

Lois Physique Niveau 2 / Niveau 3

Damien VANHOYE, E2 N°19104



Pourquoi de la physique ?

Le milieu aquatique n'est pas notre milieu naturel

- Il va donc falloir réviser quelques règles physiques pour comprendre les phénomènes auxquels nous sommes exposés.
- Notions simples en rapport direct avec la plongée.

Plan du cours

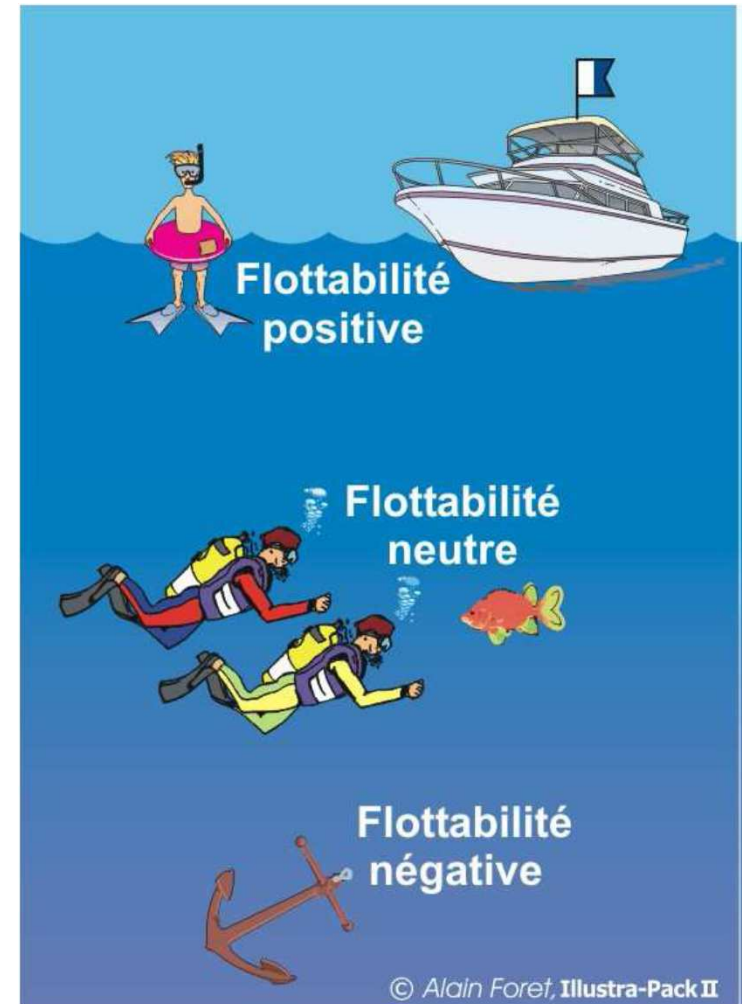
- Flottabilité
- Pressions
- Compressibilité des gaz
- Consommation d'air
- Autonomie en air
- Pressions partielles
- Dissolution d'un gaz
- Vision dans l'eau
- Acoustique dans l'eau



La flottabilité



- Les objets flottent, coulent ou restent en équilibre.
- On dit qu'ils ont une flottabilité positive, négative ou neutre.
- A quoi cela est dû ?



La flottabilité : Archimède

« Tout corps plongé dans un fluide (liquide ou gaz) reçoit de la part de ce fluide une poussée verticale dirigée de bas en haut et égale au poids du volume de fluide déplacé par le corps »

Exemple,

Un bloc de 12 litres : déplace 12 litres d'eau

Poids de 12 litres d'eau = 12 kg

Un bloc de 12 litres reçoit donc une poussée de 12 kg vers le haut.

La flottabilité : Poids apparent

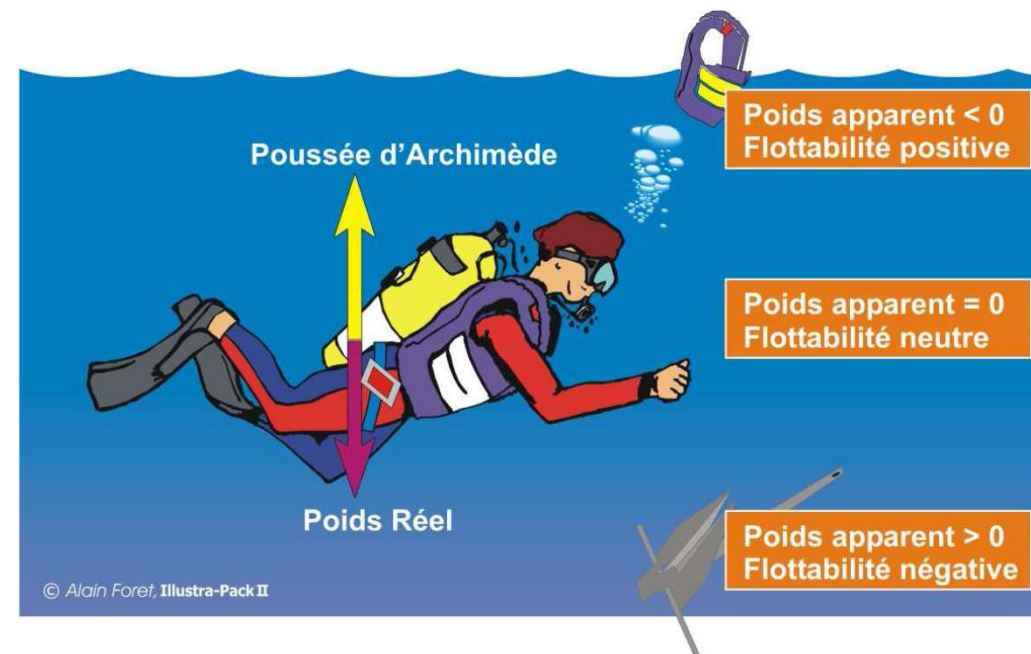
C'est le poids que l'on pèse dans l'eau,

Poids apparent = poids réel – poussée d'Archimède

Exemple,

bloc de 12 litres et de 15 kg

poids apparent = 15 kg – 12 kg = 3 kg



La flottabilité : Facteurs variables



Les facteurs qui font varier la flottabilité



La flottabilité : applications en plongée



Le lestage : Il augmente le poids apparent et doit être calculé de la manière suivante,

- Il faut qu'en fin de plongée, la flottabilité du plongeur soit légèrement nulle aux paliers.
- Il doit donc partir légèrement trop lourd en début de plongée.
- Son équilibrage à 3 m sera ensuite ajusté à l'aide de ses poumons

Le gilet : Lorsqu'un plongeur gonfle son gilet, il augmente son volume sans augmenter son poids réel,

- La poussée d'Archimède va augmenter et faire remonter le plongeur
- Mais l'utilisation principale du gilet est de s'assurer une flottabilité nulle à n'importe quelle profondeur.

