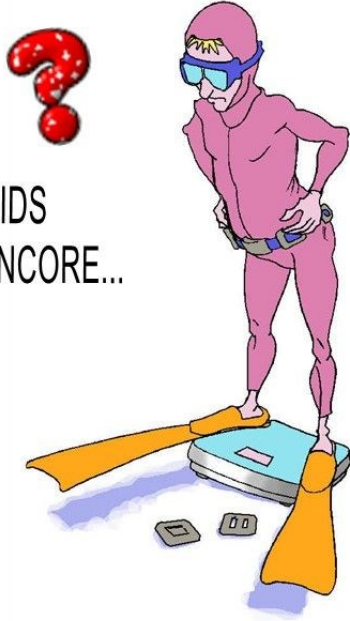




OUI COMBIEN DE POIDS
JE DOIS PRENDRE ENCORE...



PHYSIQUE APPLIQUÉE À LA PLONGÉE COURS NIV

LA FLOTTABILITÉ

- **Densité et masse volumique**



- 1l d'eau = 1 dm³



- 1l d'eau douce pèse 1kg

- **Masse volumique**

- Grandeur physique qui caractérise la masse d'une substance par unité de volume
 - Ex: $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ kg/dm}^3$

$$\rho = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}}$$

- **Densité**

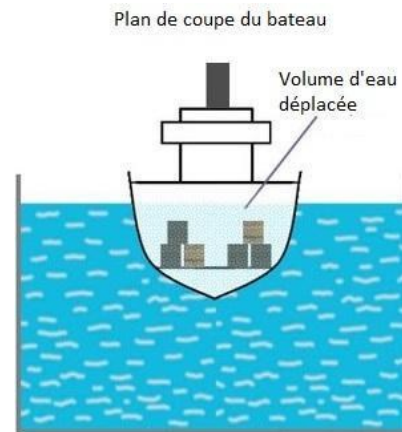
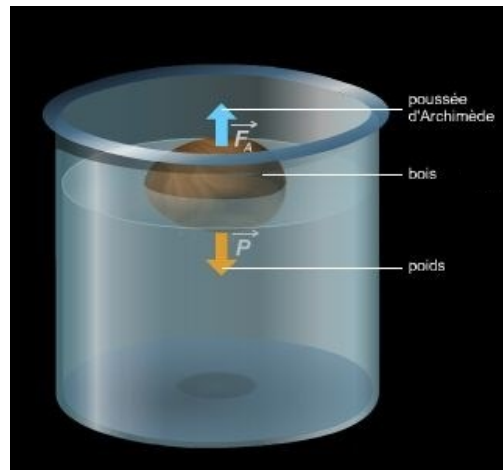
- La densité d'un corps est le rapport entre sa masse volumique et la masse volumique d'un corps de référence
- Pour les liquides et les solides, le corps de référence est l'eau

$$d_{\text{liquide}} = \frac{\rho_{\text{liquide}}}{\rho_{\text{eau}}}$$

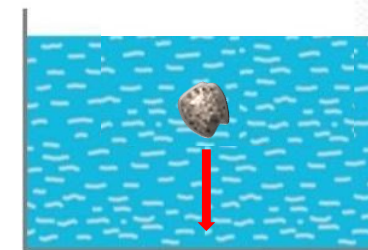
LA FLOTTABILITÉ

- **La poussée d'Archimède**

« Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut et égale (et opposée) au poids du volume de fluide déplacé. »



Volume d'eau déplacé important
par rapport à la masse du bateau
Le bateau flotte



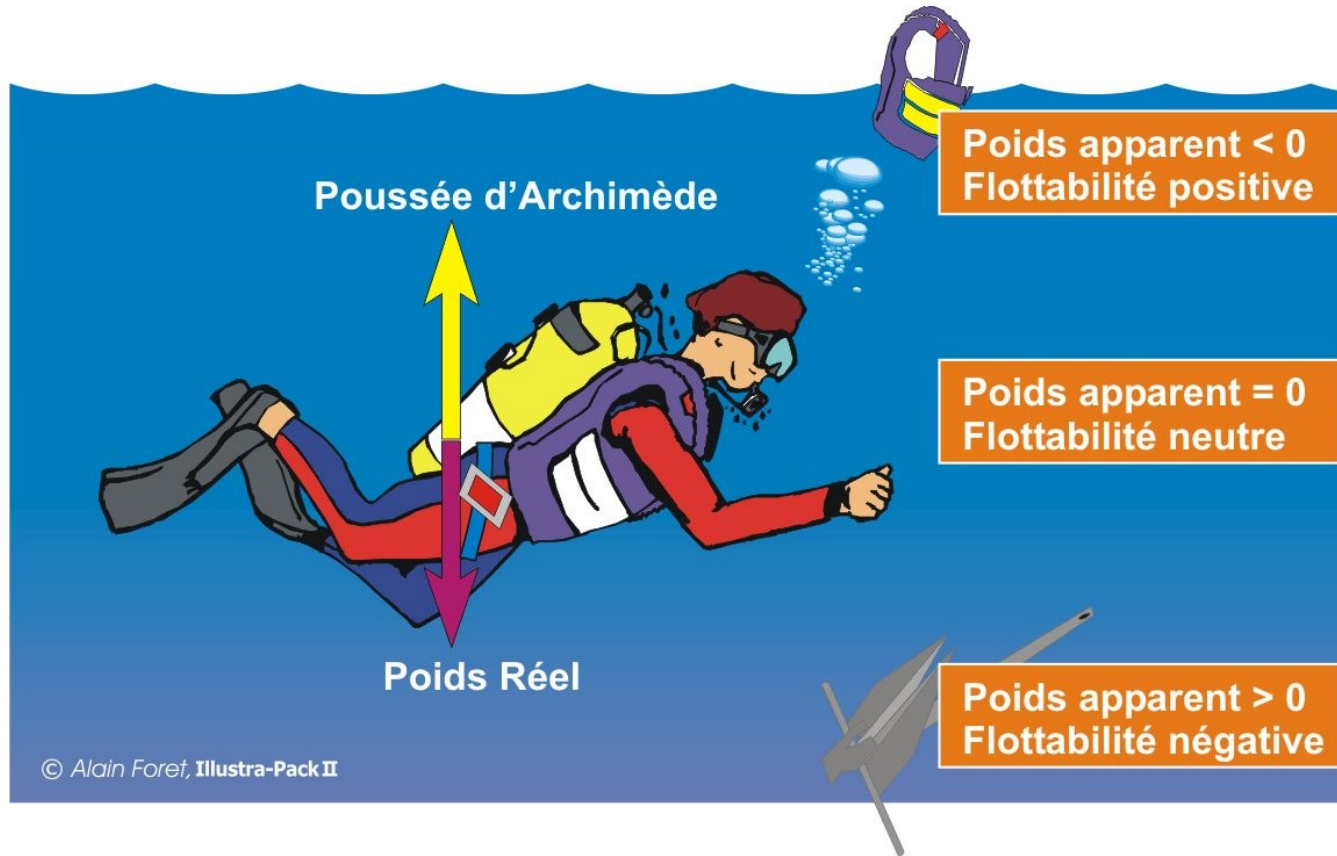
Volume d'eau faible par rapport à
la masse du caillou
Le caillou coule

