

# Plongée sous-marine

## Eléments de physique

JP Pousset - 2012



# L'air

Composition :

Element	Pourcentage
N <sub>2</sub>	78,08%
O <sub>2</sub>	20,95%
Ar	0,93%
CO <sub>2</sub>	0,035%
Ne	0,00182%
He	0,00052%
NO	0,00050%
Kr	0,00011%
CH <sub>4</sub>	0,00017%
H <sub>2</sub>	0,00005%
N <sub>2</sub> O	0,00005%
Xe	0,000009%
NO <sub>2</sub>	0,000002%
O <sub>3</sub>	0,000001%

Pour la suite, on conviendra : O<sub>2</sub> = 21% et N<sub>2</sub> = 79%

# L'air

Masse volumique :

$\theta$ en °C	$\rho$ en kg/m <sup>3</sup>
-10	1,341
- 5	1,316
0	1,293
+ 5	1,269
10	1,247
15	1,225
20	1,204
25	1,184
30	1,164
35	1,146

# Notion de poids - masse

---

Attention, ne pas confondre poids et masse

Poids = newtons

Masse = kg

Je pèse 589 N, et j'ai une masse de 60 kg

Poids = masse . g

g, sur terre =  $9,81 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$

# La pression

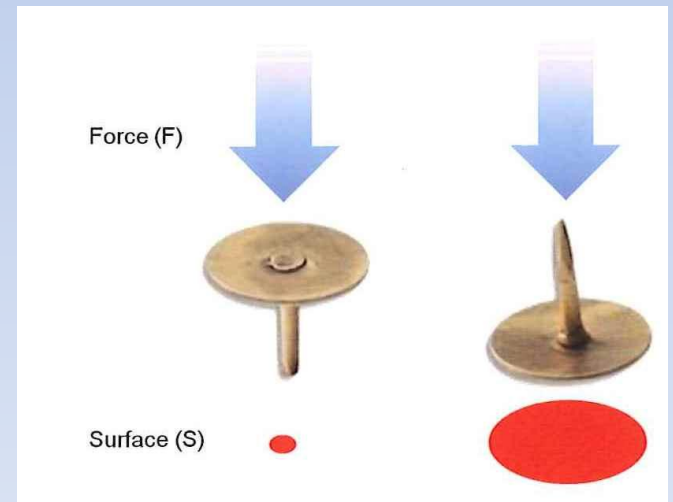
La pression est une force s'exerçant par unité de surface

$$P = \frac{F}{S}$$

P = la pression (Pascals)

F = La force exercée (Newtons)

S = La surface (m<sup>2</sup>)



# La pression

---

## Equivalences

$$1\text{bar} = 1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 10 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} = 760 \text{ mm Hg} = 101.300 \text{ Pa}$$

# La pression

## Pression atmosphérique

Due à la colonne d'air au-dessus de nous

$$P_{0m} = 1 \text{ bar}$$

$$P_{1000m} = 0,9 \text{ bar}$$

$$P_{2000m} = 0,8 \text{ bar}$$

$$P_{3000m} = 0,7 \text{ bar}$$

Ceci est une simplification des calculs, car la diminution est exponentielle en fonction de l'altitude

# La pression

## La pression hydrostatique

Due à la colonne d'eau au-dessus de nous

Par 10 m d'eau :

eau douce ( $\rho=1 \text{ kg/l}$ ) : + 1bar

eau de mer ( $\rho=1,026 \text{ kg/l}$ ) : + 1,026 bar

A 60m, le delta entre les 2 = 0,156 bars.....

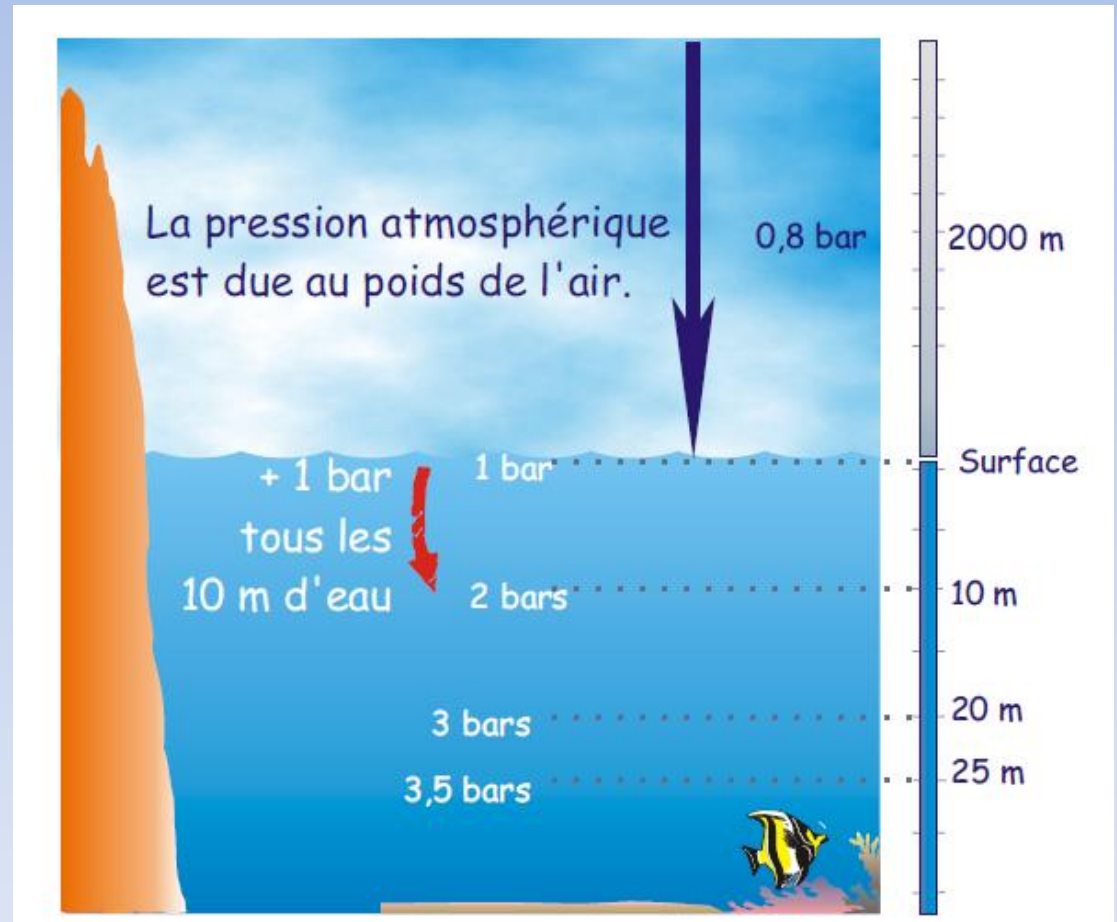
On prendra donc 1 bar/10m par convention



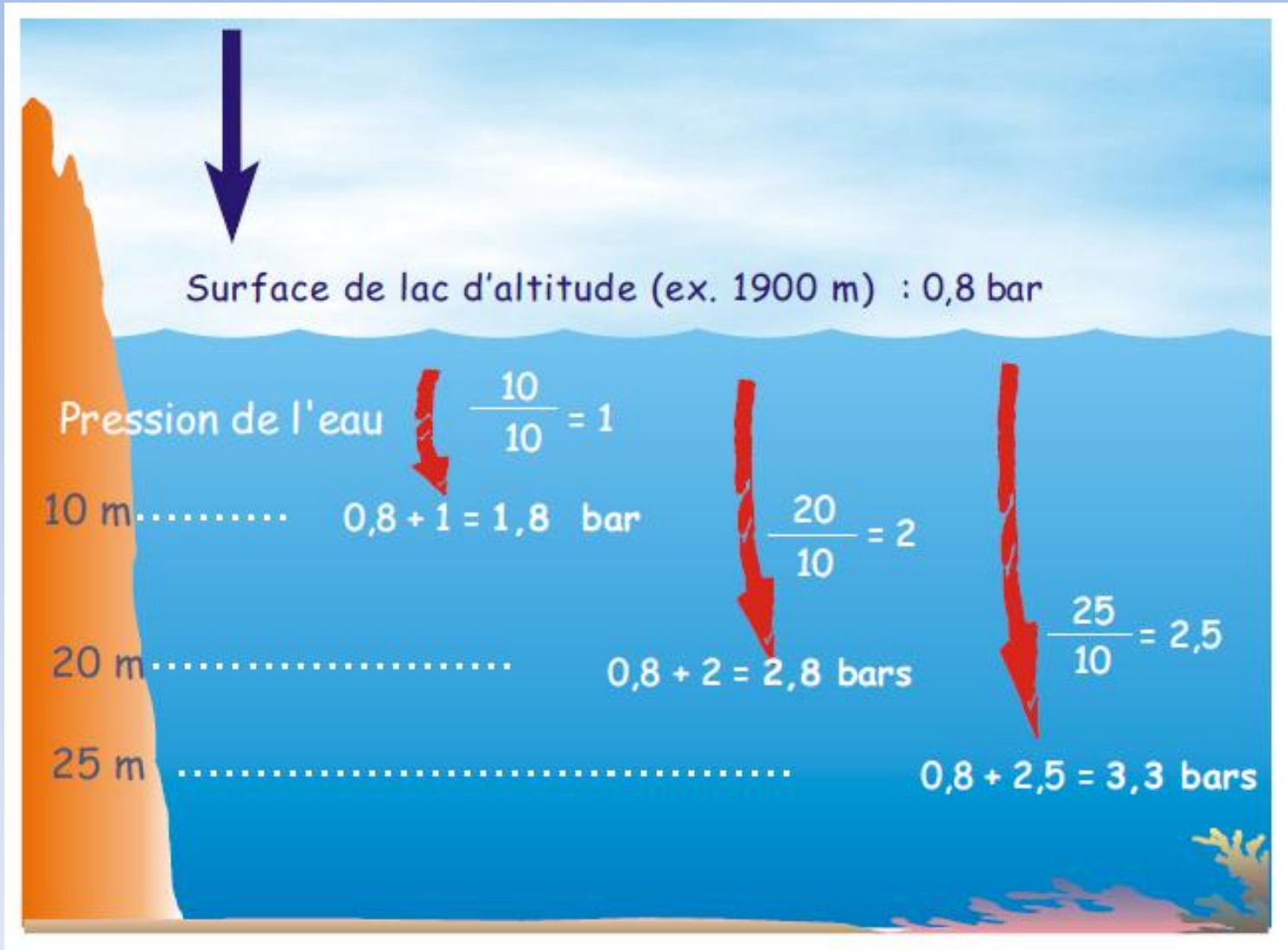
# La pression

## Pression absolue

C'est la somme  
de la pression  
atmosphérique et  
de  
la pression  
hydrostatique



