



FORMATION N4-GP

Physique : Pression - Compressibilité des Gaz - Pressions Partielles - Flottabilité

Objectif et Justification du module : Physique

- Nécessité de comprendre les phénomènes physiques qui agissent sur notre corps, en plongée
- Comprendre l'influence de la pression sur l'air consommé en plongée
- Enfin il s'agit de l'épreuve n°12, Groupe 3 du GP : *Aspects Théoriques de l'Activité* – Coef 2

12 | ASPECTS THÉORIQUES DE L'ACTIVITÉ : Coefficient 2

- C'est une épreuve écrite 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.

1 — Connaissances	2 — Commentaires
Flottabilité.	• Notions 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.	• 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.	• 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.

Objectif et Justification du module : Physique

- En tant que futur Guide de Palanquée, vous devez comprendre les effets de l'environnement sous-marin sur les plongeurs que vous encadrerez, pour :
 - Comprendre et remédier aux effets de la pression sur le plongeur
 - Prendre en compte la consommation de chacun afin d'adapter le profil de plongée
 - Corriger, résoudre les problèmes de flottabilité, d'équilibre dans l'eau
 - Appréhender les effets de notre équipement, du matériel embarqué sur notre flottabilité
 - Comprendre les limites de la plongée à l'air comprimé
 - S'adapter aux circonstances de la plongée

Sommaire

1. Principe de la Pression
2. Rapport Pression – Volume
3. La Consommation d'air en plongée
4. La Pression & le Gonflage des blocs de plongée
5. Les Pressions Partielles
6. La Flottabilité
7. Synthèse : les formules clés



1 PRINCIPLE DE LA PRESSION

Principe de la Pression

Force
↓
Surface

- **Pression = Force exercée sur une surface**
- Pression Atmosphérique = pression exercée par le poids de l'air
- Au niveau de la mer, la **Pression Atmosphérique est de 1 bar** (1kg de pression sur une surface de 1 cm²)
- 1 bar = 760 mm Hg = 1013 Hpa = 1000 mbar (selon domaine utilisation)

- **Pression Hydrostatique** = pression exercée par le poids de l'eau
- Dans l'eau, on prend **1 bar tous les 10m** (soit 0,1 bar tous les m)
1 bar sous l'eau = 1 colonne d'eau de 10m X 1 cm² = 1kg (1l)
(donc le poids de l'eau au-dessus de nous augmente au fur et à mesure de notre descente)

- **Pression absolue = Pression Atmo + Pression Hydro**



➔ **Zone des 10m : La pression double ! = Vigilance**



Principe de la Pression

- La pression absolue à 0 m est de → **1 bar** (*au niveau de la mer*)
- La pression absolue à 10 m est de → **2 bars**
- La pression absolue à 40 m est de → **5 bars**
- La pression absolue à 3 m est de → **1,3 bar**

Inversement :

- Si la pression absolue est de 3 bars, la profondeur est de : → **20 m**
 - Quelle est la pression hydrostatique ? : → **2 bars**
- Si la pression absolue est de 4,8 bars, la profondeur est de : → **38 m**
 - Quelle est la pression hydrostatique ? : → **3,8 bars**

Et enfin :

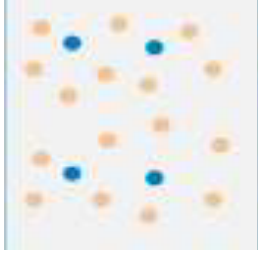
- Une palanquée s'immerge à 25 m dans un lac de montage situé à 2.000 m :
 - Quelle est la pression hydrostatique ? : → **2,5 bars**
 - Quelle est la pression absolue ? : → **0,8 bar (à la surface) + 2,5 bars = 3,3 bars**

2 RAPPORT PRESSION - VOLUME

Loi de Mariotte : Rapport Pression - Volume



Solides et liquides
sont incompressibles



Les gaz sont compressibles ; les molécules ne sont pas liées entre elles, on peut donc les comprimer.