- Poussée d'Archimède : force exercée par l'eau, elle est fonction de la masse du volume d'eau déplacé

$$P_{Archimede} = V_{objet} \times \rho_{fluide}$$

LA FLOTTABILITÉ

- La poussée d'Archimède



- Un objet dans l'eau semble plus léger
⇒ son poids apparent est différent de son poids réel
- Objectif en plongée : être en flottabilité neutre

$$\text{Poids apparent} = \text{poids réel} - \text{poussée d'Archimède}$$

LA FLOTTABILITÉ

- **Facteurs influents sur la flottabilité en plongée**



- Flottabilité négative :
 - le détendeur
 - la bouteille
 - le lestage
 - l'air
 - le phare...
- Flottabilité positive :
 - le gilet
 - la combinaison
 - le type d'eau (douce, salée)
 - les poumons...

- En plongée : maîtrise de la flottabilité avec le gilet et les poumons



LA FLOTTABILITÉ

- **Exercice** : influence de l'eau

Un plongeur équipé pèse 100kg pour un volume de 98 dm³. Calculer son poids apparent.

1. à Beffes, eau douce, $\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$
2. à Erquy, eau de mer, $\rho = 1,03 \text{ kg/dm}^3$

- Formules :

$$P_{\text{Archimede}} = V_{\text{objet}} \times \rho_{\text{fluide}}$$

$$P_{\text{apparent}} = P_{\text{reel}} - (V_{\text{objet}} \times \rho_{\text{fluide}})$$

- Eau douce : $P_{\text{app}} = 100 - (98 \times 1) = 2 \text{ kg} > 0$
- Eau de mer : $P_{\text{app}} = 100 - (98 \times 1,03) = -0,94 \text{ Kg}$

le plongeur coule

le plongeur flotte



LA FLOTTABILITÉ

- **Exercice** : influence du matériel

Un plongeur équipé et parfaitement lesté pèse 100kg pour un volume de 98 dm³ avec un bloc de 12 L. Il décide de changer prendre un bloc de 15 L pour un plongée profonde. Quel lestage doit-il ajouter ?

- eau de mer, $\rho = 1,03 \text{ kg/dm}^3$
- poids d'un bloc de 12 L = 16 Kg
- poids d'un bloc de 15 L = 18 Kg

$$P_{\text{Archimede}} = V_{\text{objet}} \times \rho_{\text{fluide}}$$

$$P_{\text{apparent}} = P_{\text{reel}} - V_{\text{objet}} \times \rho_{\text{fluide}}$$

- $P_{\text{app}} \text{ 12 L} = 100 - (98 \times 1,03) = -0,94 \text{ Kg}$
- $P_{\text{app}} \text{ 15 L} = 102 - (101 \times 1,03) = -2,03 \text{ Kg}$

⇒ Le plongeur devra donc ajouter 1,1 Kg pour rester parfaitement équilibré



LA FLOTTABILITÉ

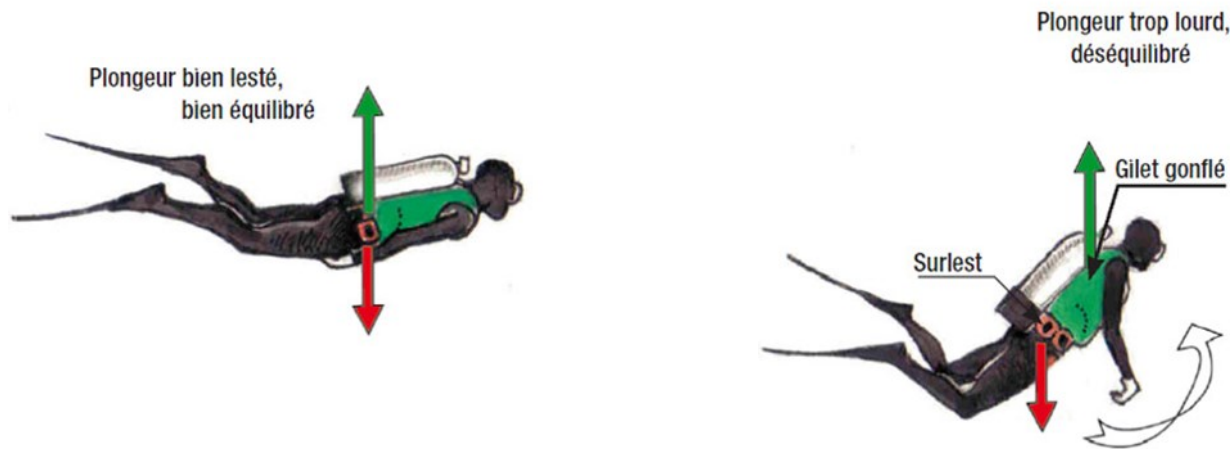
- **La flottabilité en plongée sous-marine**

- Danger du surlestage : le plongeur palme debout
 - Risque d'essoufflement dès la mise à l'eau
 - Difficulté de tenir un palier ou stabilisé sans palmer

⇒ Risque de noyade

- Danger du souslestage : le plongeur palme la tête en bas
 - Risque de remontée non contrôlée
 - Difficulté de tenir un palier ou stabilisé sans palmer
 - Effort lors de la descente (essoufflement)

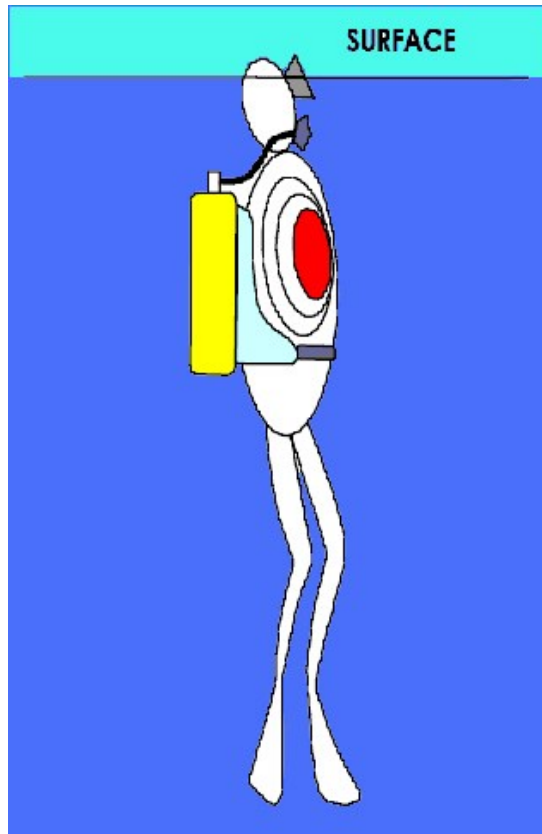
⇒ Risque de surpression pulmonaire



LA FLOTTABILITÉ

- **La flottabilité en plongée sous-marine**

- Vérifier un lestage pour les plongeurs avec peu d'expérience, les plongeurs occasionnels, les plongeurs n'ayant pas l'habitude de plonger dans cet environnement



- Bon lestage :
 - En expirant => immersion jusqu'aux yeux, descente lente
 - ⇒ Descente rapide = surlestage
 - ⇒ Descente difficile = souslestage

LA FLOTTABILITÉ

- **Relevage des ancrs**

- Calculer le volume d'air nécessaire pour relever une ancre de 123 Kg d'un volume de 20l mouillée à 30m avec un parachute.