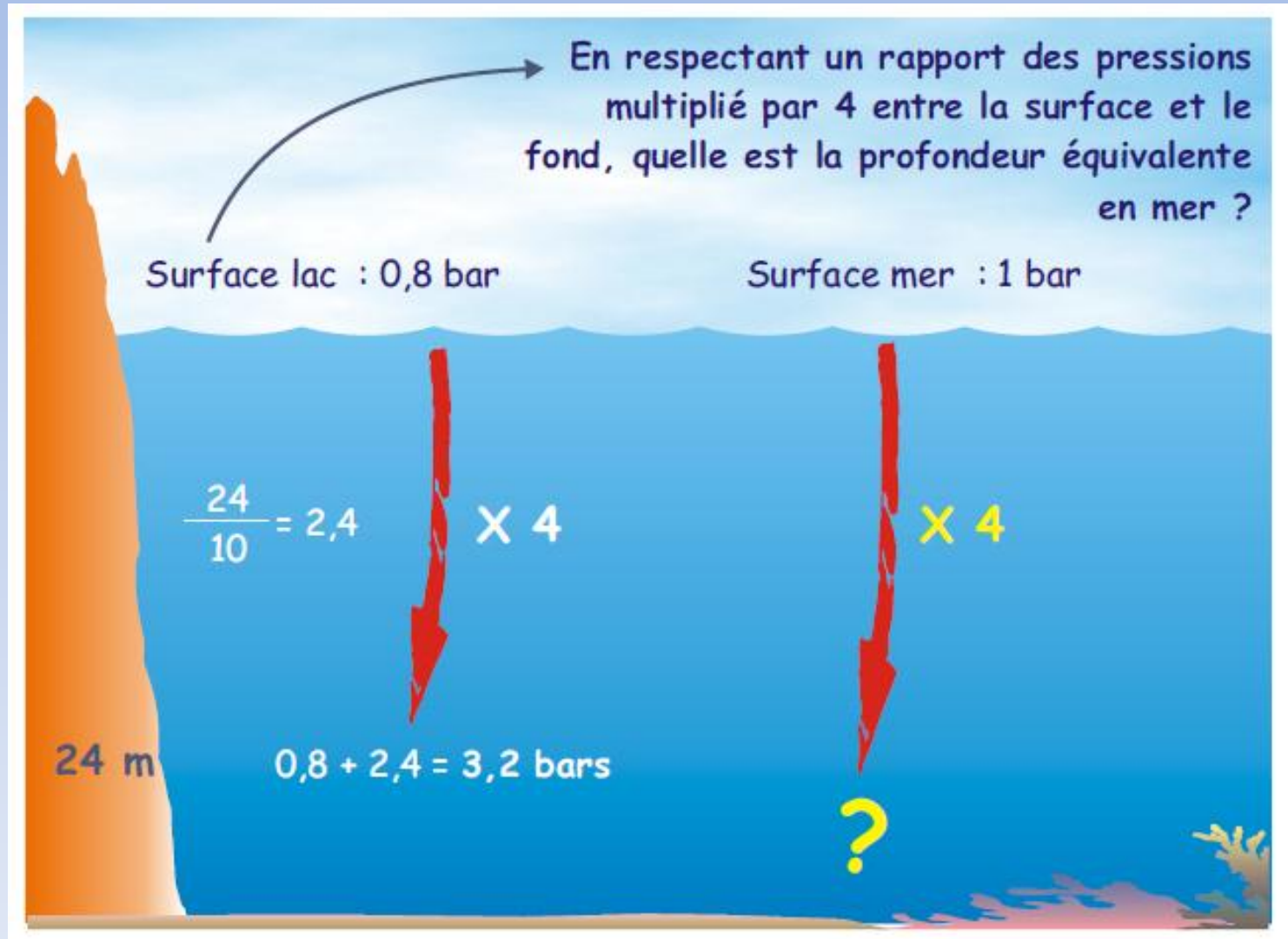
# Pression et altitude



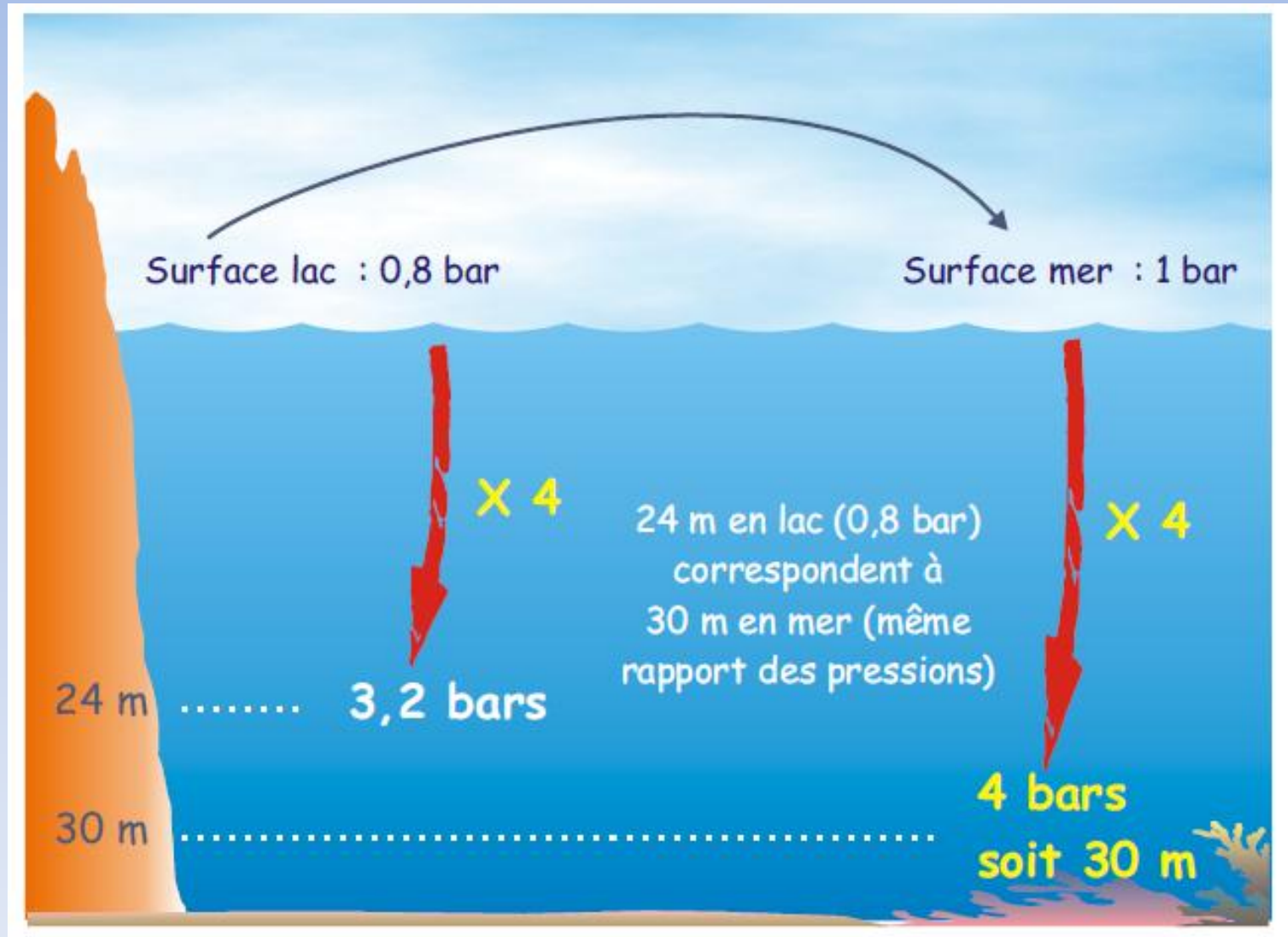
x 2,25

x 3,5

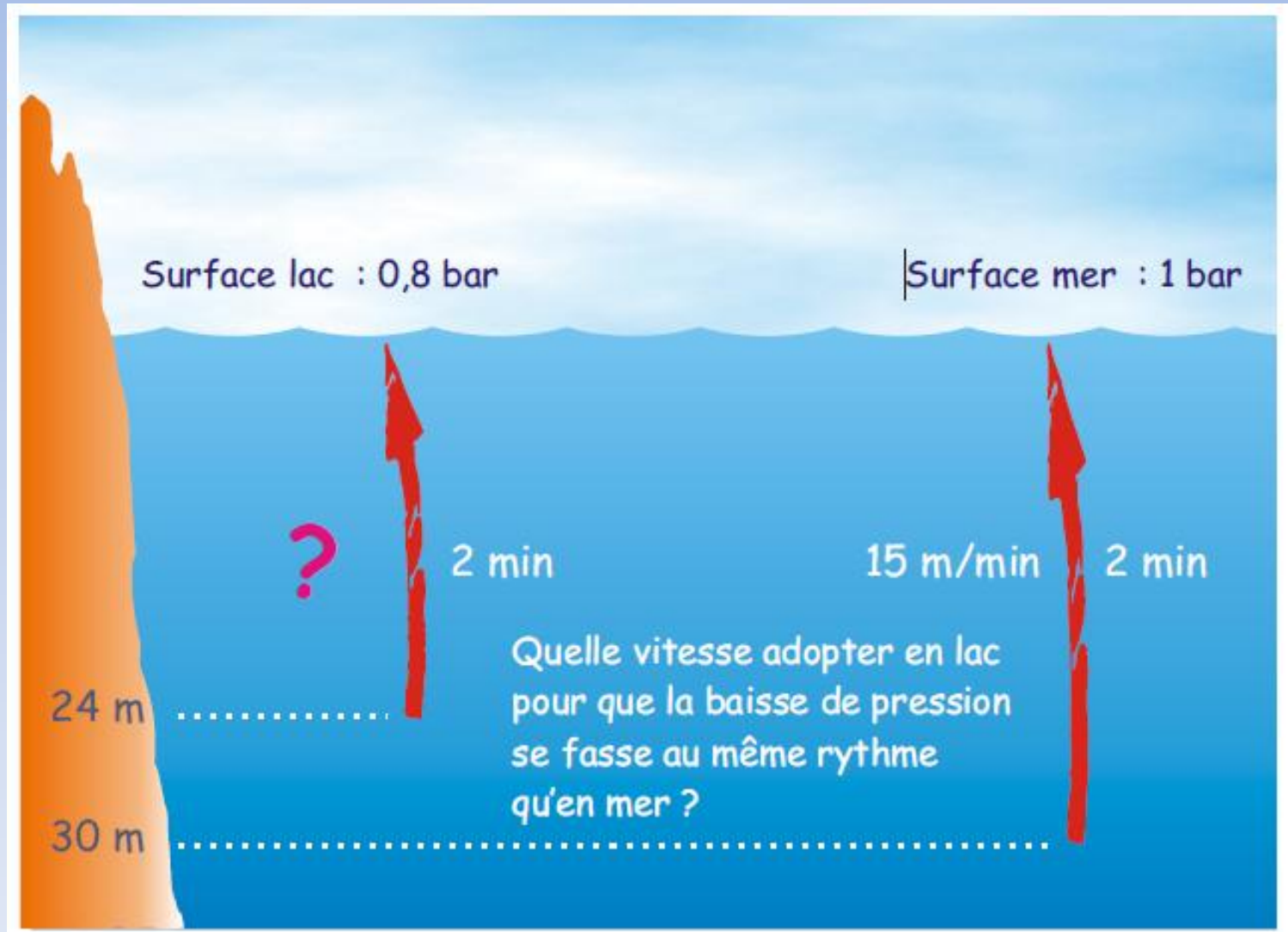