La flottabilité : applications en plongée



Le canard : Il sert à diminuer la poussée d'Archimède.

Lorsque le plongeur effectue un (beau) canard et lorsqu'il a les jambes hors de l'eau, la poussée d'Archimède diminue: cela permet au plongeur de couler rapidement sans effort.

Le parachute de levage : Si l'on veut remonter un objet lourd du fond

On augmente donc le volume de l'objet sans augmenter son poids (et nous évite un essoufflement).

La flottabilité : Exercice



Un plongeur pèse 85 kg pour un volume de 90 litres

– *Il s'immerge, que se passe-t-il et pourquoi ?*

Il flotte car son poids apparent < 0 ($85 \text{ kg} - 90 \text{ kg} = -5 \text{ kg}$)

– *Ce plongeur cherche à être équilibré, combien de kilo de plomb doit-il mettre à sa ceinture ?*

5 kg car on cherche poids apparent = 0

La pression : Mise en évidence



Exemple,

- Un personne marche sur la neige :
 - *Elle est en chaussure, que se passe-t-il ?*
 - *Elle décide de mettre des raquettes, que se passe-t-il ?*
- La pression exercée sur la neige est plus faible.
- La force que la personne exerce sur la neige n'a pas changée (c'est son poids).
- La surface sur laquelle cette force s'exerce a augmentée.

La pression : Définition



C'est une force appliquée sur une surface

Pression = Force / Surface

Unité (en plongée) : le bar

1 bar = 1 kg / cm²



La pression : Différents types

Pression atmosphérique

- La pression exercée par le poids de l'air.
- A la surface de la mer, elle est de 1 bar.

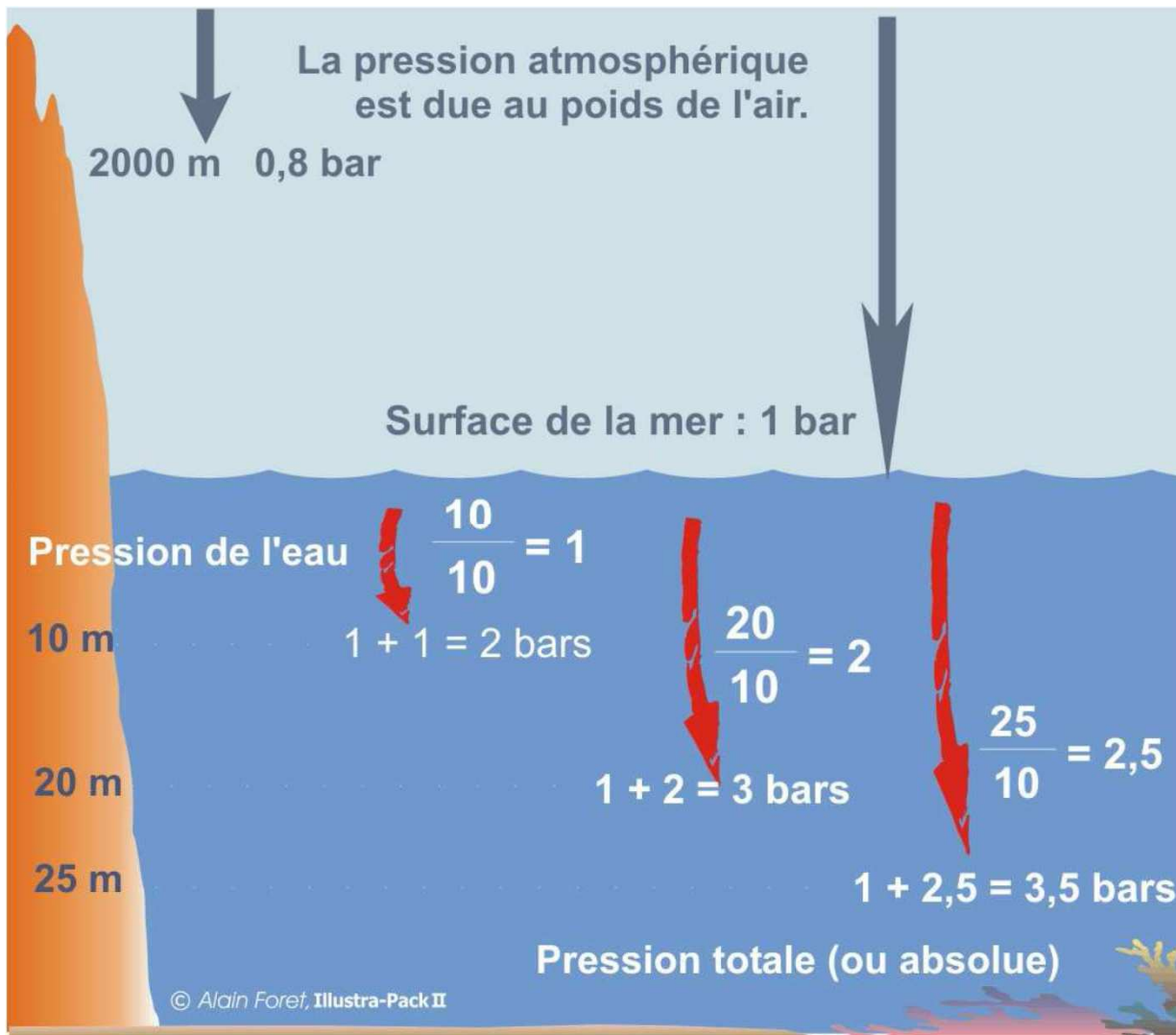
Pression hydrostatique

- La pression exercée par le poids de l'eau.
- 10 mètres d'eau exerce une pression de 1 bar.