1. En eau douce, $\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$
2. En mer, $\rho = 1,03 \text{ kg/dm}^3$

- Calcul du poids apparent : $P_{\text{apparent}} = P_{\text{reel}} - V_{\text{objet}} \times \rho_{\text{fluide}}$

- En eau douce : $P_{\text{app}} = 123 - (20 \times 1) = 103 \text{ Kg}$

- En mer : $P_{\text{app}} = 123 - (20 \times 1,03) = 102,4 \text{ Kg}$

- Calcul du volume nécessaire pour relever l'ancre : $P_{\text{Archimede}} = V_{\text{objet}} \times \rho_{\text{fluide}} \Rightarrow V_{\text{objet}} = \frac{P_{\text{Archimede}}}{\rho_{\text{fluide}}}$

- En eau douce : $V_{\text{air à 30m}} = 103 / 1 = 103 \text{ l}$

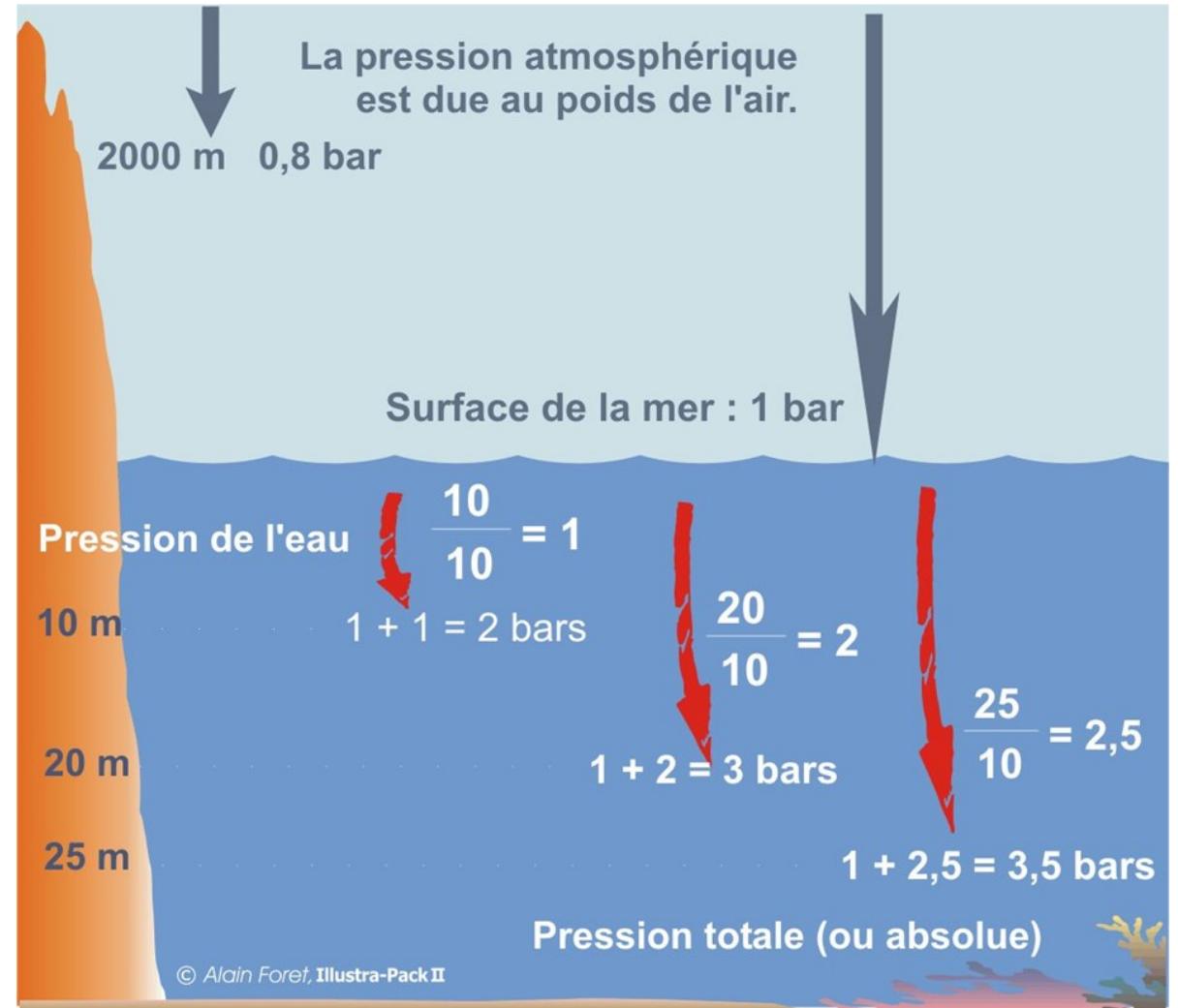
- En mer : $V_{\text{air à 30m}} = 102,4 / 1,03 = 99 \text{ l}$

RAPPEL SUR LES PRESSIONS EN PLONGÉE

- Pression absolue (en Bars) : pression qui s'exerce sur nous lors de la plongée

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atmosphérique}} + P_{\text{hydraulique}}$$

- P_{atm} :
 - $P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$ au niveau de la mer
 - baisse de $\approx 0,1 \text{ B}$ par 1 000m d'altitude
- P_{hyd} : 1 bar tous les 10m pour une eau $\rho = 1$



