à 23,5°C.

- Quelle pression indiquera un manomètre quand un plongeur vérifiera le bloc avant de plonger ?

CLOI DE CHARLES

Réponse n°1 :

$$T1 = 273 + 37 = 310^\circ \text{ K}$$

$$T2 = 273 + 23,5 = 296,5^\circ \text{ K}$$

$$V1 = 15 \text{ litres}$$

$$P2 = (P1 \times T2) / T1$$

$$P2 = (230 \times 296,5) / 310$$

$$P2 = 220 \text{ bars}$$

LOI DE CHARLES

Deuxième exercice:

Après le gonflage de votre bouteille de plongée à 230 bars (pression absolue), la température du bloc est de 35° C.

Avant de plonger, la température du bloc est passée à 15° C.

A) Quelle est la nouvelle pression absolue de votre bouteille ?

A l'issue de votre plongée, il reste 75 bars dans votre bloc (toujours à 15° C). Exposée au soleil, la pression de la bouteille atteint 80 bars.

B) Quelle est la température de votre bouteille ?

LOI DE CHARLES

Réponses exercice n°2 :

A- $P_1 = 230 \text{ b}$; $T_1 = 35^\circ \text{ C} = 308 \text{ K}$; $T_2 = 15^\circ \text{ C} = 288 \text{ K}$

$$P_1/T_1 = P_2/T_2$$

$$P_2 = (P_1 \times T_2) / T_1 = (230 \times 288) / 308$$

$$P_2 = 215 \text{ bars}$$

B- $P_1 = 75 \text{ b}$; $T_1 = 15^\circ \text{ C} = 288 \text{ K}$; $P_2 = 80 \text{ b}$

$$P_1/T_1 = P_2/T_2$$

$$T_2 = (T_1 \times P_2) / P_1 = (288 \times 80) / 75$$

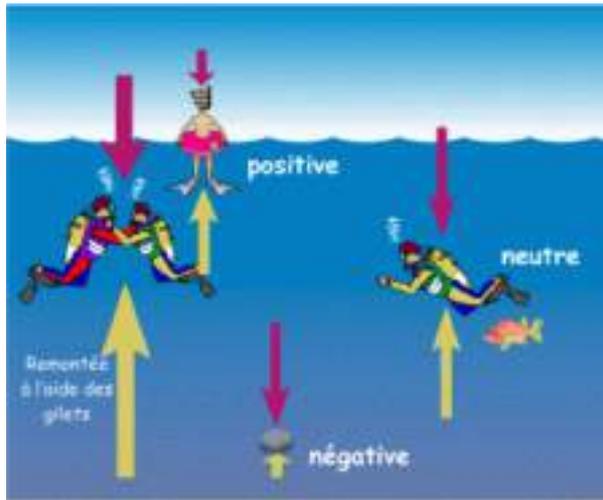
$$T_2 = 307,2 \text{ K} = 34,2^\circ \text{ C}$$

GAY LUSSAC

- Pression constante.....

FLOTTABILITÉ

En plongée, nous rencontrons 3 types de flottabilités



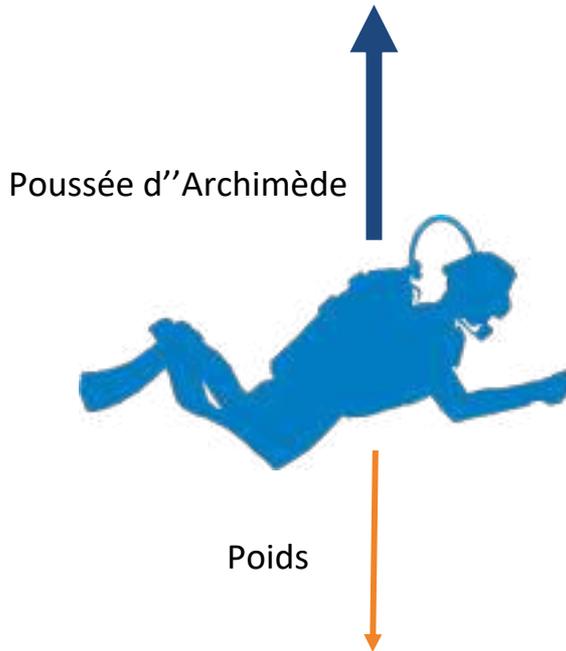
- Flottabilité positive: le plongeur monte 

- Flottabilité nulle (ou neutre): le plongeur est stabilisé 

- Flottabilité négative: le plongeur coule 

FLOTTABILITÉ

Comment expliquer ces différentes flottabilités?