Pression ambiante = La pression atmosphérique + la pression hydrostatique

$$\text{Pression ambiante} = 1 + (\text{profondeur en mètre} / 10)$$

La pression : Variation en plongée



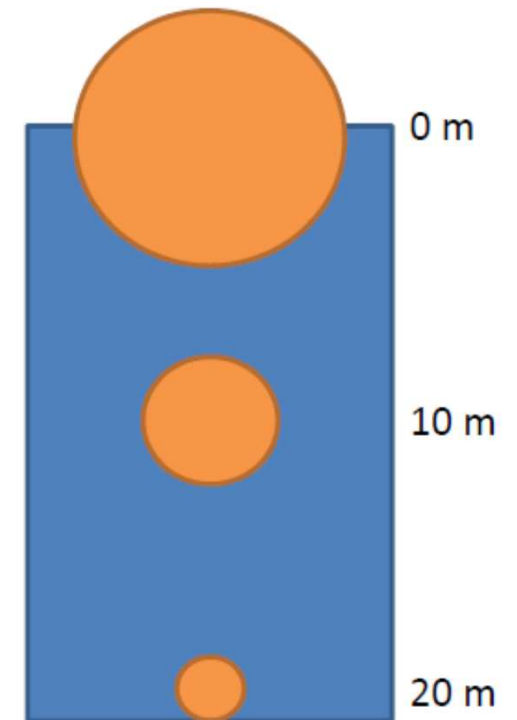
Profondeur	Pression
0 mètre	1 bar
10 mètres	2 bar
20 mètres	3 bar
30 mètres	4 bar
40 mètres	5 bar

La compressibilité des gaz

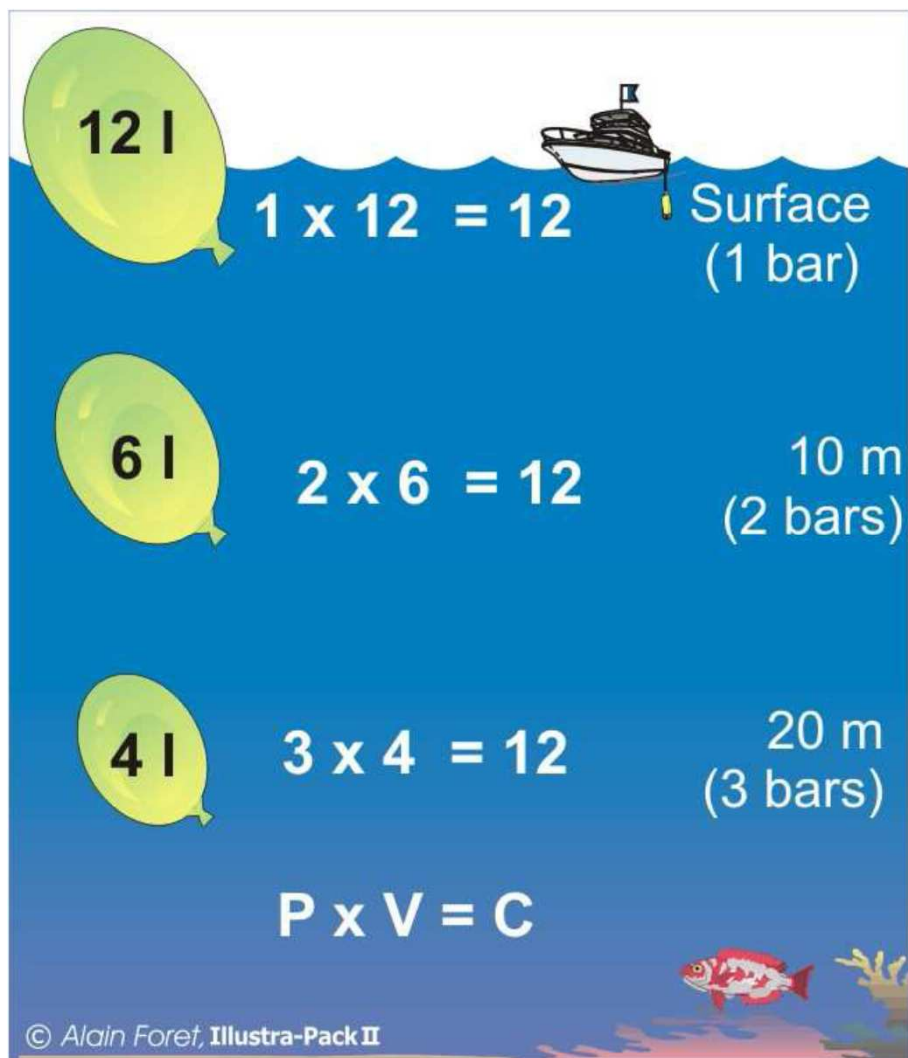


On a vu que la pression augmentait avec la profondeur

- Quand on immerge un ballon son volume diminue
- Donc le volume du ballon diminue avec l'augmentation de la pression



La compressibilité des gaz



Exemple, un ballon de 12 Litre en surface

- Pression : $P1 = 1 \text{ bar}$
- Volume : $V1 = 12 \text{ litres}$

- A 10 mètres :
 - Pression : $P2 = 2 \text{ bar}$
 - Volume : $V2 = 6 \text{ litres}$

On remarque,

$$P1 \times V1 = 12 = P2 \times V2$$

Donc : **$P1 \times V1 = P2 \times V2$**

La Compressibilité des gaz : Mariotte



La loi de Boyle-Mariotte :

« A température constante, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il reçoit »

Donc :

- Lorsque la pression augmente, le volume de gaz diminue.
- Lorsque la pression diminue, le volume de gaz augmente.