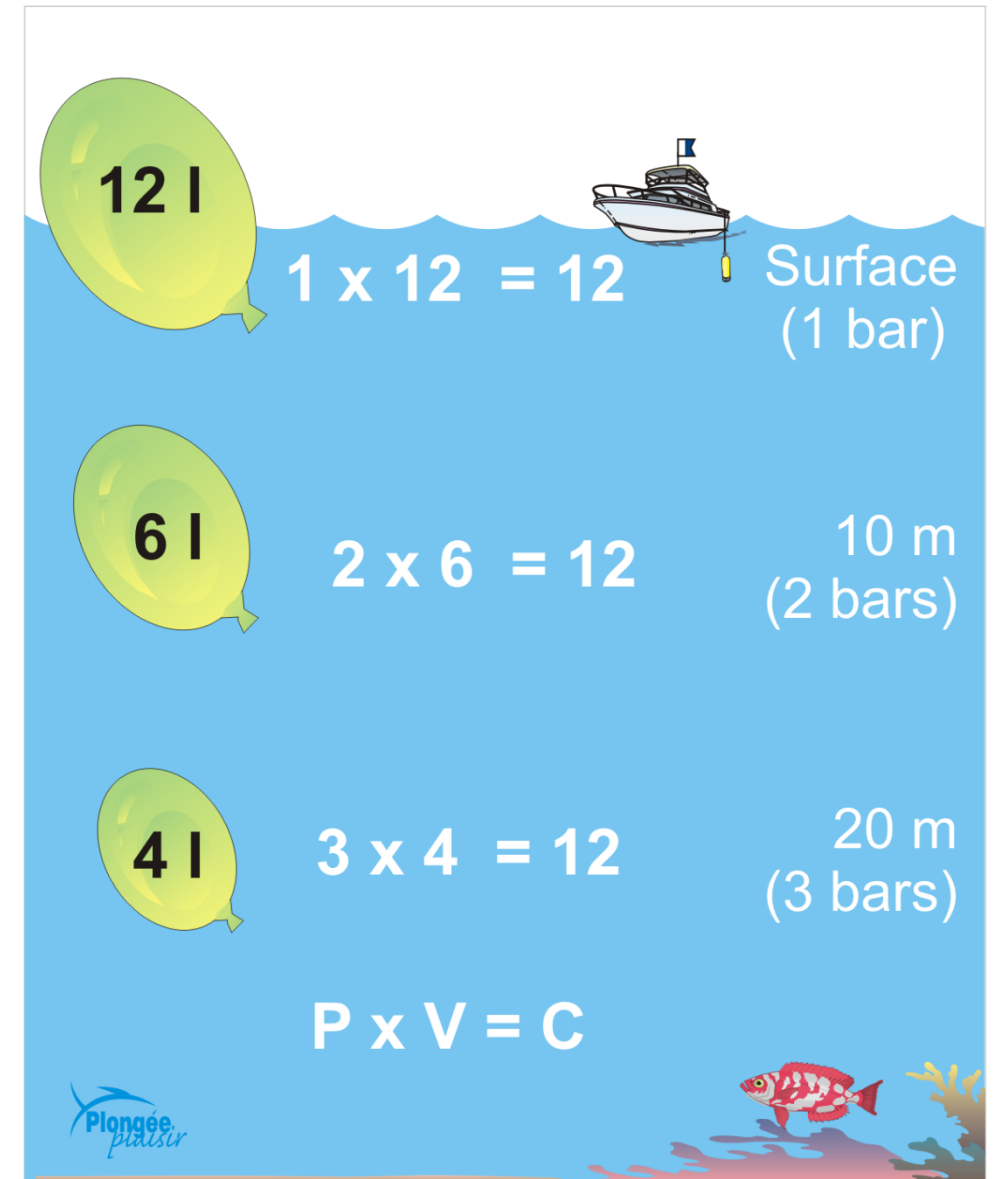
LA LOI DE BOYLE-MARIOTE

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

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

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 = \text{constante}$$

« A température constante le volume d'un gaz varie inversement proportionnellement à la pression qu'il subit. »



LA LOI DE BOYLE-MARIOTE

- **Conséquence en plongée**

- En plongée, l'air respiré est à la pression ambiante : **volume des poumons constant.**
- La pression étant plus élevée, la quantité d'air dans les poumons est donc plus importante en fonction de la profondeur.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

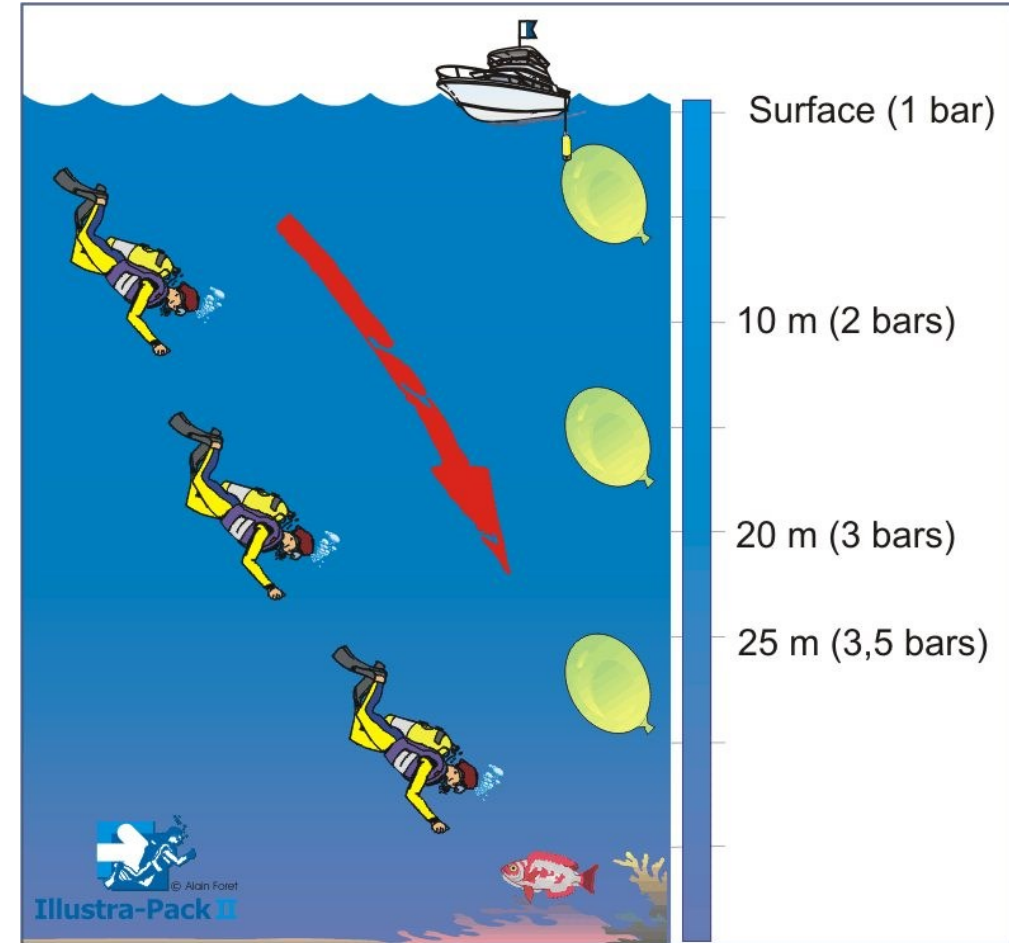
$$P_{\text{surf}} \cdot V_{\text{surf}} = P_{20\text{m}} \cdot V_{20\text{m}}$$

$$V_{\text{surf}} = (P_{20\text{m}} \cdot V_{20\text{m}}) / P_{\text{surf}}$$

Des poumons de 15l à 20 m contiennent donc :

$$V_{\text{surf}} = (3 \times 15) / 1 = 45 \text{ l d'air}$$

- Le rythme respiratoire ne change pas en plongée



LA LOI DE BOYLE-MARIOTE

- **Calcul d'autonomie**

Ex : Un plongeur dispose d'un bloc de 12 l gonflé à 200 b. En combien de temps videra-t-il son bloc en surface ? A 20 m ? A 40 m ?