En immergeant une bouteille graduée tête en bas :

- A la descente : l'eau rentre dans la bouteille et l'air diminue de volume (*idem* avec notre Stab et l'air)
- A la remontée : le phénomène s'inverse, l'eau sort de la bouteille et l'air augmente de volume

En regardant les graduations on voit que le produit du **volume** par la **pression** est constant*

Profondeur	Pression (P)	Volume (V)	P X V
0m	1 bar	3 litres	1 x 3 = 3
5m	1,5 bars	2 litres	1,5 x 2 = 3
10m	2 bars	1,5 litres	2 x 1,5 = 3
20m	3 bars	1 litres	3 x 1 = 3
40m	5 bars	0,6 litres	5 x 0,6 = 3

* à T° constante



Loi de Mariotte : Rapport Pression - Volume



- Le produit pression (P) x volume (V) est une constante (C)

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

Pression surf x Volume surf = Pression fond x Volume fond

- La **Pression** est exprimée en **bar**
- Le **Volume** est exprimé en **litre**

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

- $P = \text{Constante} / V$
- $V = \text{Constante} / P$

- **Incidences en plongée du rapport Pression – Volume :**

- Stabilisation ; gestion de la stab
- Equipement et notamment la combinaison
- Les barotraumatismes
- La consommation de l'air
- Le gonflage des blocs

Loi de Mariotte : Rapport Pression - Volume

Lucas s'immerge en mer avec sa palanquée à 25 m, il gonfle progressivement son gilet au fur et à mesure de sa descente. A 25 m son gilet contient 5 litres d'air. S'il remonte sans purger à 15 m, quel sera le volume d'air du gilet de Lucas ?

- A 25 m, la pression est de 3,5 bars
- A 25 m, le gilet contient 5 litres d'air
- Au fond (25 m) $\rightarrow P \times V = \text{constante} \rightarrow 3,5 \text{ bars} \times 5 \text{ litres} = 17,5$
- A 15 m $\rightarrow P \times V = \text{constante}$:
 - Constante = 17,5
 - Pression = 2,5 bars à 15m
 - Volume = ? $\rightarrow V = \text{Constante} / \text{Pression} \rightarrow V = 17,5 / 2,5 \text{ bars} = 7 \text{ litres}$