# Pression et altitude



# Pression et altitude

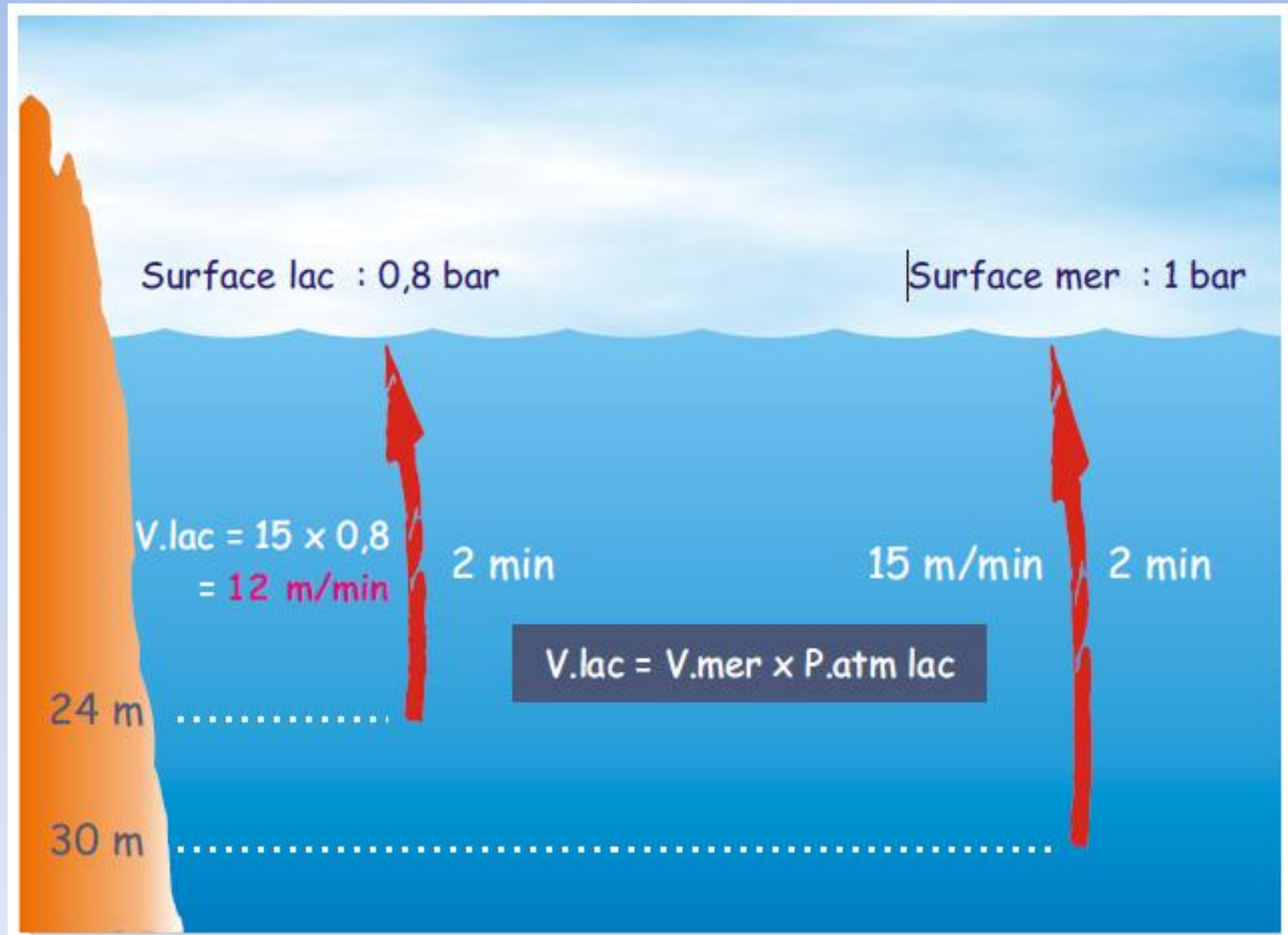


# Pression et altitude

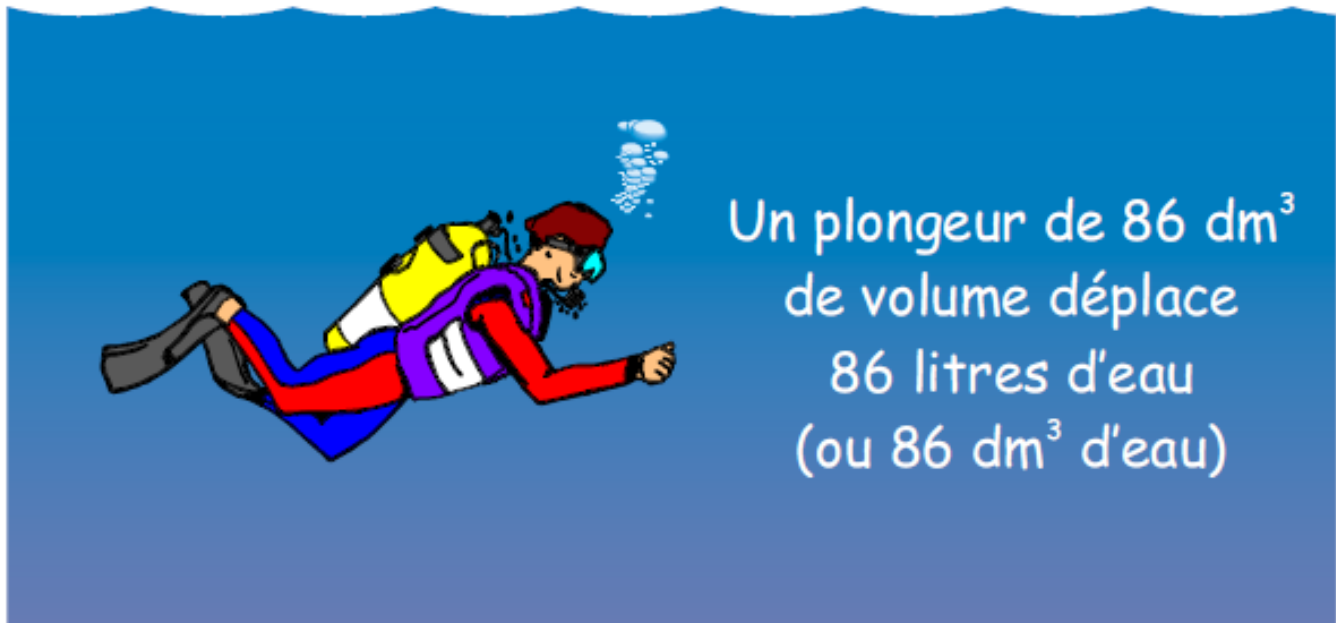
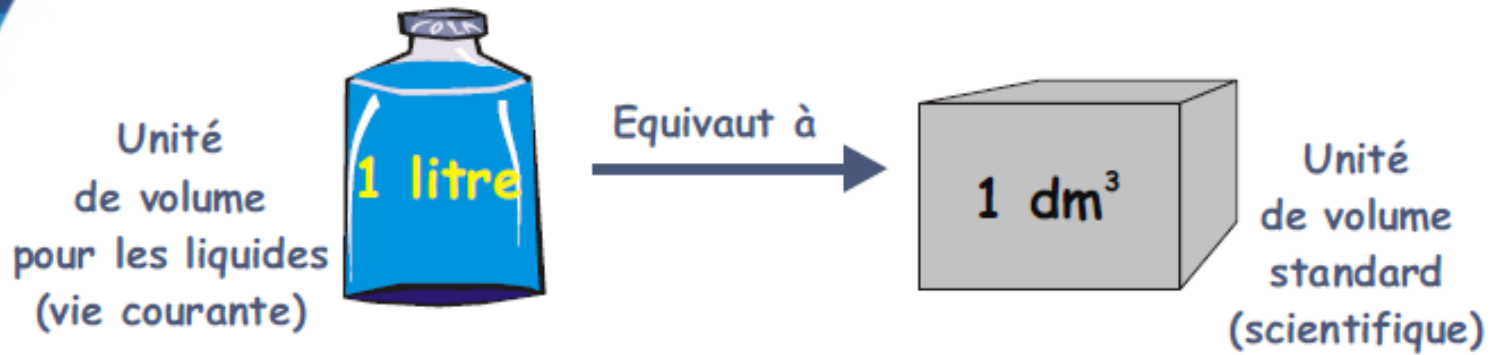