Respiration du plongeur : 20 l/min

	P abs (bars)	Conso (l / min)	Contenance bloc 12 l	Autonomie (min)
Surface				
20m				
40m				



LA LOI DE BOYLE-MARIOTE

- **Calcul d'autonomie**

Ex : Un plongeur dispose d'un bloc de 12 l gonflé à 200 b. en combien de temps videra-t-il son bloc en surface ? A 20 m ? A 40 m ?

Respiration du plongeur : 20 l/min

	P abs (bars)	Conso (l / min)	Contenance bloc 12 l	Autonomie (min)
Surface	1	20	2 400	120
20m	3	60	2 400	40
40m	5	100	2 400	24



Attention lors des plongées profondes :

- Consommation : risque de panne d'air
- Impact sur les paliers

LA LOI DE BOYLE-MARIOTE

- **Calcul d'autonomie**

Ex : Un plongeur dispose d'un bloc de 12 l gonflé à 200b et plonge à 40m. Il consomme 20 l/min. Il décide de remonter lorsqu'il a 50b dans son bloc. Le temps de remontée de 40m est de 4min.

Calculer la pression restante dans son bloc lors de son retour en surface (on admet que la remontée équivaut à un séjour à mi-profondeur soit 20m).

- Calcul volume d'air restant au moment de la remontée : $P.V = 50b \times 12l = 600l$
- Consommation lors de la remontée :
 - consommation d'air à 20m : $3b \times 20 \text{ l/min} = 60 \text{ l}$
 - consommation durant la remontée : $60 \text{ l/min} \times 4 = 240l$
- Volume d'air restant à la surface : $600 \text{ l} - 240 \text{ l} = 360 \text{ l}$
- Pression restante à la surface :

$$P_{\text{bouteille}} \cdot V_{\text{bouteille}} = 360 \text{ l} \quad \text{soit } P_{\text{bout}} = 360 \text{ l} / 12 \text{ l} = 30b$$



LA LOI DE BOYLE-MARIOTE

- **Relevage des ancres**

- Calculer la pression nécessaire en bars pour relever un parachute nécessitant 103 l d'air à 30m avec une bouteille de 12 l.
 - Calcul du volume du parachute en surface :

$$\text{Loi de Boyle -Mariote : } P_{\text{surf}} \cdot V_{\text{surf}} = P_{30\text{m}} \cdot V_{30\text{m}} \quad \text{donc } V_{\text{surf}} = \frac{P_{30\text{m}} \cdot V_{30\text{m}}}{P_{\text{surf}}}$$

$$\text{donc } V_{\text{parachute surf}} = \frac{4 \times 103}{1} = 412 \text{ l}$$

- Calcul de la pression de la bouteille :

$$P_{\text{bouteille}} \cdot V_{\text{bouteille}} = 412 \text{ l} \quad \text{soit } P_{\text{bout}} = 412 \text{ l} / 12 \text{ l} = 34\text{b}$$



LA LOI DE BOYLE-MARIOTE

- **Calcul d'autonomie – conséquences en plongée (surtout en plongée profonde)**
 - Planification de la plongée impérative
 - Intégrer le temps de remontée lors de la planification
 - Respecter impérativement la planification
 - Eviter les situations augmentant la durée de la plongée : dernière photo...
 - Prévoir une marge de sécurité pour gérer d'éventuels aléas
 - **Adapter la communication concernant la consommation** : mi-bouteille et réserve (fonction de la plongée)
 - Attention au relevage d'ancre : consommation, palier

LA LOI DE BOYLE-MARIOTE

- **L'influence de la température**

Pourquoi après le gonflage, la pression dans un bloc redescend ?

- La loi de Boyle – Mariote est valable à température constante
- Si la température varie, alors le rapport $P.V$ varie proportionnellement à la température : $\frac{P.V}{T} = \text{constante}$
- Pour un volume constant (comme une bouteille de plongée) : $\frac{P}{T} = \text{constante}$ Loi de Charles

Donc $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \text{constante}$, avec P en bars et T en Kelvin (K)

Pendant le gonflage, le bloc chauffe (frottement des particules d'air mises sous pression). Après gonflage, il refroidit et donc sa pression diminue.

Conversion °C en K

$$K = ^\circ C + 273K$$



LA LOI DE BOYLE-MARIOTE

- **L'influence de la température**

Ex : Calculer la pression d'un bloc gonflé à 200b après refroidissement.

- Température en fin de gonflage : 50°C
- Température 2h après gonflage : 20°C

$$\frac{200}{50+273} = \frac{P_2}{20+273} \text{ donc } P_2 = \frac{200}{50+273} \times (20+273) = 181 \text{ b}$$



Tenir compte du gonflage lors de la planification de la plongée
Attention aussi si les blocs sont exposés au soleil