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

P = La pression exercée sur le gaz

V = Le volume occupé par le gaz

La Compressibilité des gaz : Mariotte



Précision : « *A température constante* »

Exemple,

- Un bloc reste au soleil, sa pression est de 210 bar
 - Une fois immergé, sa pression n'est plus que 180 bar
-
- Quand la température augmente, la pression augmente.
 - Quand la température diminue, la pression diminue.
- => Nous n'en tiendrons pas compte pour les calculs !



La Compressibilité des gaz : Exercice 1

Soit un ballon de 30 litres en surface, quel est son volume à 50 mètres ?

A la surface, $P_{\text{ambiante}} = P_{\text{atmosphérique}} = \mathbf{1 \text{ bar}}$

A 50 mètres, $P_{\text{ambiante}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{eau}} = 1 + (50/10) = \mathbf{6 \text{ bar}}$

$P_1 \times V_1 = \text{état ballon à la surface}$

$P_2 \times V_2 = \text{état du ballon à 50 mètres}$

Volume à 50 mètres : $V_2 = (P_1 \times V_1) / P_2 = \mathbf{5 \text{ litres}}$



Si on regonfle le ballon à 50m à son volume initial (30L), il aura **180 L** arrivée à la surface !!!!! (6bars x 30 L)



La Compressibilité des gaz : Exercice 2

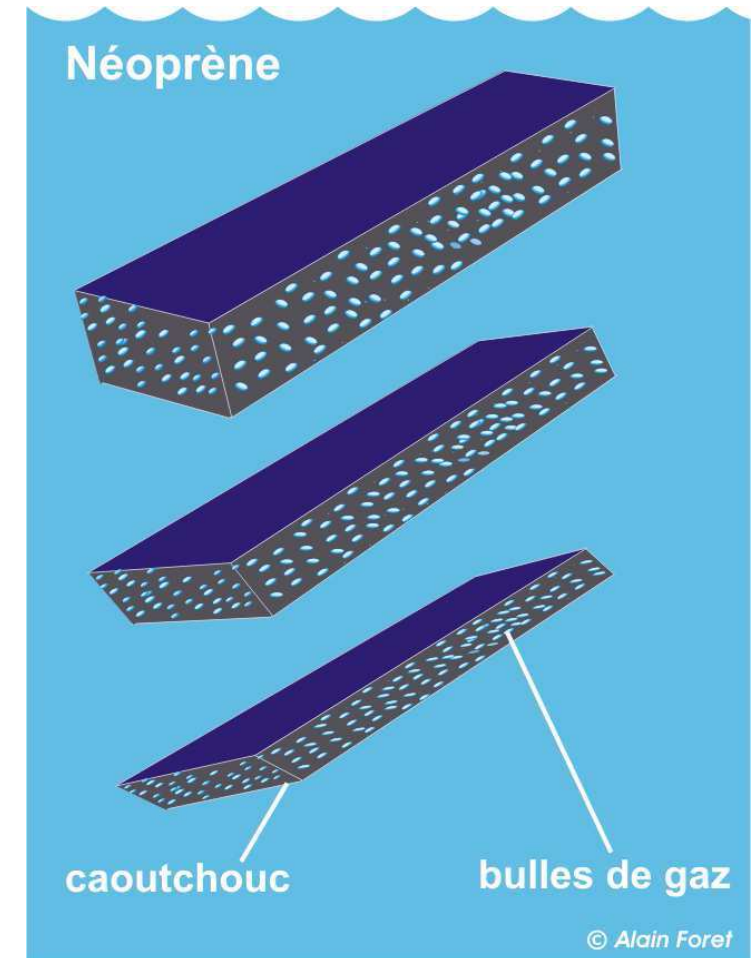


Un plongeur tout équipé pèse 85 kg pour un volume de 85L. Il possède une combinaison de 7mm qui possède un volume de 6 L et un poids de 2kg

Quel volume d'air devra-t-il mettre dans son gilet pour être équilibré à la profondeur de 50 mètres ?

- Volume combinaison à 50 m :
 $6 \text{ (volume à la surface)} / 6 \text{ (pression ambiante)} = \mathbf{1 \text{ L}}$
- Différence de volume : $1 - 6 = -5 \text{ L}$
- Volume du plongeur à 50m : $85 - 5 \text{ L} = \mathbf{80 \text{ L}}$
- Poids du plongeur : **85kg**
- Poids apparent : $85 - 80 = \mathbf{5 \text{ Kg}}$

=> il doit rajouter **5 litres d'air** dans son gilet.





La compressibilité des gaz : Exercice 3

Je dispose de deux blocs :

- Un 12 litres gonflé à 200 bars,*
- Un 18 litres gonflé à 230 bars.*

- Aujourd'hui je ne dois faire que des petites plongées et je n'ai donc pas besoin du bloc de 18 litres.
- Pour ma première plongée le matin, je prend le bloc de 12 litres.
Après cette plongée il reste dans ce bloc 90 bars.
- Je décide pour la plongée de l'après-midi, de gonfler le bloc de 12 litres grâce à celui de 18 litres en les branchant avec une lyre.
- Jusqu'à quelle pression pourra-t-on amener le bloc de 12 litres ?
Pourra-t-on plonger avec ?

La compressibilité des gaz : Exercice 3

Je dispose :

- Un bloc de 12 litres à 90 bars
- Un bloc de 18 litres à 230 bars

- Quantité d'aire disponible :

$$12 \times 90 + 18 \times 230 = \mathbf{5220 \text{ litres}}$$

- Volumes des blocs : $12 + 18 = \mathbf{30 \text{ litres}}$

- Pression dans les blocs = $5220 / 30 = \mathbf{174 \text{ bars}}$

Consommation d'air



C'est le volume d'air inspiré par minute

Consommation au fond = pression x consommation surface

Considérons qu'en surface nous consommons **20 litres/minute**.