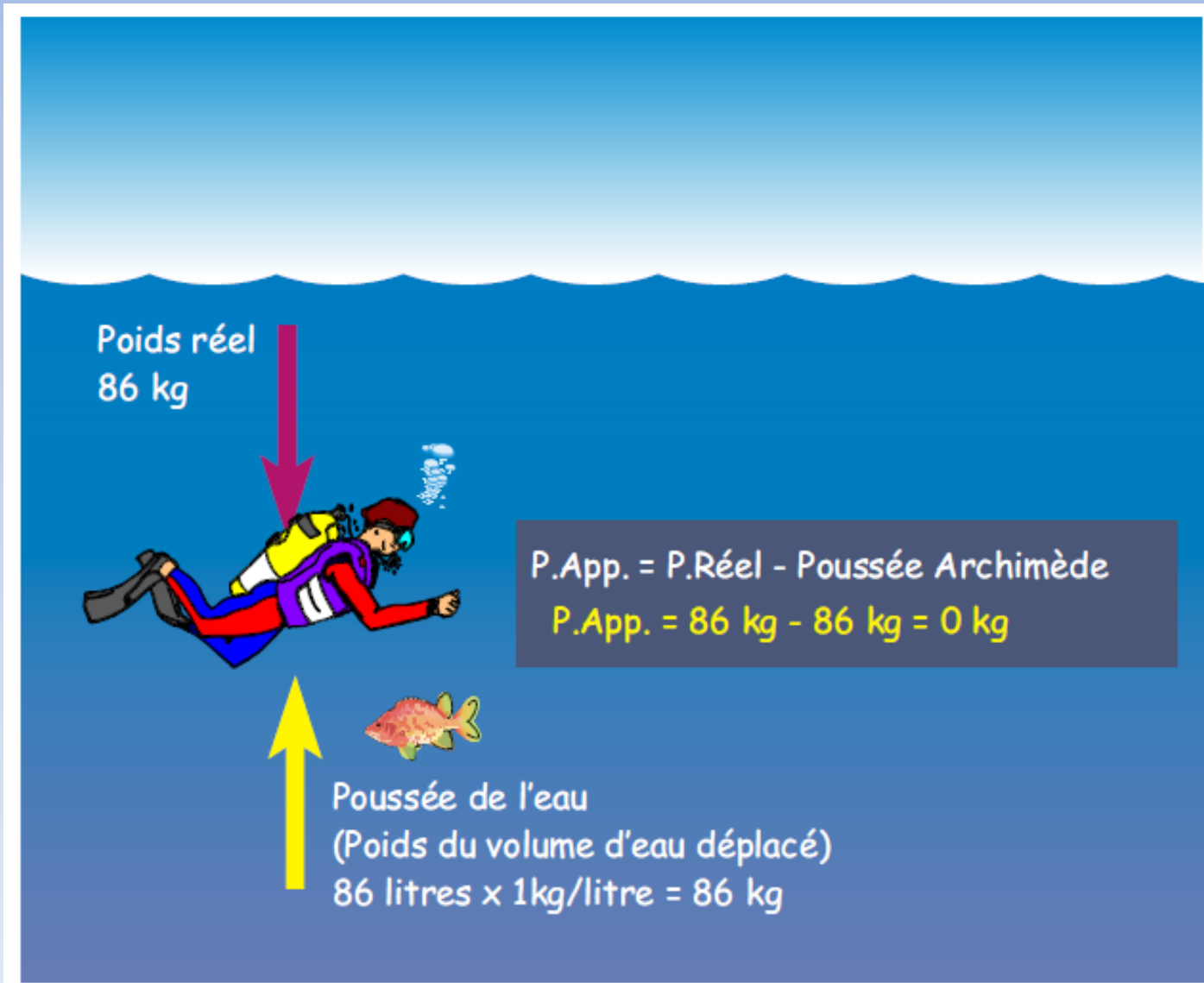
# Pression et altitude



# Poussée d'Archimède

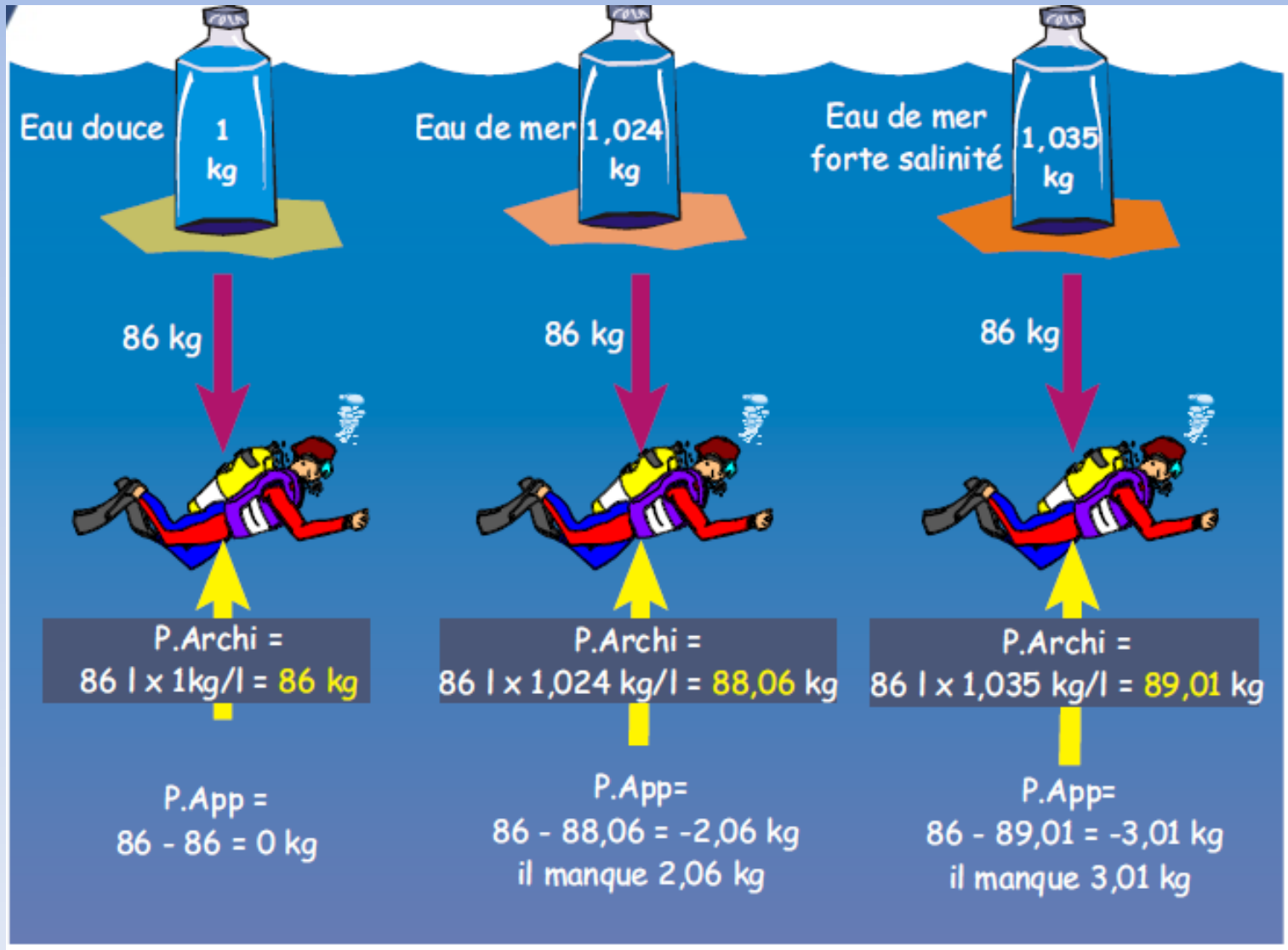


# Poussée d'Archimède





# Poussée d'Archimède



# Poussée d'Archimède

The diagram shows a lead block submerged in water. A large red arrow points down from the top left, labeled "Poids réel 11,30 kg". The block itself is labeled "Plomb 1 dm<sup>3</sup> 11,30 kg". A yellow arrow points up from the bottom of the block, labeled "P. Archi 1 kg". To the right, a smaller diagram shows the forces on the block: a red arrow down labeled "Poids réel 11,30 kg", a pink arrow down labeled "Poids apparent 10,30 kg", and a yellow arrow up labeled "P. Archi 1 kg".

Poids réel  
11,30 kg

Plomb  
1 dm<sup>3</sup>  
11,30 kg

Poids réel  
11,30 kg

Poids apparent  
10,30 kg

P. Archi  
1 kg

P. Archi = 1 l × 1kg/l = 1 kg

$P.App = 11,30 \text{ kg/dm}^3 - 1\text{kg/dm}^3 = 10,30 \text{ kg}$

1 litre  
1kg

Dans cet exemple, le lest immergé déplace  
1 dm<sup>3</sup> d'eau soit 1 litre.

# Poussée d'Archimède

Dans l'eau, 1 kg de fer  $\neq$  1 kg de plomb ...

$$1 \text{ kg Pb} = 0,088 \text{ dm}^3 \quad (\rho = 11,35 \text{ kg/dm}^3) \text{ (1,44 x plus lourd)}$$

$$1 \text{ kg Fe} = 0,127 \text{ dm}^3 \quad (\rho = 7,874 \text{ kg/dm}^3)$$

Poids relatif dans l'eau d'1 kg surface :