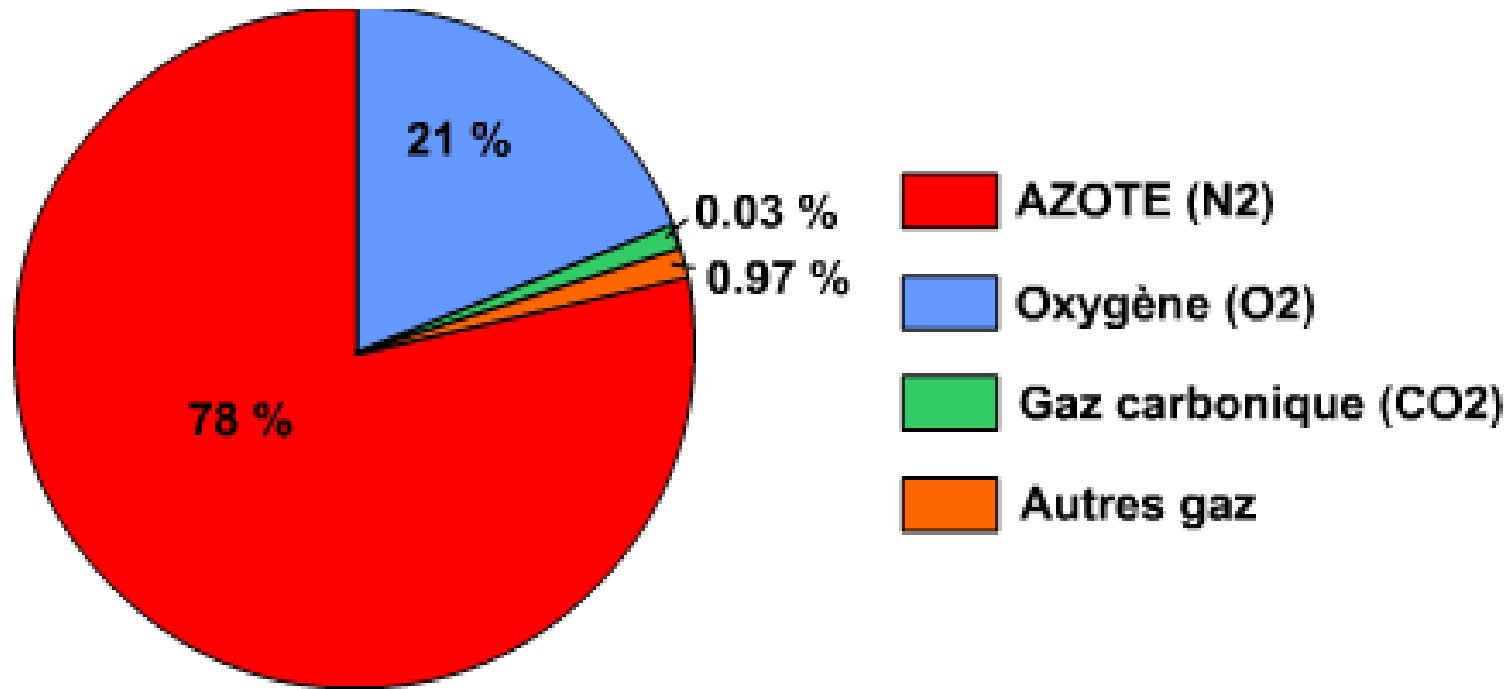
$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Conversion °C en K

$$K = ^\circ C + 273K$$

LES PRESSIONS PARTIELLES

- Composition de l'air

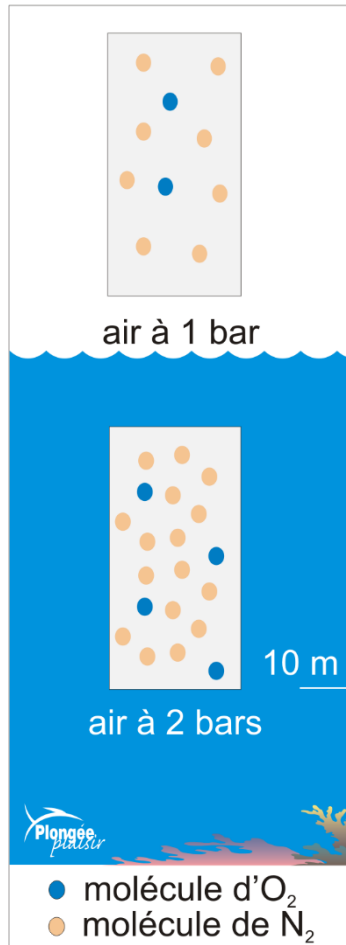


Pour simplifier

- 21% d'O₂
- 79% de N₂

LES PRESSIONS PARTIELLES

- **Pression des gaz – Loi de Dalton**



- Pression d'un mélange gazeux = somme de la pression de chaque gaz qui le compose (somme des pressions partielles)

$$P_{\text{air}} = P_{\text{pO}_2} + P_{\text{pN}_2}$$

P_{pO_2} : pression partielle de l'oxygène

P_{pN_2} : pression partielle de l'azote

- Si la pression augmente alors les P_p augmentent

$P_p \text{ d'un gaz} = \% \text{ de ce gaz} \times \text{Pression absolue du mélange}$

Loi de Dalton

Ex :

- $P_{\text{pO}_2} \text{ à } 3\text{b} = \% \text{O}_2 \times 3 = 0,6\text{b}$
- $P_{\text{pN}_2} \text{ à } 3\text{b} = \% \text{N}_2 \times 3 = 2,4\text{b}$

LES PRESSIONS PARTIELLES

- **Conséquences en plongée**

- Le corps humain est sensible à la pression partielle des gaz en présence
- Certains gaz peuvent devenir toxiques pour le corps humain en fonction de leur pression partielle
⇒ Voir le cours sur les accidents en plongée

Ex : Calculer la limite de la plongée à l'air sachant que le N_2 est nocif pour le corps humain si $PpN_2 > 5,6b$

- $Pp N_2 = \% N_2 \times P_{abs}$ d'où $P_{abs} = \frac{PpN_2}{\%N_2}$
- $P_{abs} = \frac{PpN_2}{\%N_2} = \frac{5,6}{0,8} = 7 \text{ b}$ soit 60m, **c'est la profondeur limite pour la plongée à l'air**