Profondeur	Pression	Consommation
Surface (0 m)	1 bar	1 x 20 = 20 litres/minute
10 mètres	2 bar	2 x 20 = 40 litres/minute
20 mètres	3 bar	3 x 20 = 60 litres/minute
30 mètres	4 bar	4 x 20 = 80 litres/minute
40 mètres	5 bar	5 x 20 = 100 litres/minute

Consommation d'air : Variation



20 litres/minute = consommation moyenne

- Expérience plongée (trop de mouvement par ex.)
- Varie d'un individu à l'autre.
- Varie d'une plongée à l'autre :
 - Réadaptation
 - Froid
 - Stress
 - ...





Autonomie en air

Temps d'immersion restant avant la panne d'air

Il nous faut connaître la quantité d'air disponible et la consommation .

Quelle est la quantité d'air disponible dans un bloc de 12 litres gonflé à 200 bar ?

$$12 \text{ L} \times 200 \text{ bar} = 2400 \text{ litres}$$

Autonomie en air

Vu que la quantité d'air utilisé augmente avec la profondeur, l'autonomie va diminuer

Si on considère un bloc de 12 litres gonflé à 200 bar, nous disposons de 2400 litres d'air

Profondeur	Consommation	Autonomie
Surface (0 mètre)	20 litres / minute	$2400 / 20 = 120$ minutes
10 mètres	40 litres / minute	$2400 / 40 = 60$ minutes
20 mètres	60 litres / minute	$2400 / 60 = 40$ minutes
30 mètres	80 litres / minute	$2400 / 80 = 30$ minutes
40 mètres	100 litres / minute	$2400 / 100 = 24$ minutes
50 mètres	120 litres / minute	$2400 / 120 = 20$ minutes



Autonomie en air

Mais attention : on remonte toujours sur le bateau avec au moins 50 bars !

- Il faut prendre en compte cette réserve, c'est de l'air que l'on ne consomme pas

Exemple, on fixe la réserve à 50 bars.

- Bloc de 12 litres gonflé à 200 bars, on ne peut consommer que 150 bars.
- Soit $12 \times 150 = 1800$ litres disponibles avant la réserve.

Pour une plongée à 40 mètres,

- Consommation : $20 \times 5 = 100$ l/min
- Autonomie : $1800 / 100 =$ **18 minutes (au lieu de 24 minutes sans la réserve)**



Autonomie en air : Exercice 1

Un plongeur consomme 20L/min à la surface. Il dispose d'un bloc 15 litres gonflé à 200 bar. Il plonge sur un fond de 50 mètres. Je souhaite que ce plongeur entame sa remontée lorsqu'il lui restera 100 bar. Quelle est son autonomie à 50 mètres ?

- Air avant de remonter : $15 \text{ litres} \times (200 - 100) = \mathbf{1500 \text{ litres}}$
- A 50 mètres, le plongeur consomme : $20 \times 6 = \mathbf{120 \text{ litres/minute (en équivalent surface)}}$
- L'autonomie est donc de $1500 / 120 = \mathbf{12,5 \text{ minutes}}$

Autonomie en air : Exercice 2



Un plongeur dispose d'un bloc de 15 litres gonflé à 200 bars.

Il consomme 20 litres/minute à la surface.

Durant sa plongée, il passe 8 minutes à 40 mètres et 15 minutes à 20 mètres.

*A la fin de son exploration, combien de temps pourra-t-il passer au palier à 3 mètres avant d'arriver sur sa réserve (50 bars) ?
(On ne tiendra pas compte des temps de descente et de remontée)*



Autonomie en air : Exercice 2

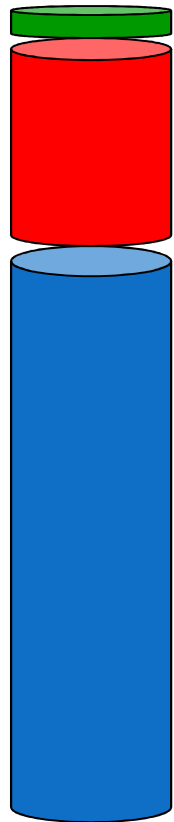
- Air disponible au début de plongée : $15 \times (200 - 50) = \mathbf{2250 \text{ litres}}$
- A 40 mètres, il consomme : $20 \times 5 = \mathbf{100 \text{ litres/minute (équivalent surface)}}$
- Il aura consommé : $8 \times 100 = \mathbf{800 \text{ litres}}$

- A 20 mètres, il consomme : $20 \times 3 = \mathbf{60 \text{ litres/minute (équivalent surface)}}$
- Il aura consommé : $15 \times 60 = \mathbf{900 \text{ litres}}$
- Air disponible avant palier : $2250 - 800 - 900 = \mathbf{550 \text{ litres}}$

- A 3 mètres, le plongeur consomme : $20 \times 1,3 = \mathbf{26 \text{ litres/minute (en équivalent surface)}}$

- **L'autonomie au palier est donc de $550 / 26 = \mathbf{21 \text{ minutes}}$**

Composition de l'air



1 % d'autres gaz (Argon, Krypton, CO₂, CO...)

21 % d'oxygène O₂

78 % d'azote N₂

Pour des raisons de commodités on "simplifie" souvent en disant que l'air se compose de :

80 % d'azote
20 % d'oxygène

Les pressions partielles : loi de Dalton



« A température donnée, la pression d'un mélange gazeux (pression absolue) est égale à la somme des pressions partielles des gaz qui le composent. »

Autrement dit dans l'air :

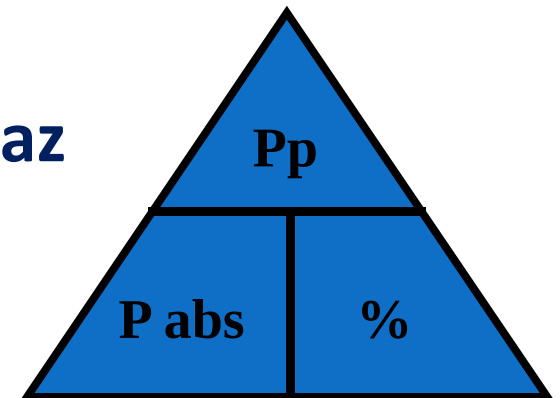
$$P_{abs} = \text{Pression partielle } N_2 + \text{Pression partielle } O_2$$

« La pression partielle d'un gaz dans un mélange est égale au pourcentage de ce gaz dans le mélange multiplié par la pression absolue »

$$\text{Pression Partielle} = P_{absolue} \times \text{Pourcentage Gaz}$$

$$\text{A la surface : } P_p O_2 = 1 \times 0,2 = 0,2 \text{ bar}$$

$$\text{A 20 m : } P_p O_2 = 3 \times 0,2 = 0,6 \text{ bar}$$



Les pressions partielles: applications

En effet la tolérance de l'organisme à divers gaz varie selon la nature des gaz et la pression à laquelle ils sont respirés.