$$\text{Pb : } 1 - 0,088 \times 1 = 0,912 \text{ kg}$$

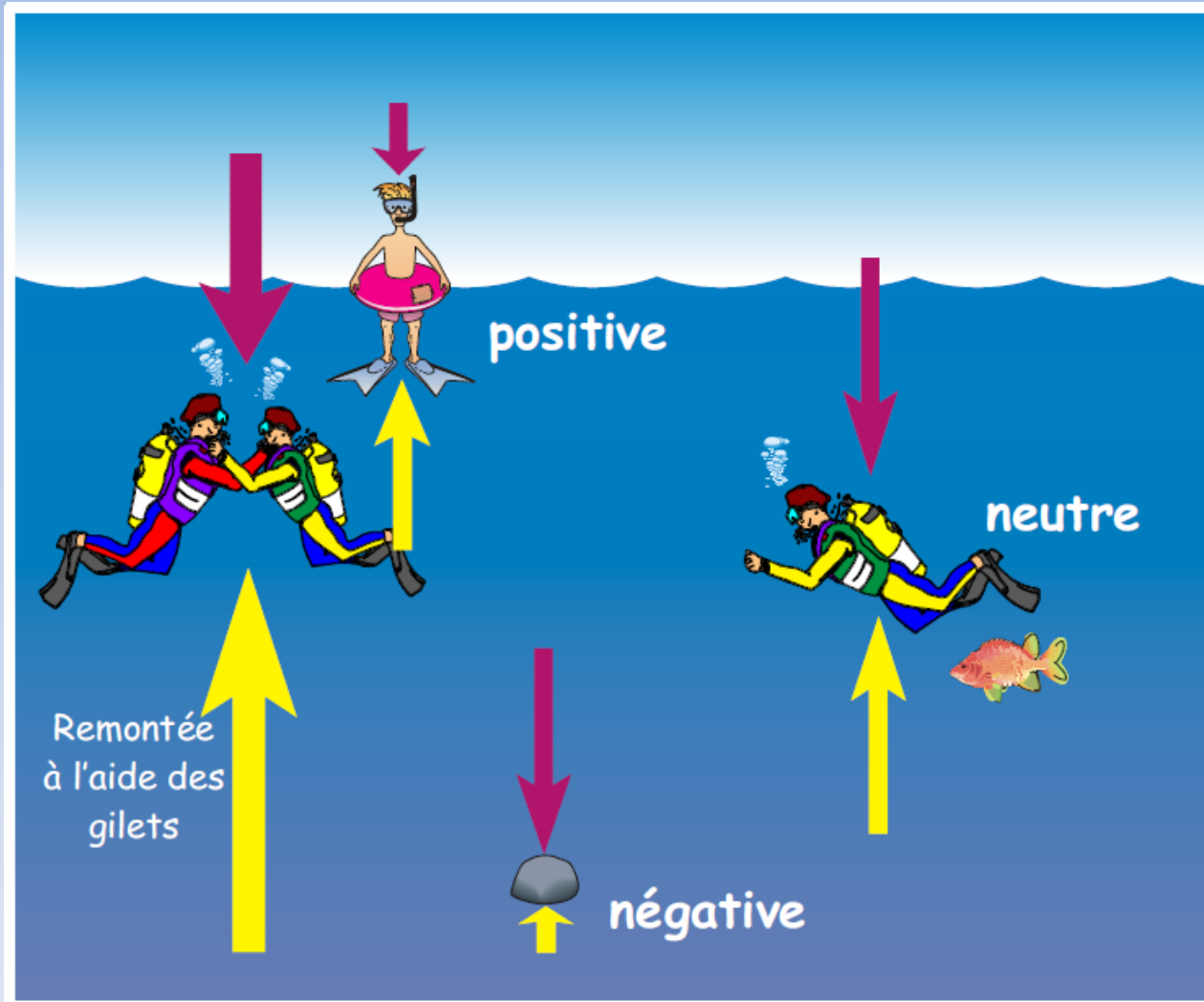
$$\text{Fe : } 1 - 0,127 \times 1 = 0,873 \text{ kg}$$

Pour un lestage de 10 kg relatifs dans l'eau :

$$\text{Pb : } 0,966 \text{ dm}^3$$

$$\text{Fe : } 1,455 \text{ dm}^3 \text{ (1,51 x plus)}$$

# Flottabilité



# Flottabilité

---

## Facteurs influençant la flottabilité

### Facteurs statiques :

- Combinaison
- Plombage
- Bouteille (matériau)
- Masse corporelle vs volume corporel
- Salinité
- Température de l'eau

# Flottabilité

---

## Facteurs influençant la flottabilité

### Facteurs dynamiques :

- Gilet stabilisateur
- Combinaison
- Poumon ballast
- Vidage de la bouteille
- Variations de la salinité
- Variations de la température de l'eau

# Lois élémentaires

## Loi des gaz parfaits

$$P.V=n.R.T$$

P = pression (pascals)

V = volume (m<sup>3</sup>)

n = nombre de m<sup>o</sup>les de gaz

R = constante des gaz parfaits (8,31 J.K<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>)

T = température (°K)

Gaz parfait = modèle thermodynamique décrivant le comportement des gaz réels à basse pression. On estime que les molécules sont suffisamment éloignées les unes des autres pour négliger les relations électrostatiques entre elles.

# Lois élémentaires

---

## Notions de température

° Celcius (t) :

0° = état limite de l'eau – glace

100° = état limite du passage de la phase liquide à vapeur

° Kelvin (T) :

0°K = -273° C (zéro absolu)

273°K = 0 °C

373°K = 100° C ...



# Lois élémentaires

## Lois dérivant de la loi des gaz parfaits

Considérons un gaz que l'on comprime, sans changement de température :

$$P_1 \cdot V_1 = n \cdot R \cdot T$$

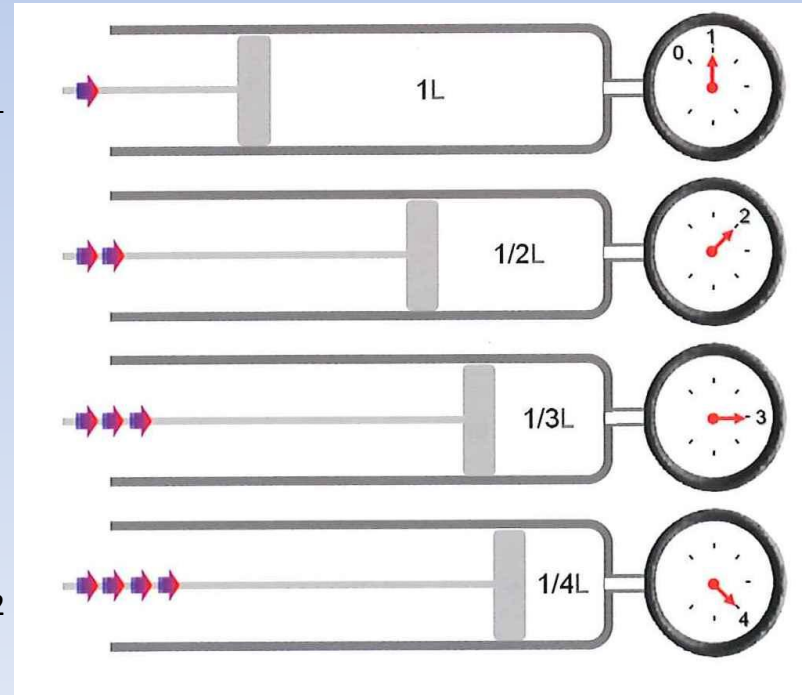
$$P_2 \cdot V_2 = n \cdot R \cdot T$$

Alors

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

Loi de Boyle et Mariotte

$P_1, V_1$



$P_2, V_2$

# Lois élémentaires

Remplissage d'une bouteille de 15l à 200 bars

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

$$P_1 = 1 \text{ bar}$$

$$P_2 = 200 \text{ bars}$$

$$V_2 = 15 \text{ litres}$$

$$V_1 = \frac{P_2 \cdot V_2}{P_1} = \frac{15 \cdot 200}{1} = 3.000 \text{ litres} = 3 \text{ m}^3$$

# Lois élémentaires

La masse d'air d'une bouteille sera ( à 20°C):

15 l, 200 bars  $\longrightarrow$  3 m<sup>3</sup>  $\longrightarrow$  3,6 kg

15 l, 50 bars  $\longrightarrow$  0,75 m<sup>3</sup>  $\longrightarrow$  0,9 kg

Soit une diminution de 2,7 kg

Attention au sous-lestage en fin de plongée (paliers .....)

# Lois élémentaires

## Exercice d'application.

Une ancre en fer de densité =  $8 \text{ kg/dm}^3$  et d'un volume de  $4 \text{ dm}^3$  est immergée sur un fond de 20m.

On doit la remonter à l'aide d'un parachute.

- Combien d'air équivalent surface faudra-t-il injecter ?
- Sachant que l'on dispose d'un bloc de 15L, de combien de bars aura baissé votre manomètre du fait du gonflage du parachute ?

On considère la densité de l'eau =  $1 \text{ kg/dm}^3$

# Lois élémentaires

Solution.

$$\text{Masse de l'ancre} = 8 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \times 4 \text{ dm}^3 = 32 \text{ kg}$$

$$\text{Masse apparente de l'ancre} = 32 \text{ kg} - 4 \text{ dm}^3 \times 1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 28 \text{ kg}$$

On doit donc injecter 28 litres d'air à 20m (3bars)

Soit un équivalent surface de  $3 \times 28 = 84$  litres

Mon bloc aura baissé de  $84 / 15 = 5,6$  bars

# Lois élémentaires

## Lois dérivant de la loi des gaz parfaits

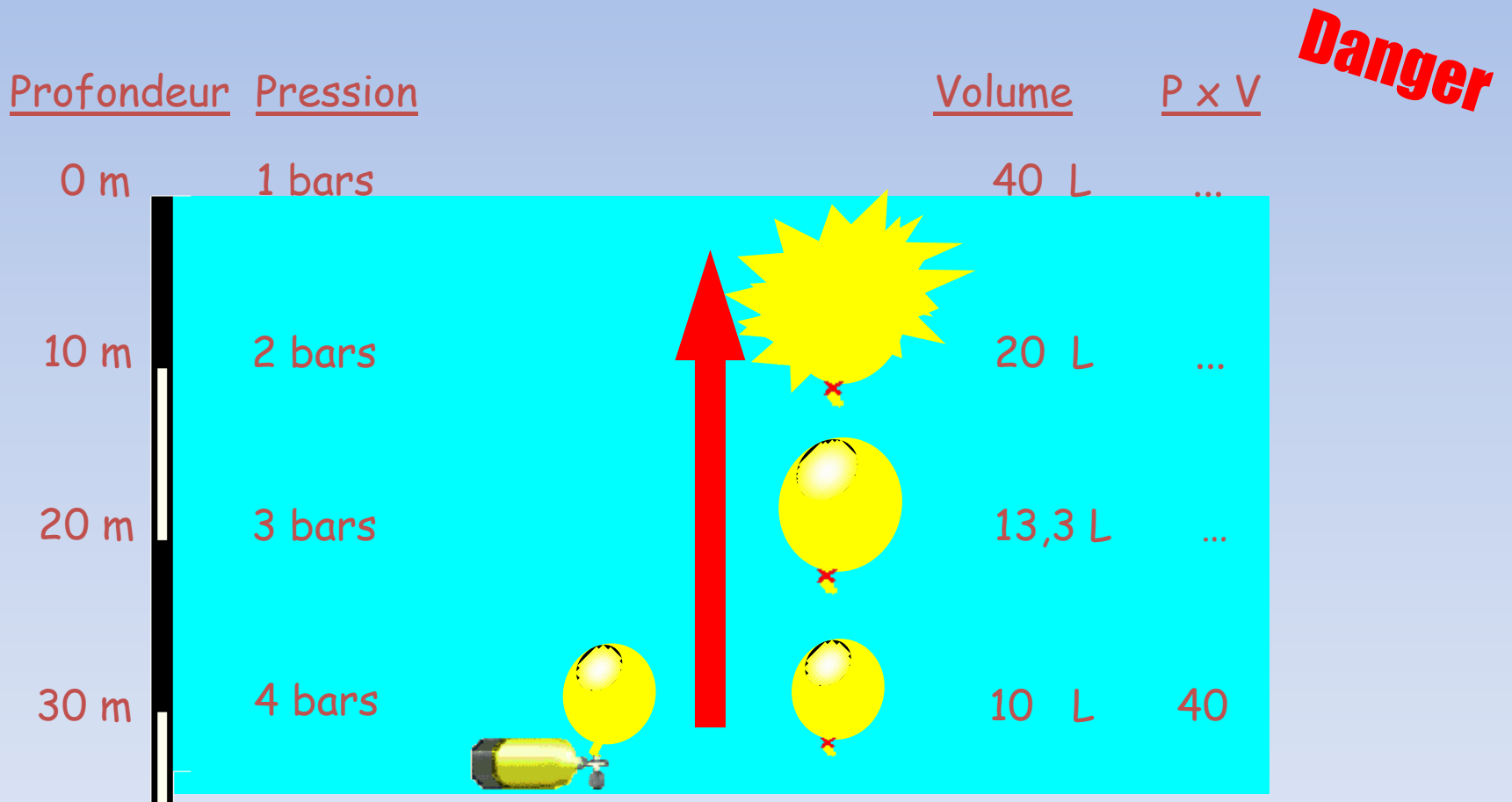
Considérons un gaz que l'on refroidit, sans changer le volume:

$$P_1 \cdot V = n \cdot R \cdot T_1 \quad \longrightarrow \quad \frac{V}{n \cdot R} = \frac{T_1}{P_1}$$

$$P_2 \cdot V = n \cdot R \cdot T_2 \quad \longrightarrow \quad \frac{V}{n \cdot R} = \frac{T_2}{P_2}$$