Conséquence $\rightarrow$ purger son gilet au fur et à mesure de la remontée

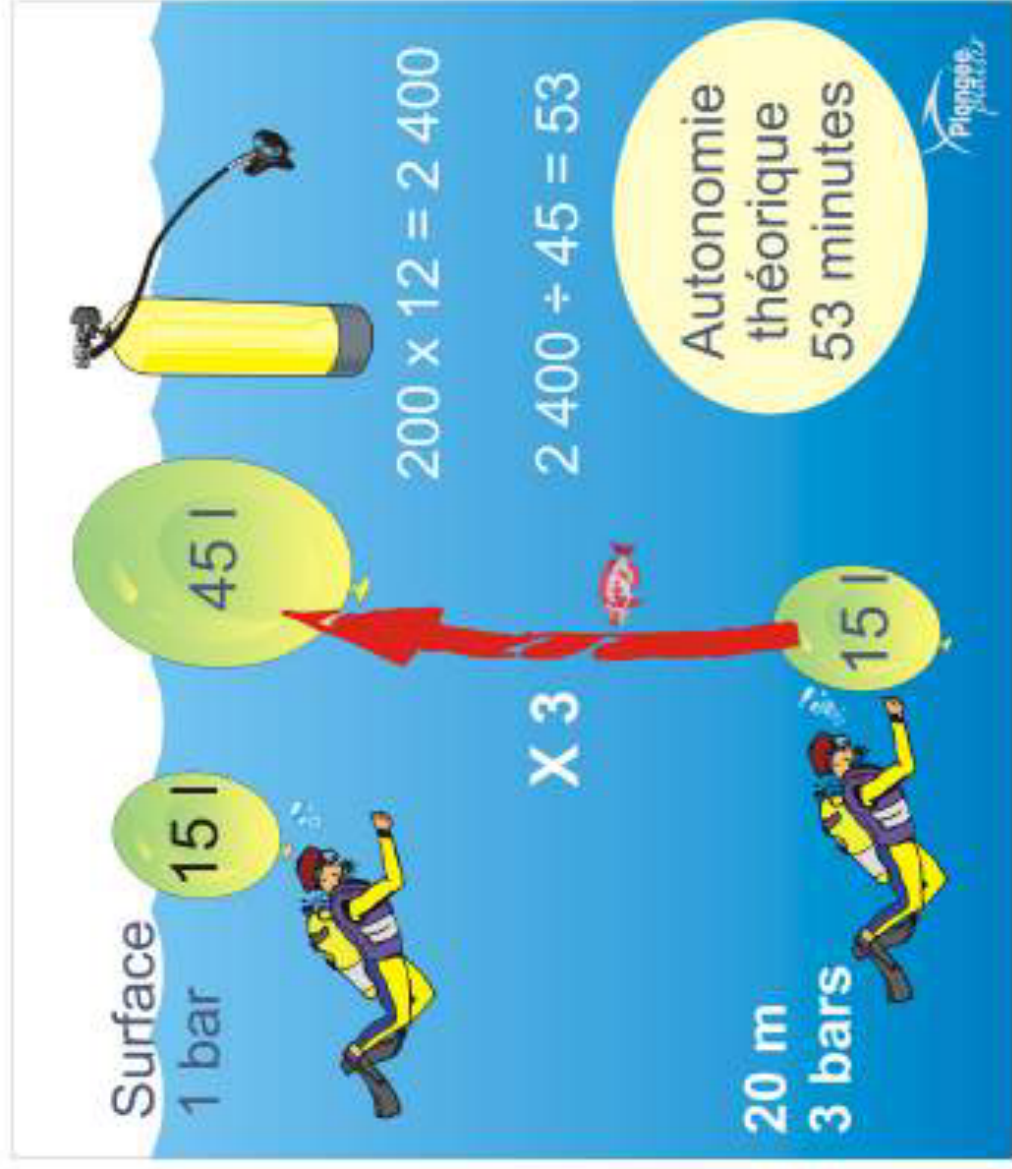
Pression surf x Volume surf = Pression fond x Volume fond

$$2,5 \text{ bars} \times 7 \text{ litres} = 3,5 \text{ bars} \times 5 \text{ litres}$$

$$17,5 = 17,5$$

3 LA CONSOMMATION EN PLONGEE

Consommation : L'autonomie en air diminue avec la profondeur



Attention : on doit toujours garder 50 bars de réserve d'air !

En plongée, l'air est délivré par le détendeur à pression ambiante → pression absolue