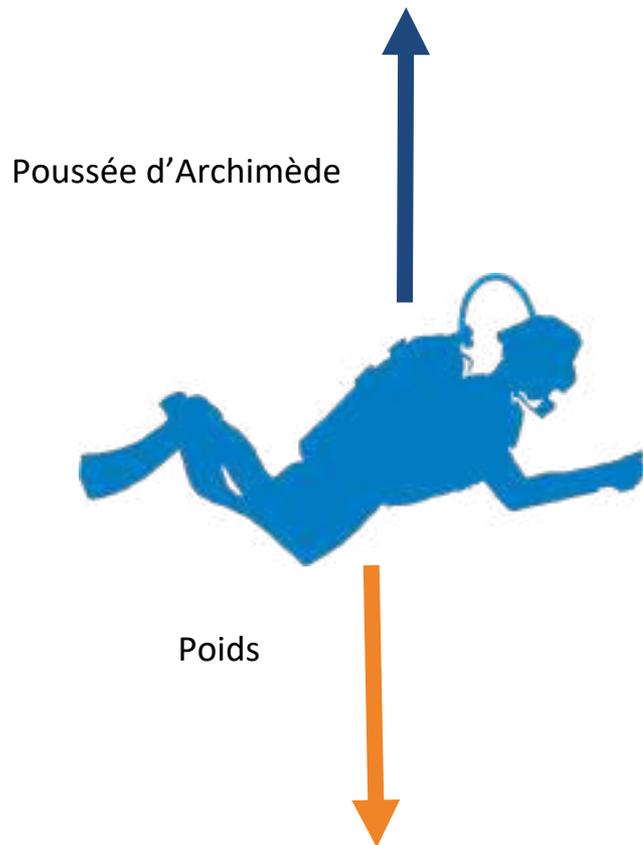


Dans l'eau, nous sommes soumis à 2 forces opposées:
Notre poids et la poussée d'Archimède

- Si le poids de notre plongeur est plus petit que la poussée d'Archimède: Flottabilité positive

Le plongeur remonte (ou flotte à la surface)

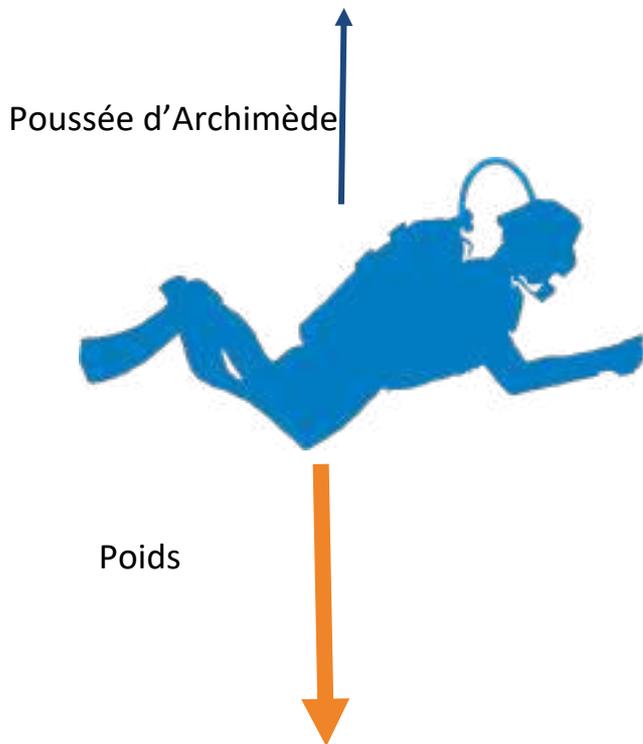
FLOTTABILITÉ



- Si le poids de notre plongeur est identique à la poussée d'Archimède : Flottabilité nulle

Le plongeur stabilisé

FLOTTABILITÉ



- Si le poids de notre plongeur est plus grand que la poussée d'Archimède : Flottabilité négative

Le plongeur descend

FLOTTABILITÉ

Que dit Archimède?

Tout corps plongé dans un liquide reçoit de la part de celui-ci une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du liquide déplacé.