Ainsi à l'air :

- **L'oxygène est toxique au-delà de 60m**
- **L'azote est toxique au-delà de 30m (narcose)**
- **Le CO₂ est toxique en trop grande quantité (essoufflement)**

En conséquence la loi de Dalton est utilisée pour **calculer la profondeur limite de plongée à l'air**, la mise au point des tables de plongée et la préparation des plongée aux mélanges (Nitrox, Trimix...).

Dissolution d'un gaz (Henry)



- Les liquides dissolvent les gaz

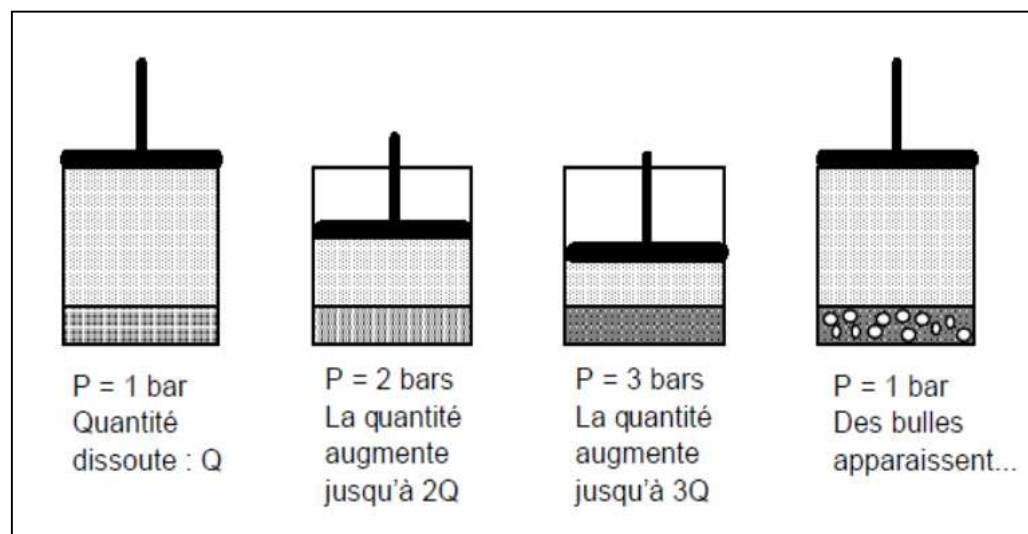
Ex : poissons qui consomment l'oxygène

Ex : l'eau qui libère du gaz dans une casserole

- La pression joue un rôle dans cette dissolution

Ex : bouteille de champagne que l'on débouche :