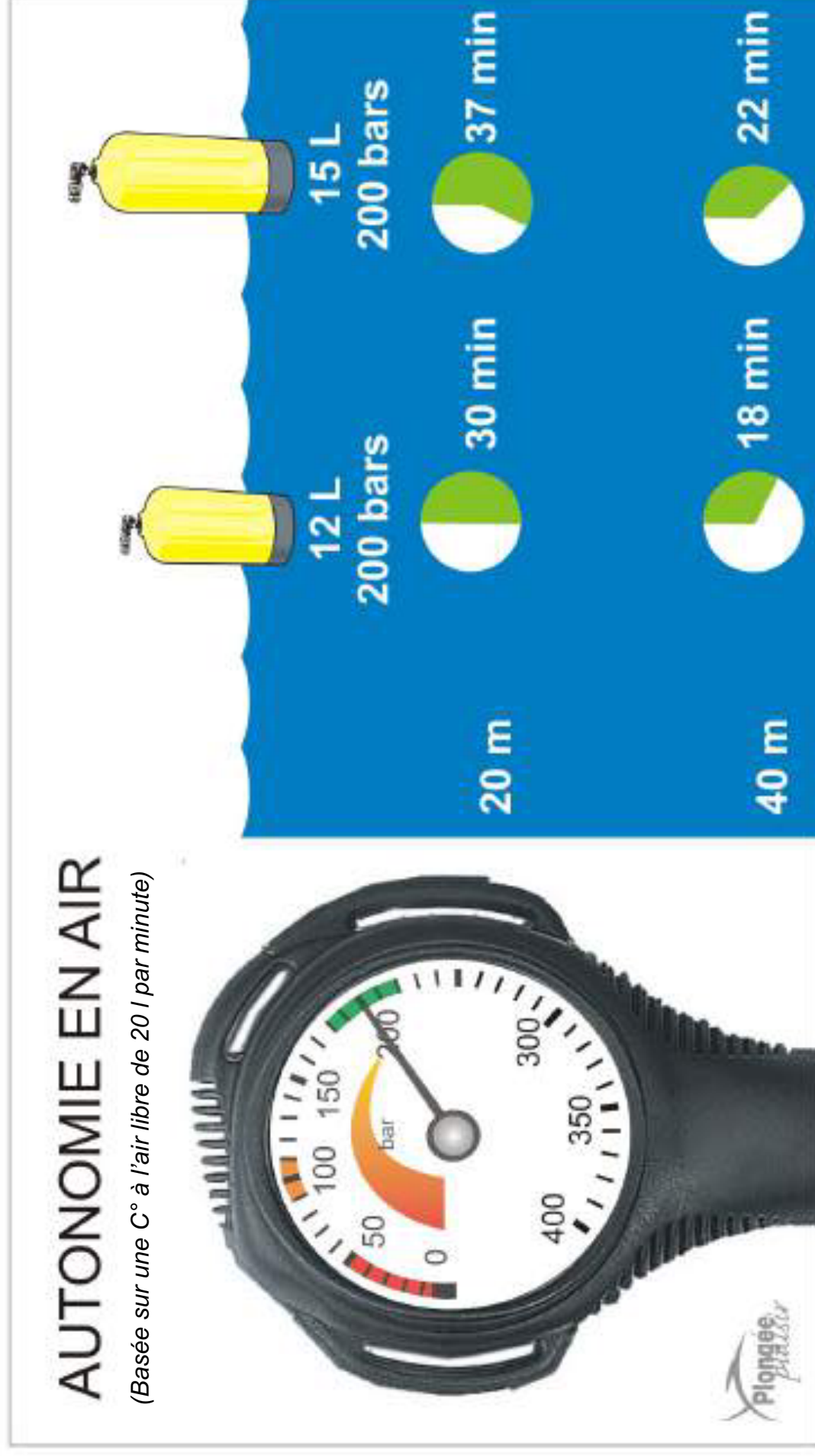
- Plus la pression augmente, plus on consomme (à 20m, 3 bars, on consomme 3 fois plus d'air)
- Si pression $\times 3$ → autonomie $\div 3$



Vérifier régulièrement la consommation d'air

→ Rappel au briefing, consigne : le 1er à mi-pression (100 bars) le signale au GP