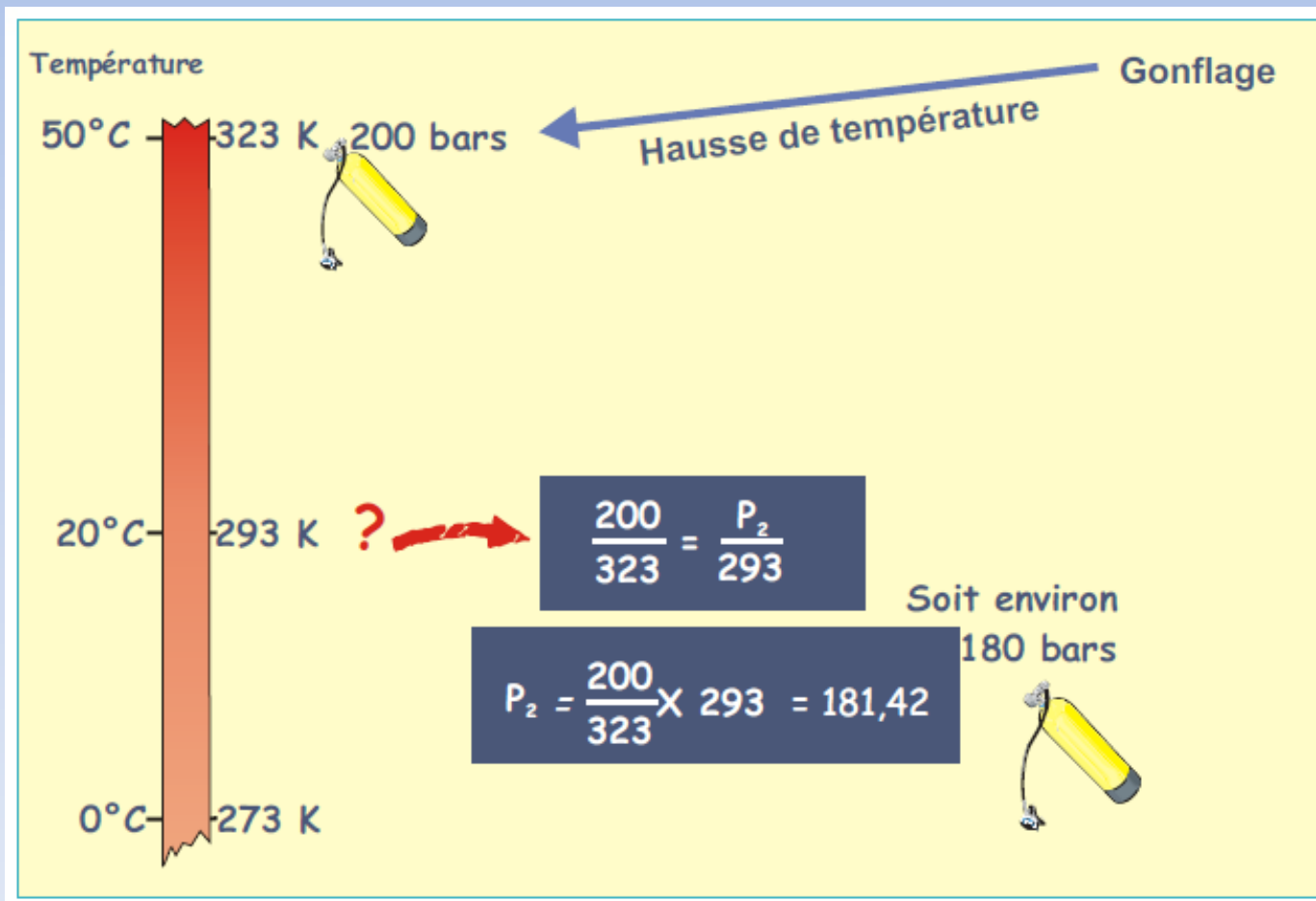
Alors  $\frac{T_1}{P_1} = \frac{T_2}{P_2}$  ou  $T_1 \cdot P_2 = T_2 \cdot P_1$  Loi de Charles

# Applications pratiques de ces lois



# Applications pratiques de ces lois

## Variation de la pression d'une bouteille





# Applications pratiques de ces lois

## Mise en commun de 2 bouteilles

12 l  
40 bars

15 l  
180 bars

2700 litres

480 litres

3180 litres comprimés dans un volume de 27 litres (12 + 15).

27 litres  
? bars

$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$

$(12 \times 40) + (15 \times 180) = (12 + 15) \times P_2$

$P_2 = \frac{(12 \times 40) + (15 \times 180)}{(12 + 15)}$

$P_2 = \frac{480 + 2700}{27} = \frac{3180}{27} = 117 \text{ bars}$

# Applications pratiques de ces lois

Attention :  $P.V = n.R.T$

$$\text{Unité : } \frac{N}{m^2} \cdot m^3 = N \cdot m = kg \cdot \frac{m}{sec^2} \cdot m = kg \cdot \frac{m^2}{sec^2} = \text{Joules}$$

$$\text{Energie cinétique : } E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad kg \times \frac{m^2}{sec^2}$$

Dans 1 bouteille :  $P.V = 200 \times 101300 \times 0,015 = 303.900$  Joules

$$\text{Equivalent voiture 1T : } v = \sqrt{\frac{2 \times 303.900}{1000}} = 24,65 \frac{m}{sec} = 88,75 \frac{km}{h}$$

# Pressions partielles

La pression absolue d'un gaz est la somme des pressions partielles de ses constituants.

Exemple de l'air

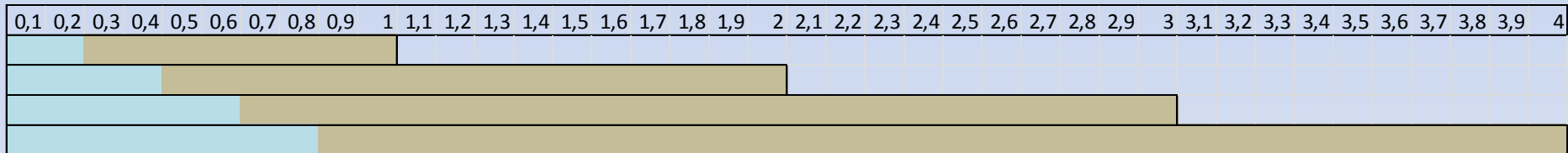
$$P_{\text{abs}} = P_{\text{P O}_2} + P_{\text{P N}_2}$$

Comme l'O<sub>2</sub> = 21% et N<sub>2</sub> = 79%, les pressions partielles de l'oxygène et de l'azote représenteront respectivement 21% et 79% de la pression absolue.

# Pressions partielles

Air

P abs	PP O2	PP N2
1	0,2	0,8
2	0,4	1,6
3	0,6	2,4
4	0,8	3,2
5	1	4
6	1,2	4,8
7	1,4	5,6



# Pressions partielles

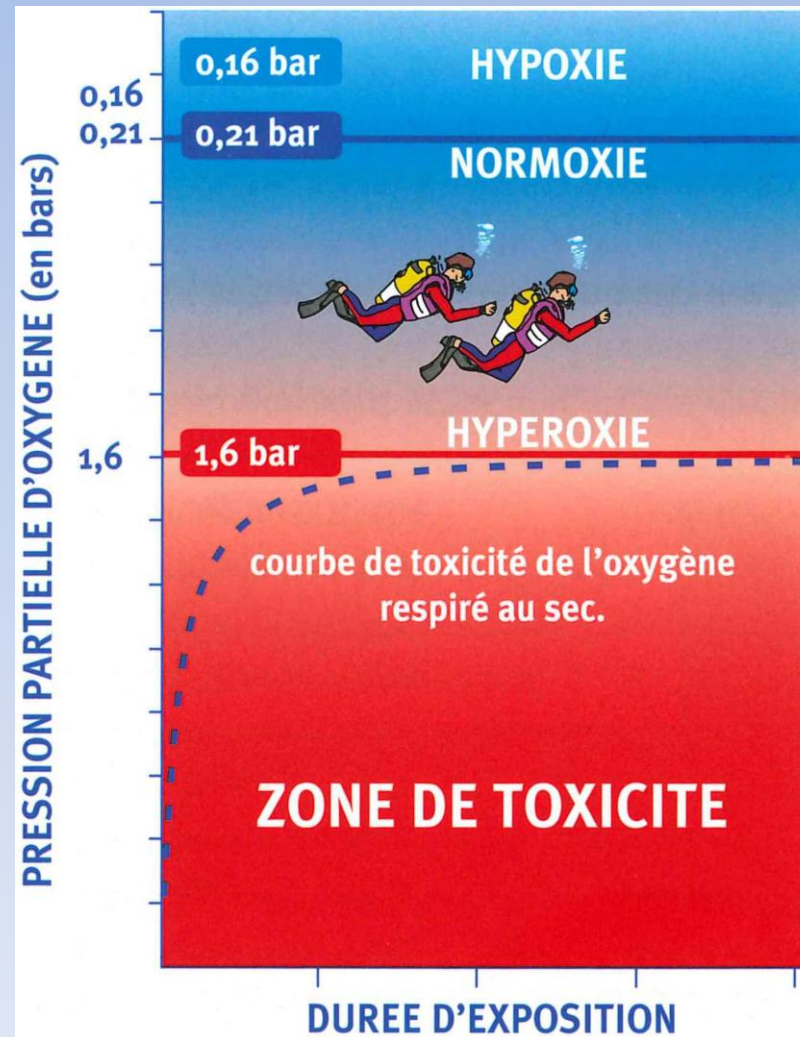
Cas d'un mélange trimix 20/30

Donc :  $O_2 = 20\%$   
 $He = 30\%$   
 $N_2 = 50\%$

<b>P abs</b>	<b>PP O2</b>	<b>PP N2</b>	<b>PP He</b>
1	0,2	0,5	0,3
2	0,4	1	0,6
3	0,6	1,5	0,9
4	0,8	2	1,2
5	1	2,5	1,5
6	1,2	3	1,8
7	1,4	3,5	2,1