Pression ↓ Bulles ↑



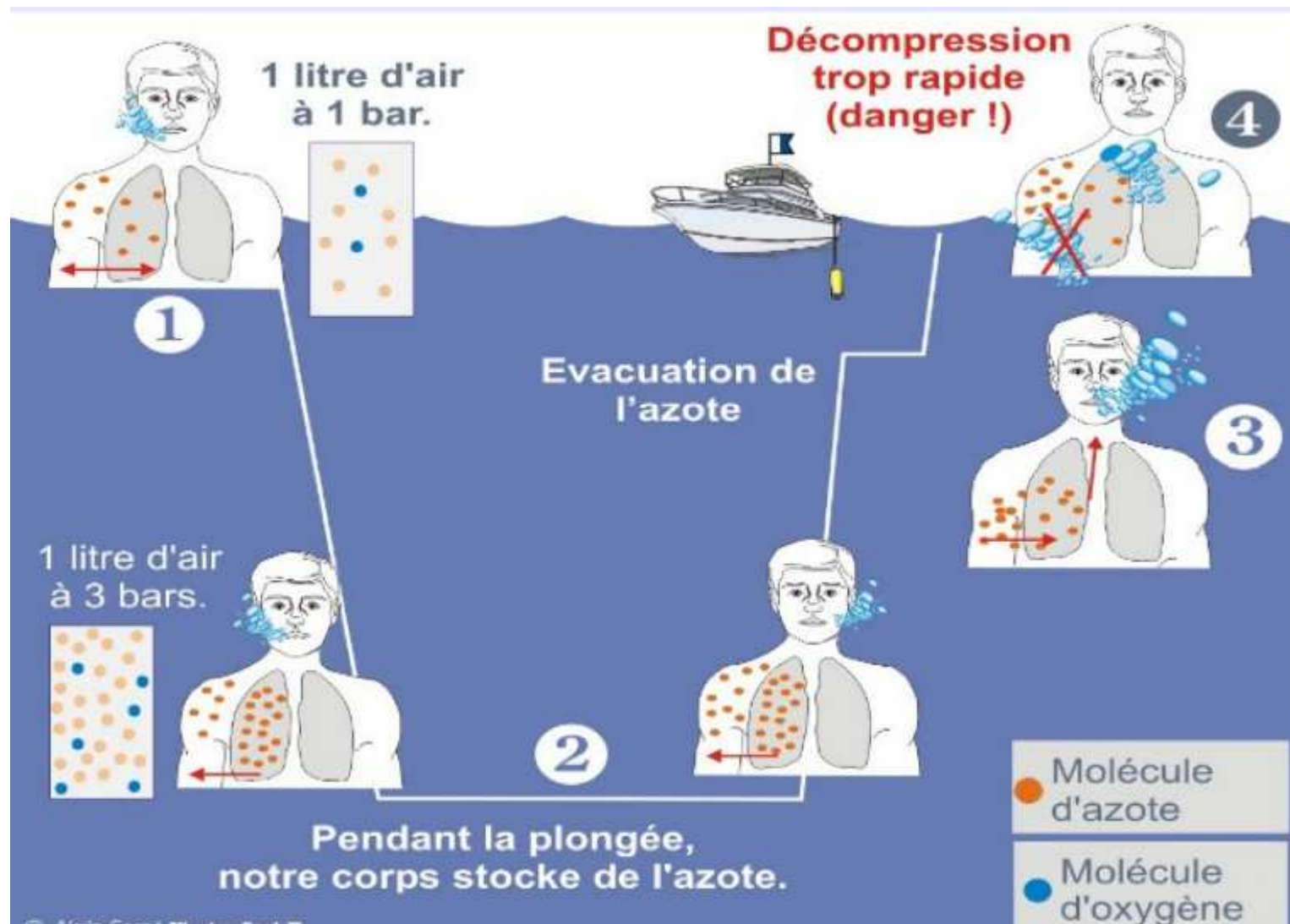
Loi de Henry

« A T° constante, la quantité de gaz dissoute à saturation dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle du gaz au dessus de ce liquide »

Dissolution d'un gaz (Henry) : conséquence sur la plongée

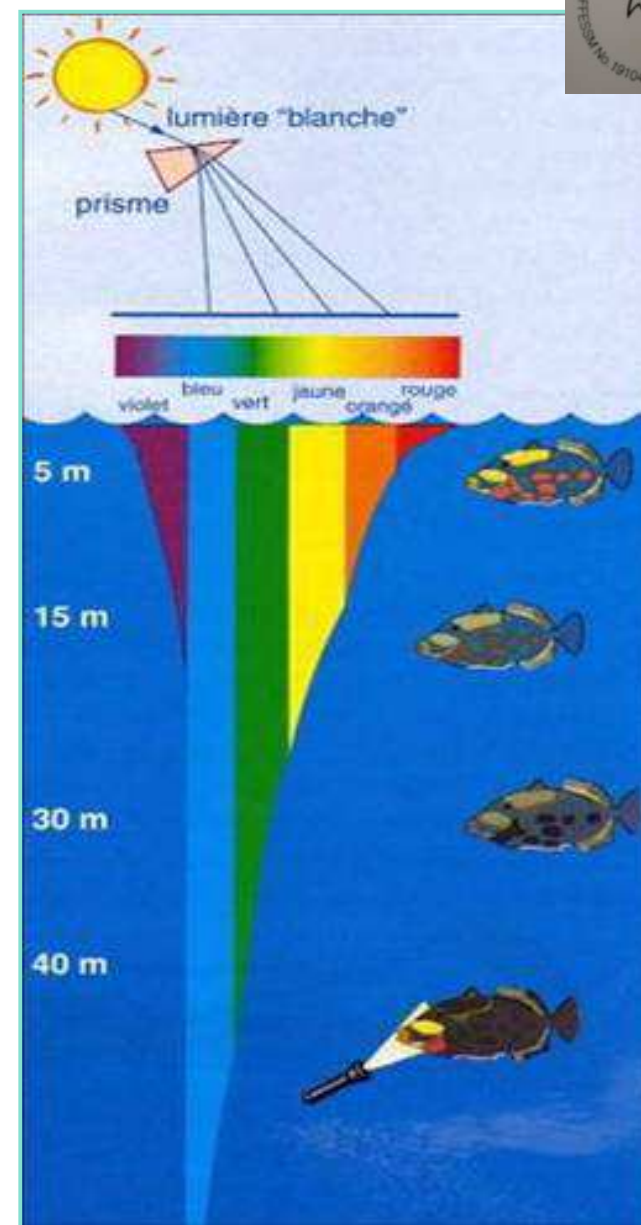
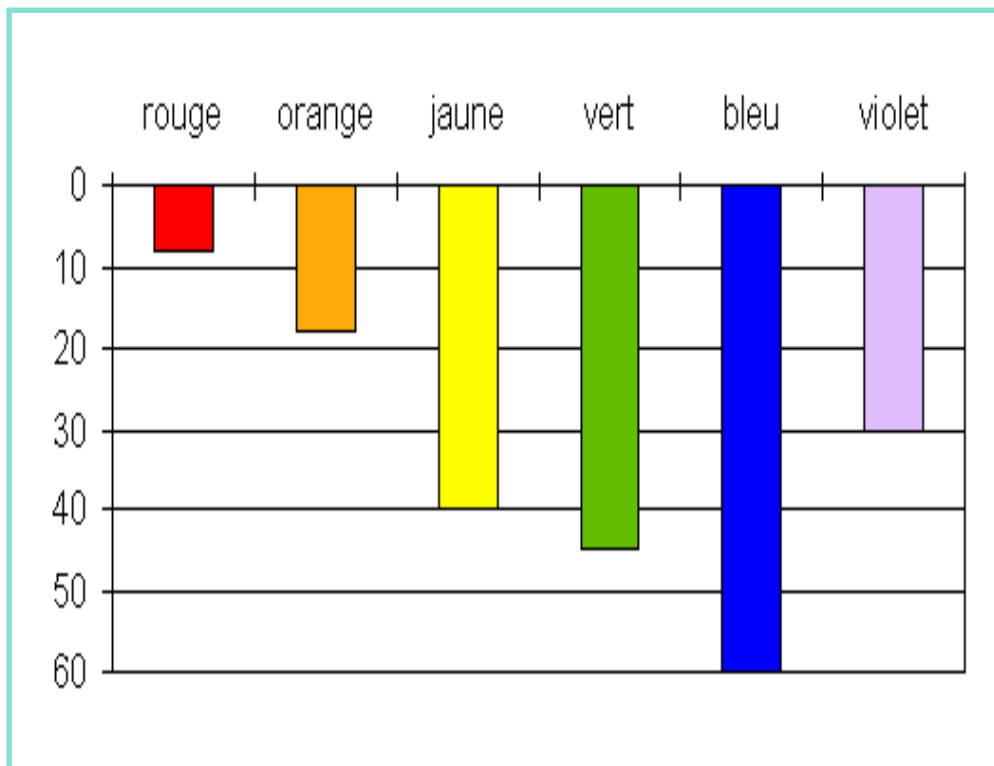
<i>GAZ DANS LA CUVE</i>	<i>PLONGEUR</i>	<i>PRESSION</i>	<i>ETAT</i>	<i>GAZ</i>
On avance le piston	Le plongeur descend	augmente	Sous saturation	Se dissout dans le liquide
Le piston s'arrête	Le plongeur reste au fond	est fixe	Saturation	Equilibre
On recule le piston	Le plongeur remonte	diminue	Sur saturation	Petites bulles dans le liquide (micro-bulles)
Après un certain temps	Après 8 heures	fixe	Saturation	Equilibre
On fait chuter la pression très vite	Le plongeur remonte trop vite ou ne respecte pas les paliers	chute trop vite	Au-delà de la sur saturation critique	Dégazage incontrôlé DANGER