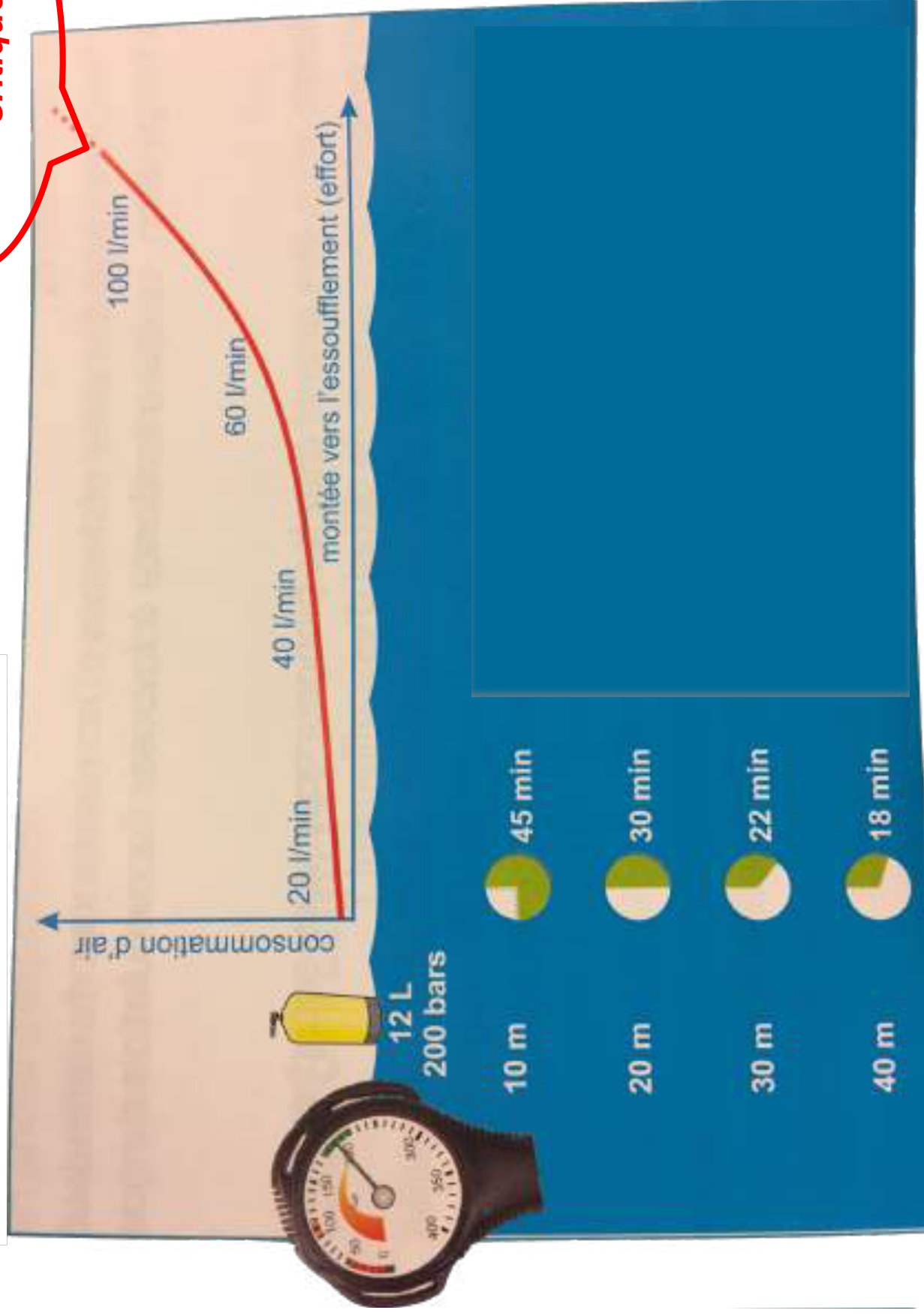
Consommation : Autonomie, Bouteilles et Profondeur



1 plongeur essoufflé à 40m consommera fortement et peut vider un bloc de 15 litres en quelques minutes !