FLOTTABILITÉ

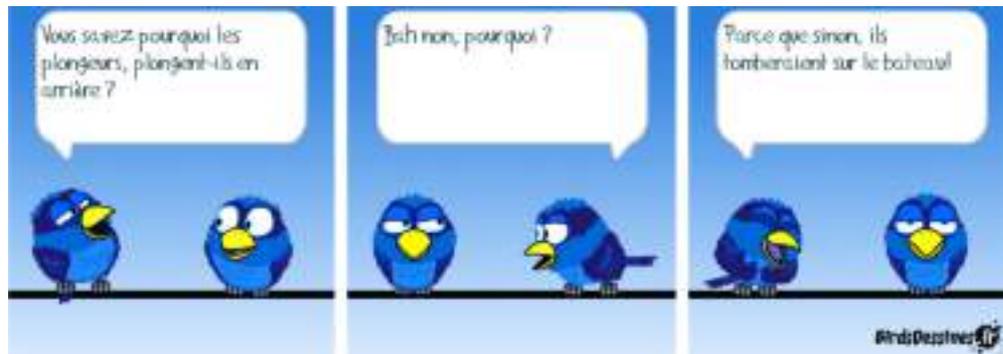
En plongée:

Poids apparent = Poids réel - Poussée Archimède

$$P_{\text{app}} = P_{\text{réel}} - P_{\text{arch}}$$

Le poids apparent étant le poids que semble peser un objet dans l'eau.

exemple: un bloc est plus facile à porter dans l'eau que dans l'air



FLOTTABILITÉ

Poids apparent négatif  Flottabilité positive
Le plongeur est entraîné vers la surface

Poids apparent nul  Flottabilité nulle
Le plongeur est stabilisé

Poids apparent positif  Flottabilité négative
Le plongeur descend

FLOTTABILITE

- Comment déterminer la Poussée D'Archimède?

$$P_{\text{arch}} = V \times D$$

Avec :

V= Volume de l'objet en Litre ou Dm³

D= **Densité du liquide** eau douce D=1, eau de mer D=1,03

- Comment déterminer le poids réel d'un objet?

- Soit on connait son poids

- Soit le calcul

$$P_{\text{réel}} = V \times D$$

Avec :

V= Volume de l'objet en Litre ou Dm³

D= **Densité de l'objet** exemple: densité plomb: 11,3

FLOTTABILITÉ

Applications à la plongée :

- Flottabilité, gilet stabilisateur, combinaison.
- Poumon ballast.

Conséquences :

- La flottabilité varie avec la profondeur
(variation des volumes des gaz → gilet, combinaison)
- Lestage (différent entre l'eau douce et l'eau de mer)

FLOTTABILITÉ

Premier Exercice : Lestage

Un plongeur d'un volume de 100 dm^3 a une masse tout équipé de 99 kg .

- a) Immergé dans de l'eau douce, quel est son poids apparent ?
- Que se passe-t-il ?
- b) Même question dans l'eau de mer.
- Comment doit être son lestage ?

Densité eau douce = 1

Densité eau de mer = 1,03

FLOTTABILITÉ

a) En Eau douce:

$$P_{app} = 99 - (100 \times 1)$$

$$P_{app} = -1$$

—————→ Il doit rajouter 1kg de lest

b) En Eau de mer

$$P_{app} = 99 - (100 \times 1,03)$$

$$P_{app} = -4$$

—————→ Il doit rajouter 4 kg de lest

FLOTTABILITÉ

Troisième exercice: Relevage

Une ancre de 50 kg et dont le volume est de 10 litres, repose sur un fond de 40 m (eau douce)

Pour la remonter un plongeur y accroche un parachute dans lequel il introduit 20 litres d'air.

- a) Que se passe-t-il ?
- b) A partir de quelle profondeur l'ancre va remonter ?

FLOTTABILITÉ

a) $P_{app} = 50 - (10+20) = 20$

—————→ L'ancre reste sur le fond

Pour que l'ancre monte il faut que $P_{archi} > P_{réel}$

$P_{archi} > 50$

—————→ Volume du parachute = 40 l

b) Mariotte : $5 \text{ b} \times 20 \text{ l} = P_2 \times 40 \text{ l}$

$P_2 = 100 / 40 = 2,5 \text{ bars}$

—————→ Profondeur = 15 mètres

Merci pour votre attention !!!



Et bon courage pour
la suite!