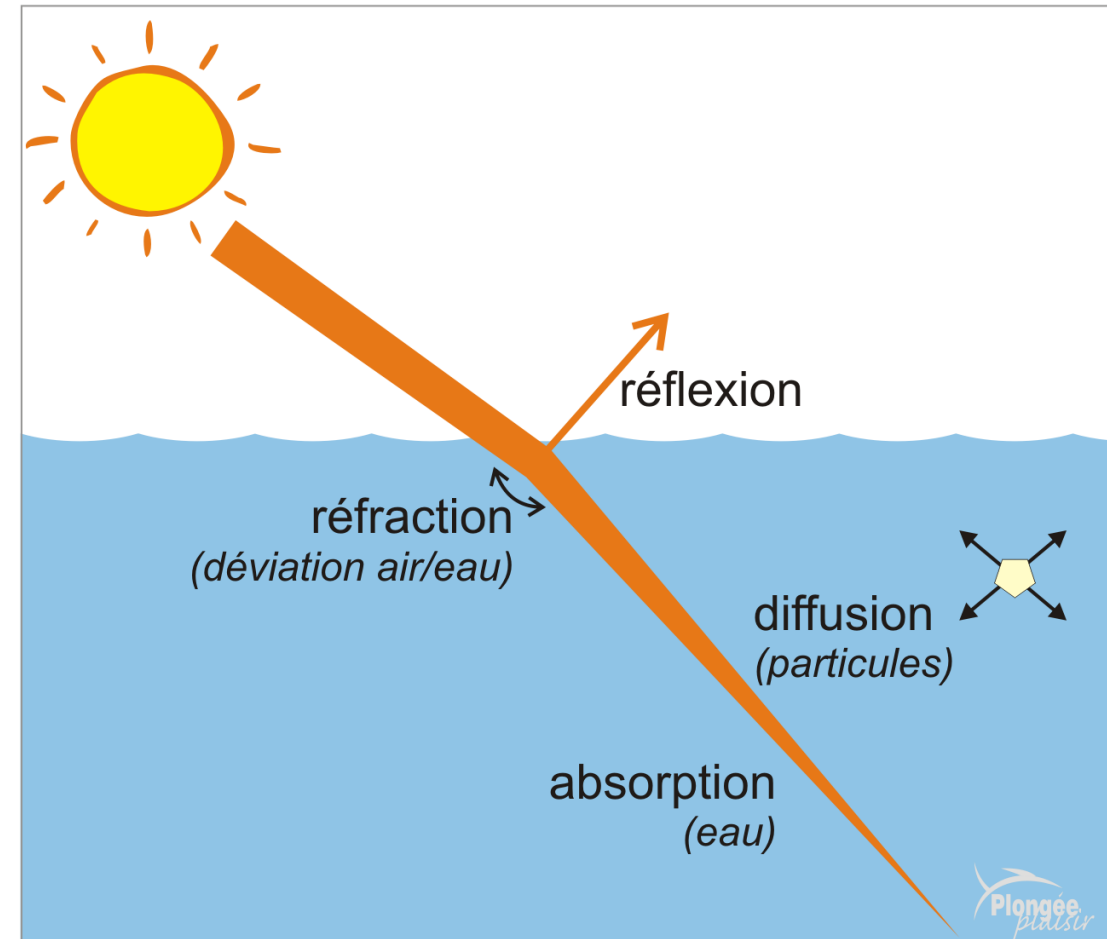
LA VISION EN PLONGÉE

- **La réfraction**

- Un rayon lumineux est dévié lorsqu'il change de milieu
- La vitesse de la lumière est différente dans l'air (300 000 km/s) et dans l'eau (225 000 km/s)

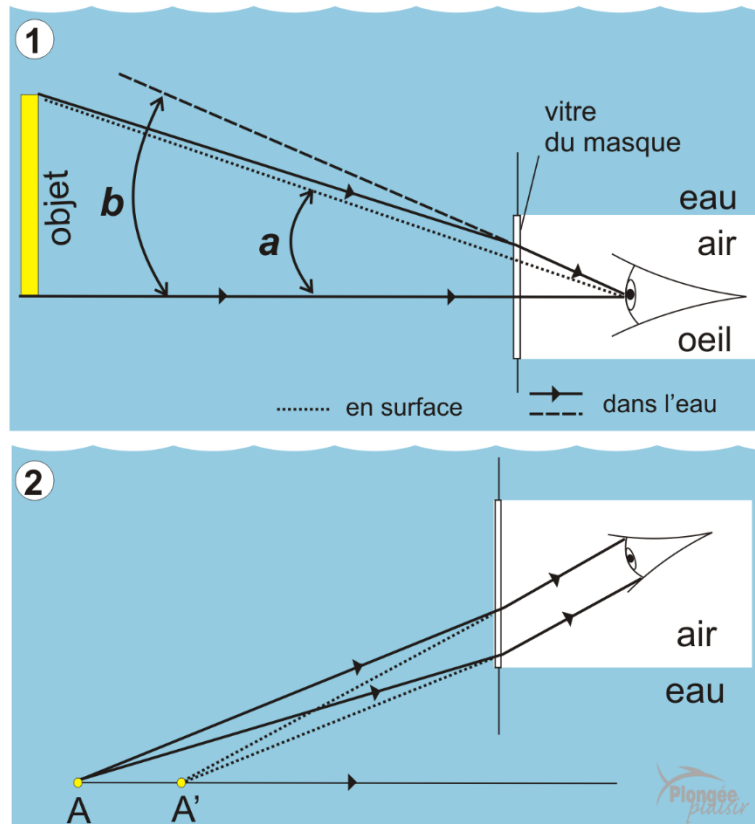
C'est l'effet du bâton brisé

- Avec un masque l'œil est dans l'air et ce que nous percevons est dans l'eau



LA VISION EN PLONGÉE

- La réfraction



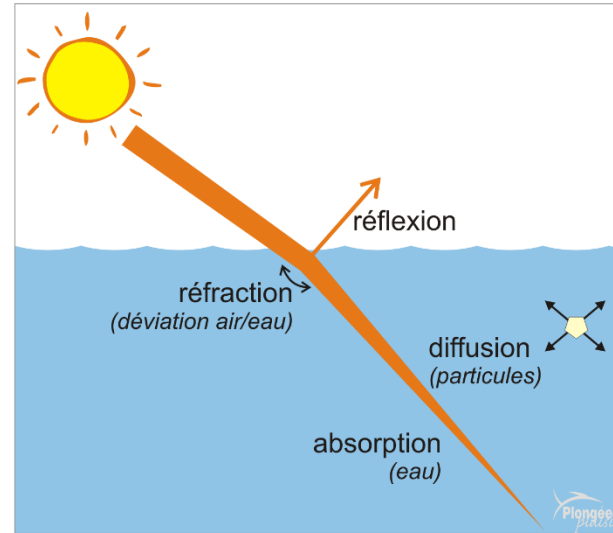
- les objets sont 1/3 plus grand :
⇒ un requin de 3 m apparaîtrait 4 m
- les objets sont 1/4 plus près :
⇒ un requin situé à 8 m semble à 6 m