# Pressions partielles

Hyperoxie



# Pressions partielles

Limites d'exposition à l'oxygène:

2,8 bar Exposition maximale à l'oxygène pur en caisson

1,9 bar Maximum de la recompression dans l'eau

1,6 bar Exposition maximale dans l'eau

1,4 bar Toxicité du SN. Exposition maximale lors d'efforts

0,21 bar Normoxie

0,16 bar Hypoxie moyenne, minimum pour un fonctionnement normal  
Pouls et respiration  $\nearrow$ , attention  $\searrow$ , mouvements délicats

0,12 bar Hypoxie sérieuse, début des symptômes au repos

0,10 bar Conscience, mais jugement erroné, insensibilité, fatigue, début de cyanose

0,6 bar Nausées, vomissements, efforts impossibles, cyanose intense

< 0,6 bar Respiration irrégulière, convulsions, syncope et mort

# Pressions partielles

Narcose à l'azote



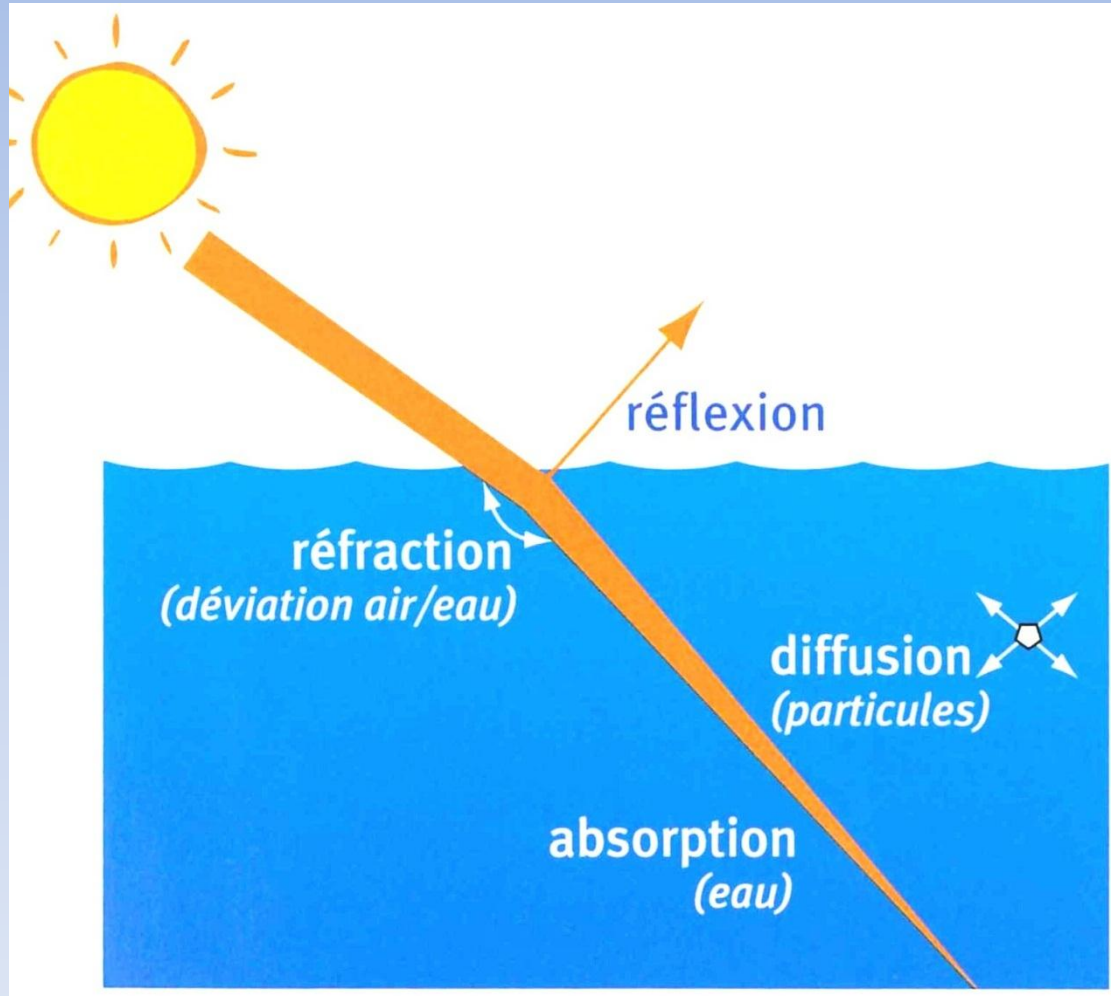


# La lumière

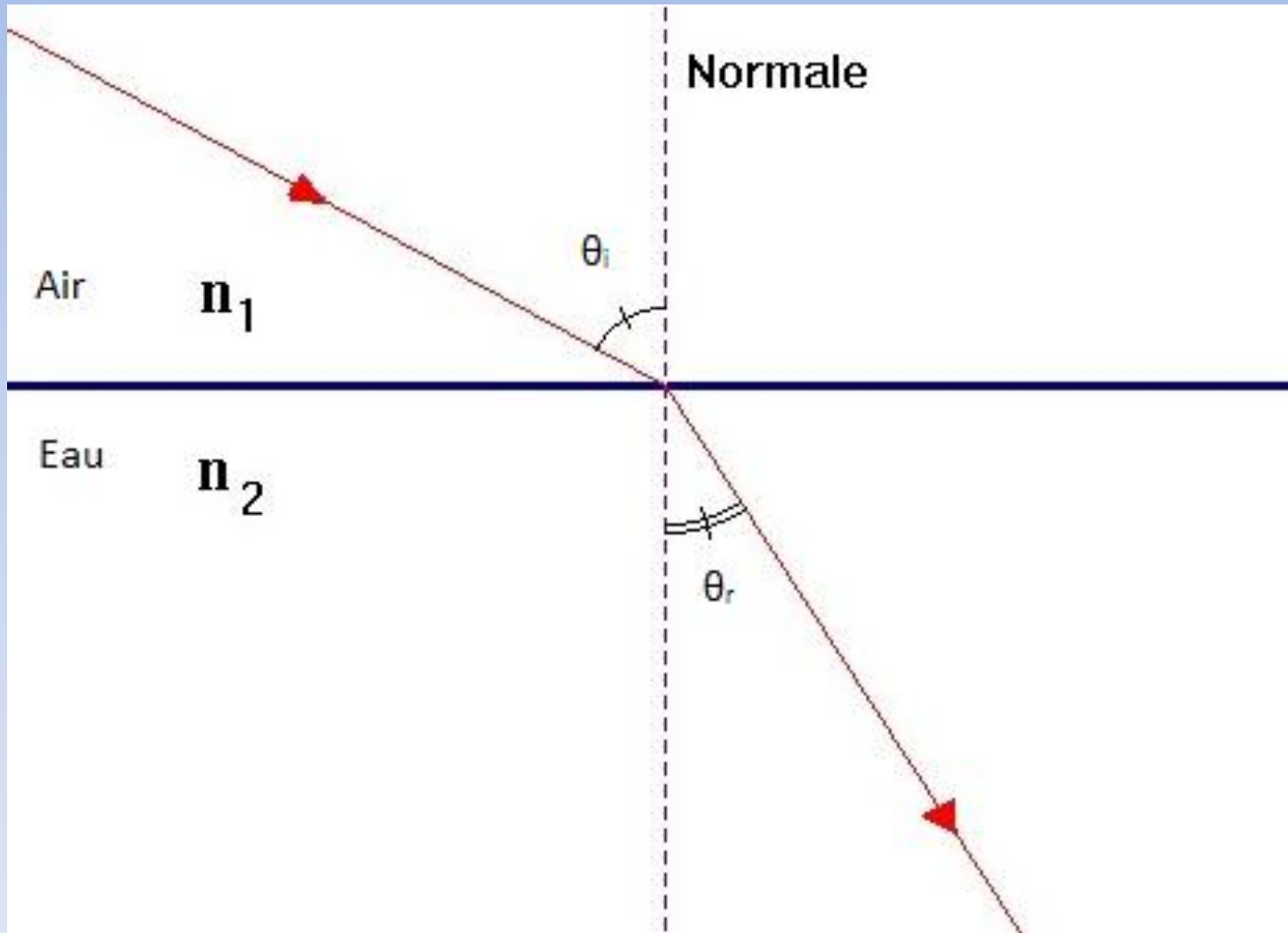
La lumière est un ensemble d'ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain

Longueur d'onde (dans le vide)	Domaine	Fréquence	Commentaire
de $10^3$ km à 1 mm	radio (Wifi, téléphones portables, radar, etc.)	3 Hz à 300 GHz	
de 1 mm à 780 nm	infrarouge norme NF/en 1836		
de 780 nm à 380 nm	lumière visible		rouge (620-780 nm)
			orange (592-620 nm)
			jaune (578-592 nm)
			vert (500-578 nm)
			bleu (446-500 nm)
			violet (380-446 nm)
de 380 nm à $10^{-9}$ m	ultraviolet	de 750 THz à 300 PHz	
de $10^{-9}$ m à $10^{-11}$ m	rayon X	de 300 PHz à 30 EHz	
$< 10^{-11}$ m	rayon $\gamma$	supérieure à 30 EHz	