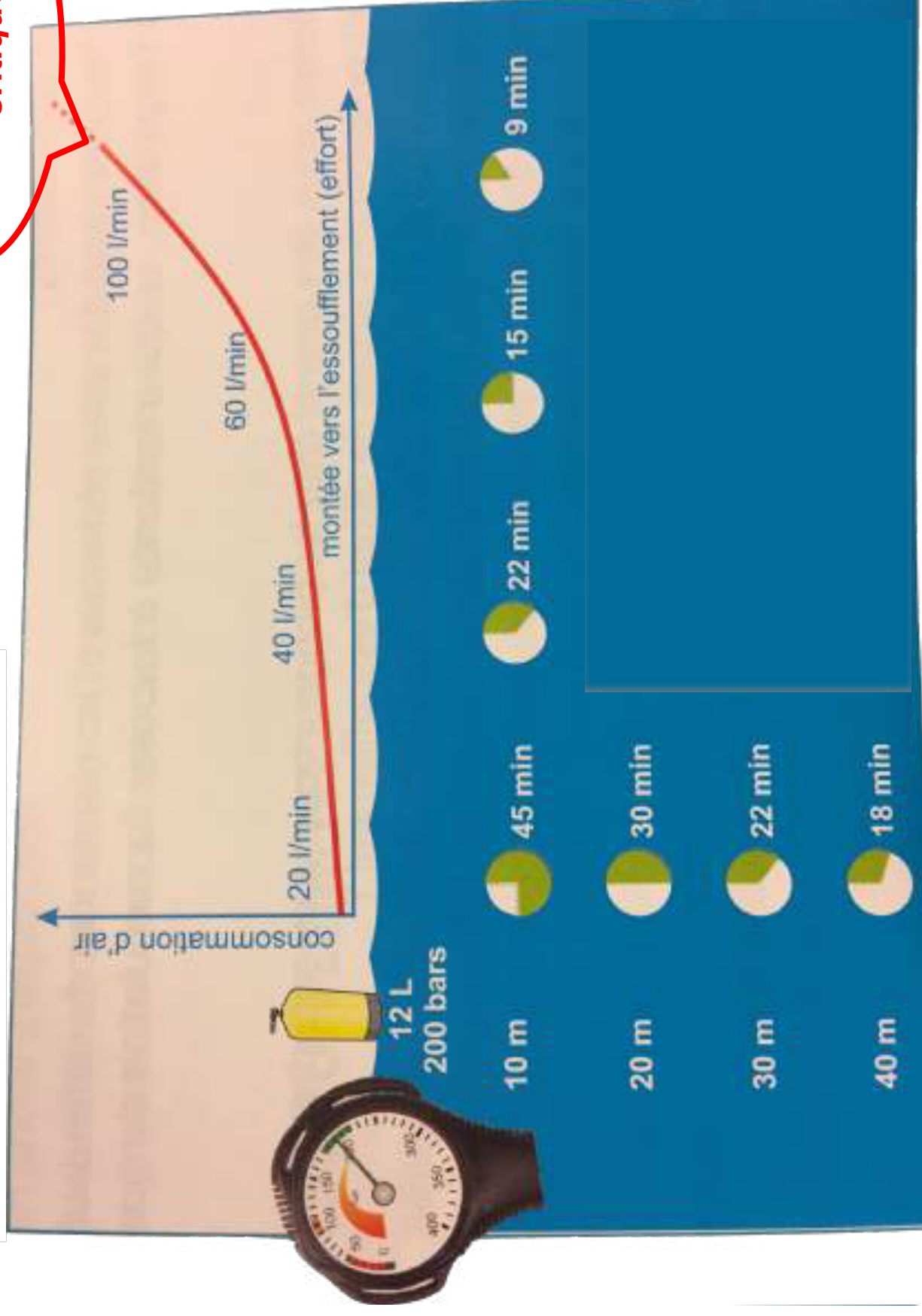
Consommation : Autonomie, Bouteilles et Profondeur