Impact pour certains plongeurs

LA VISION EN PLONGÉE

- L'absorption et la réflexion

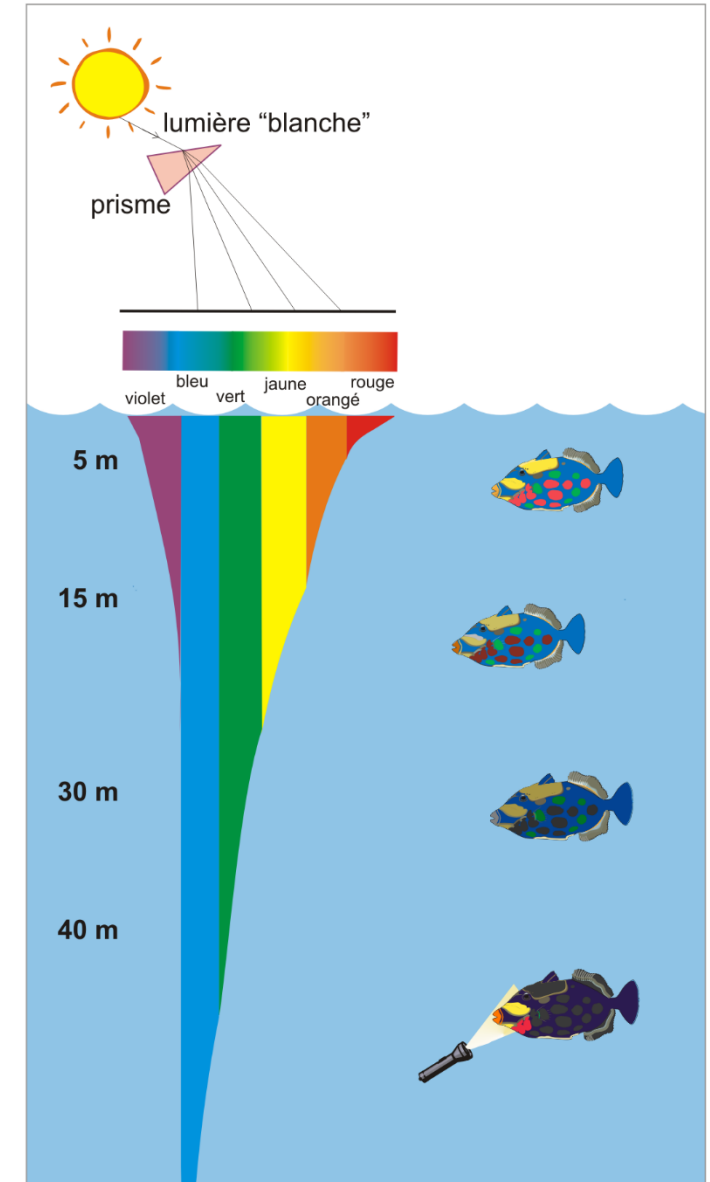


- L'eau absorbe les couleurs qui composent la lumière de façon :
 - qualitative : disparition des couleurs
 - quantitative : diminution de la lumière
- Les substances en suspension modifient l'absorption : l'Atlantique est plus vert que la Méditerranée

⇒ le plancton absorbe plus le bleu que le vert

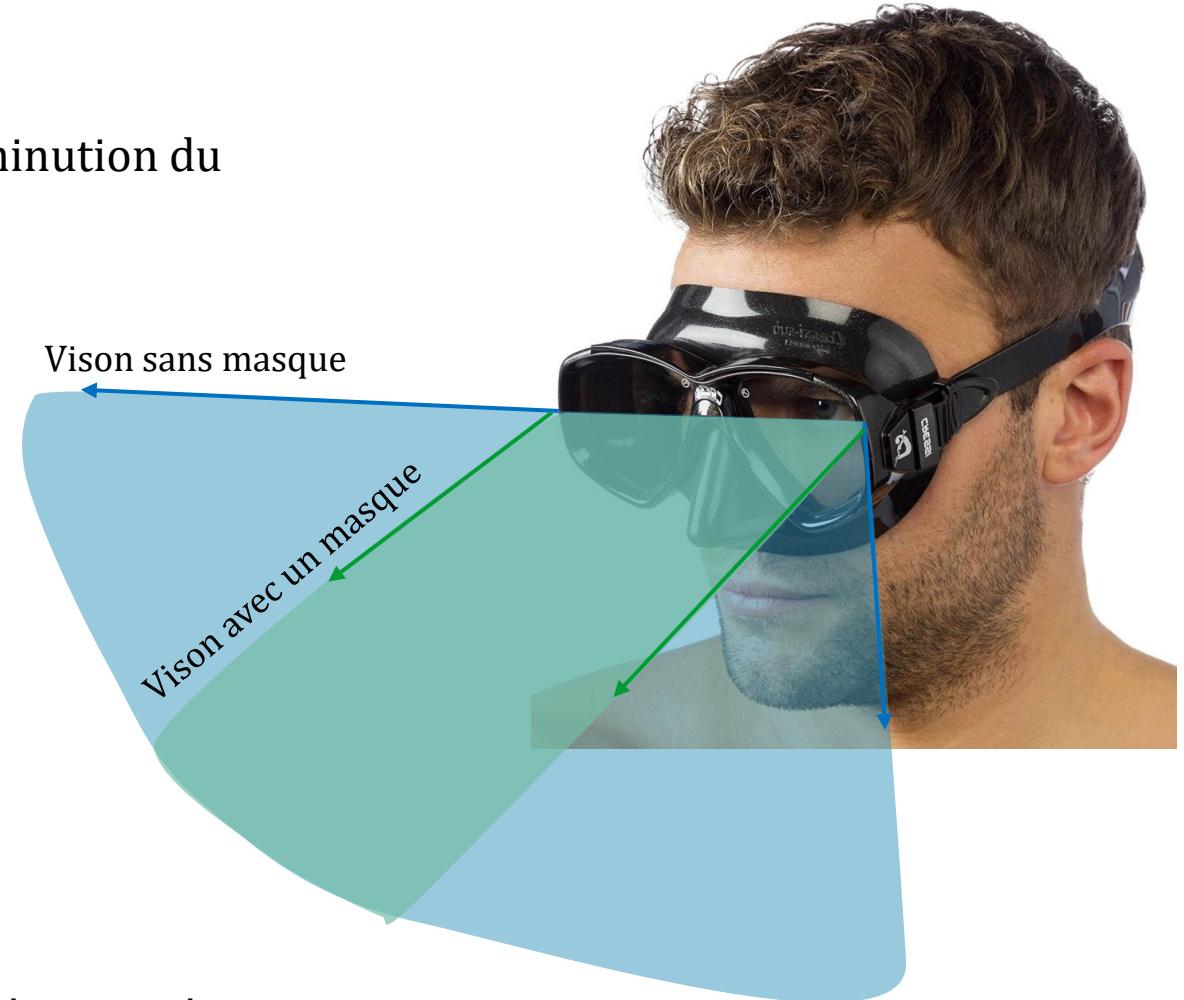


Impact pour certains plongeurs



LA VISION EN PLONGÉE

- **Le masque de plongée**
 - Permet de voir sous l'eau mais entraîne une diminution du champ de vision périphérique



À prendre en compte lors de la communication par signe

L' ACOUSTIQUE EN PLONGÉE

- **La propagation du son**

- Le son se propage sous forme d'onde
- Sa vitesse dépend de la densité du milieu
 - L'eau est plus dense que l'air : les molécules d'eau transmettent mieux les vibrations que les molécules d'air

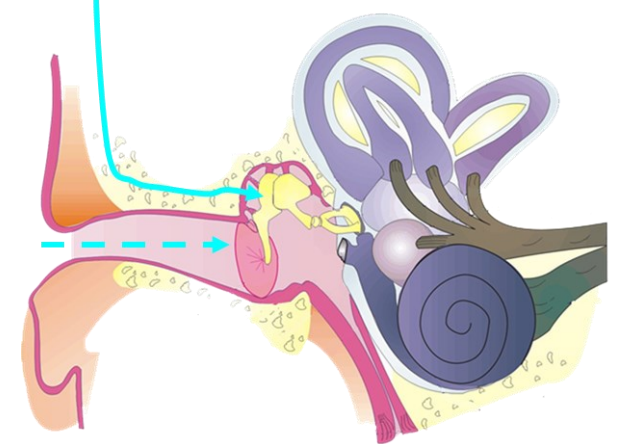
Milieu	Vitesse de propagation du son
Air	$\approx 330 \text{ m/s}$
Eau	$\approx 1\,530 \text{ m/s}$

- Impossibilité de connaître la localisation d'un son 
- Son audible de très loin 



Impact pour certains plongeurs

Transmission du son par les os crâniens vers les osselets



DES QUESTIONS ?