# Lumière dans l'eau



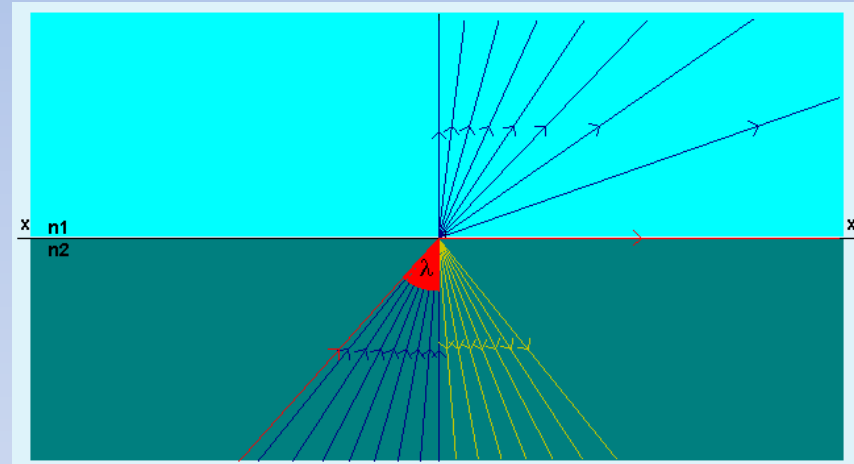
# Lumière dans l'eau



# Lumière dans l'eau

$$\frac{V_{air}}{V_{eau}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = 1,33 = \text{I (indice de réfraction)}$$

$$\theta_r \text{ max} = ?$$

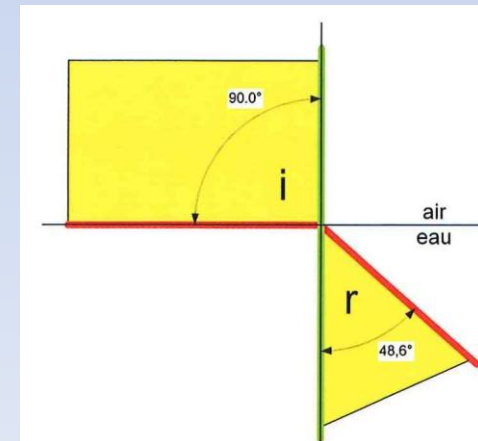


$$\sin \theta_r = \frac{\sin \theta_i}{1,33} \text{ max pour } \theta_i = 90^\circ$$

$$\sin \theta_r = \frac{1}{1,33} = 0,75$$



$$\theta_r = 48,6^\circ$$



# Lumière dans l'eau

---

- **L'absorption :**

Tous les rayons lumineux qui franchissent la surface ne parviennent pas en profondeur, nous connaissons bien le noir des abysses.

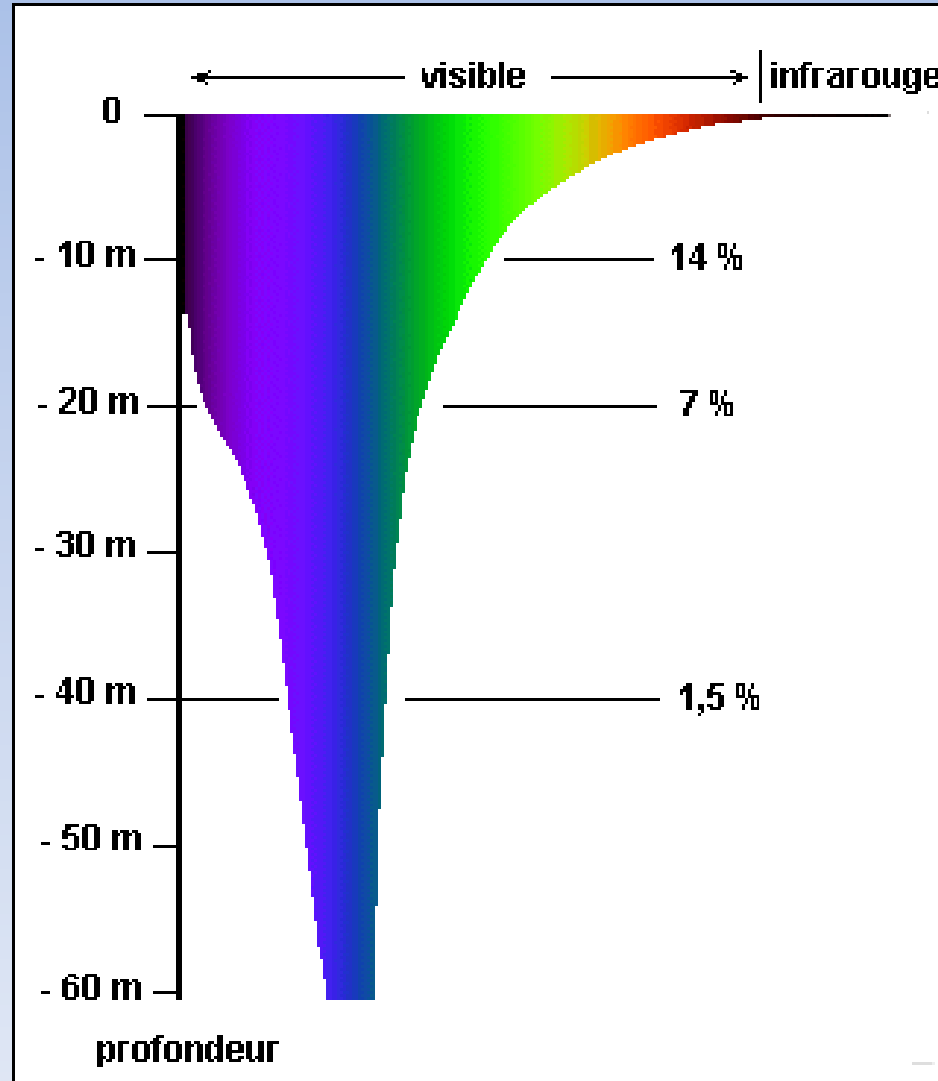
Ainsi, restent des rayons incidents :

à 1 mètre sous la surface : 40%

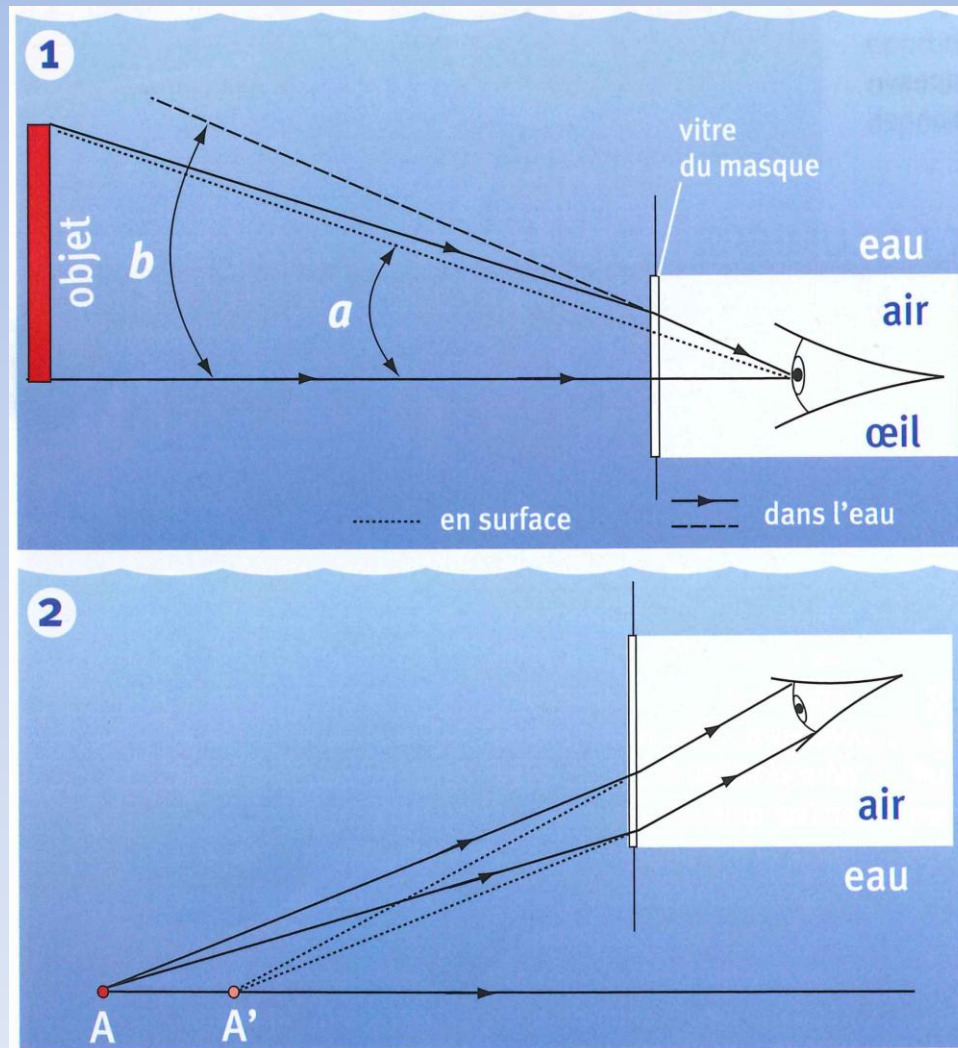
à 10 mètres : 15 à 20% ;

à 40 mètres : 1,5%.

# Lumière dans l'eau



# Vision dans l'eau



$\frac{1}{3}$  plus gros

$\frac{4}{3}$  plus près

# Vision dans l'eau

- Réduction importante du champ visuel qui passe de 170° à 97,4° ; entraînant la nécessité de tourner fréquemment la tête
- Modification de l'appréciation des distances : du fait de la réfraction due au changement d'indice de réfraction entre l'eau et l'air, l'image virtuelle qui parvient au cerveau est plus proche de  $\frac{3}{4}$  de la distance réelle
- Augmentation de la taille des images :  $\frac{1}{3}$  de plus que la réalité ;
- Déformation des images liée également aux indices de réfraction ;
- Buée pouvant être gênante et nécessitant des vidages de masque réitérés ; la meilleure prévention restant l'application de salive suivie d'un rinçage ou d'un nettoyage au dentifrice (en plus ça sent bon ....)



# Le son dans l'eau

Dans l'air, la vitesse du son =  $340 \frac{m}{sec}$

Dans l'eau :  $1.100 \text{ à } 1.500 \frac{m}{sec}$

A cause de la vitesse du son dans l'eau, on perd l'effet stéréophonique qui nous permet de déceler le décalage entre le son perçu par l'oreille droite et le son perçu par l'oreille gauche.

Il est impossible de détecter d'où vient le son (attention aux bateaux ....)