Dissolution d'un gaz (Henry) : conséquence sur la plongée



Vision au cours de la plongée

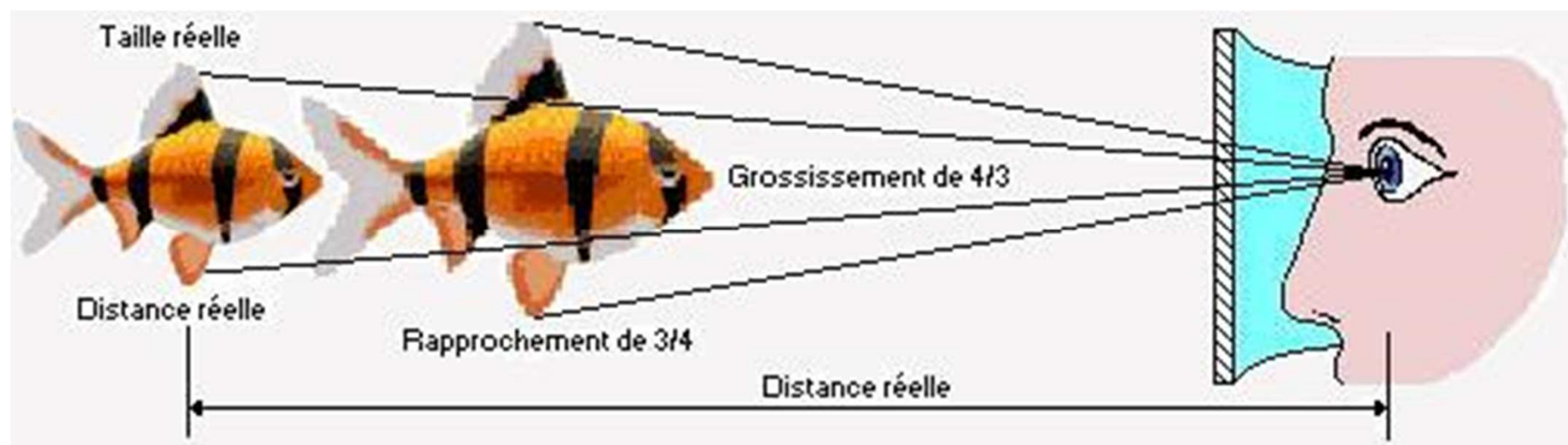
L'absorption est due à l'eau. L'intensité lumineuse diminue et les couleurs disparaissent au fur et à mesure de la profondeur.



Vision au cours de la plongée



La vision sous marine subit des modifications liées à la différence d'indice de **réfraction** entre l'air contenu dans le masque et l'eau, ainsi que par **l'absorption** sélective de la lumière et la **diffusion** due aux particules de l'eau



**Grossissement
(d'un facteur $4/3$)**

**Rapprochement
(facteur $3/4$)**

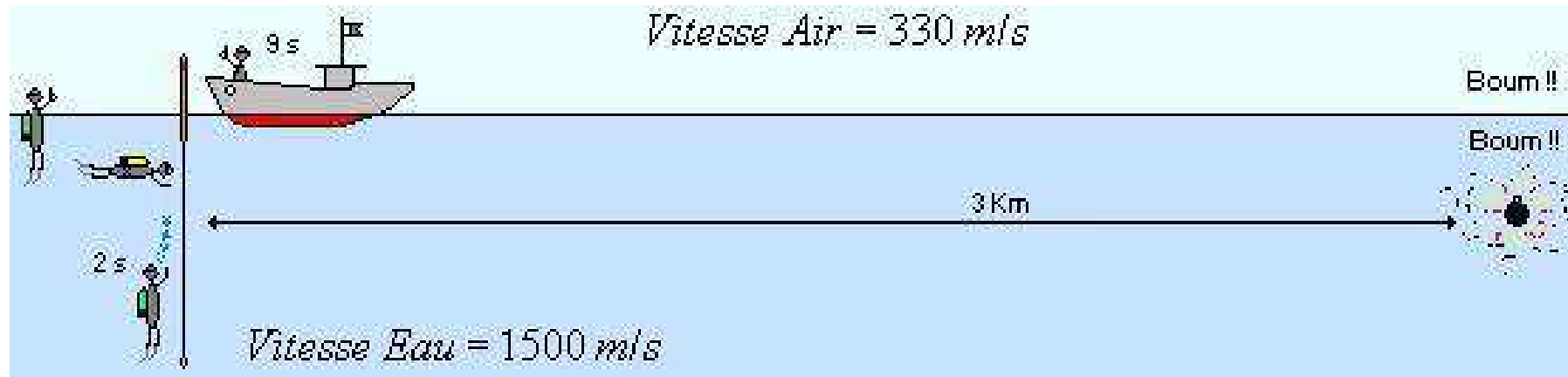
Acoustique au cours de la plongée

La vitesse de propagation d'un son dépend de la densité du milieu,

- Dans **l'air environ 330 m/s**
- Dans **l'eau environ 1500 m/s**
- Dans l'eau 4,5 fois plus rapide que dans l'air

Conséquences

- La localisation des sons dans l'eau impossible
- Tour d'horizon obligatoire !!!



Merci de votre attention