Consommation Critique



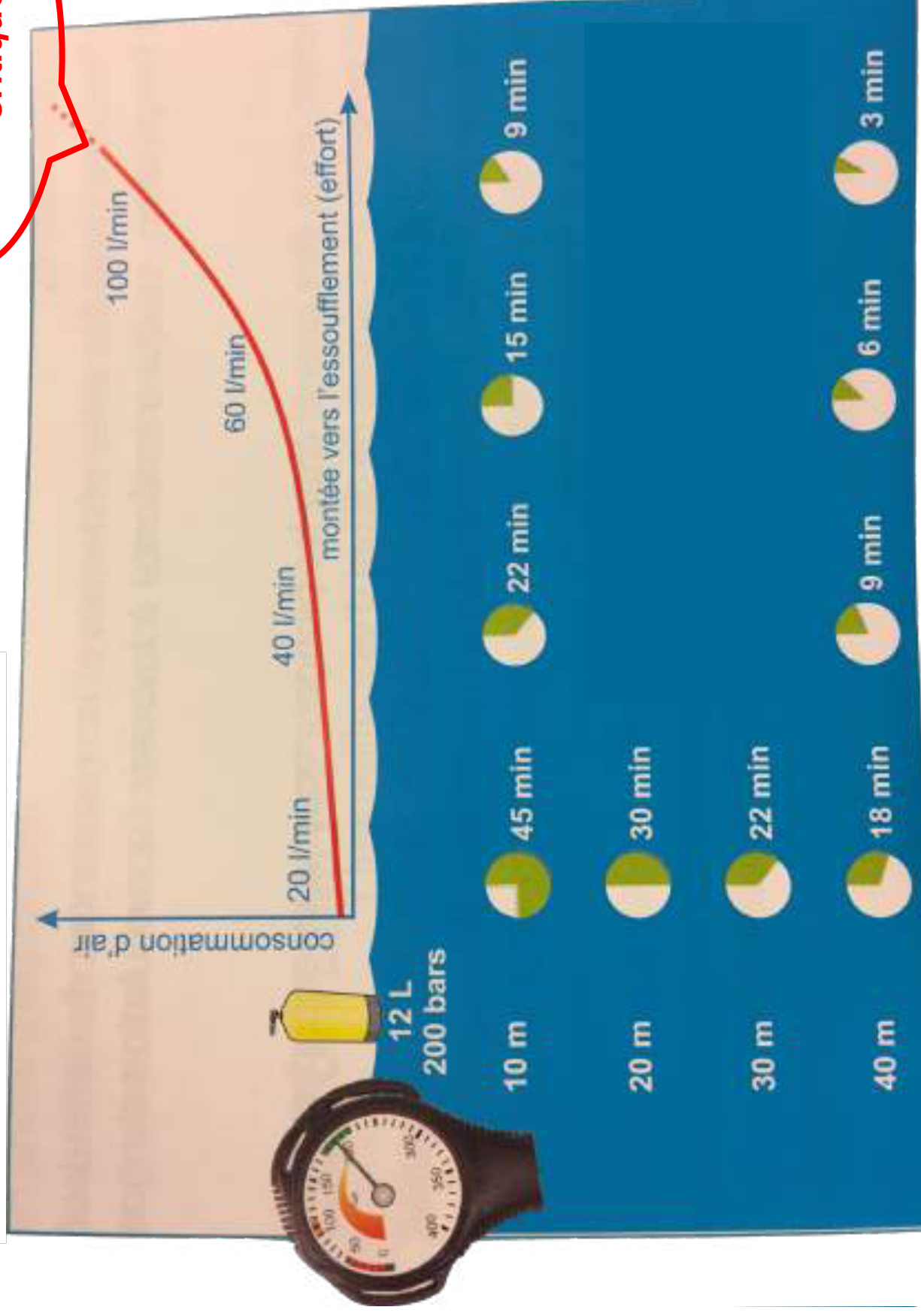
Consommation : Autonomie, Bouteilles et Profondeur

Consommation Critique



Consommation : Autonomie, Bouteilles et Profondeur

Consommation Critique



Consommation : Calcul d'autonomie

- Lucas consomme en moyenne 20 litres d'air par minute en activité.
Quelle est son autonomie à 20 m avant d'atteindre les 50 bars de réserve s'il utilise un bloc de 12 litres gonflé à 200 bars ?

- Air disponible : $(200 \text{ bars} - 50 \text{ bars}) \times 12 \text{ litres} = 1.800 \text{ litres}$
- A 20 m, la pression est de 3 bars

- Application :

$$\text{Pression surf} \times \text{Volume surf} = \text{Pression fond} \times \text{Volume fond}$$

$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
1 bar	X	1.800 litres =	3 bars
			X
			?

Méthode 1 : Volumes
ramenés à la
pression de surface

$$(1 \times 1.800) / 3 = ?$$

$$? = 600 \text{ litres d'autonomie} \rightarrow \text{soit } 600 \text{ l} / 20 \text{ l} = \mathbf{30 \text{ minutes d'autonomie}}$$



Consommation : Calcul d'autonomie

Méthode 2 :
Volumen ramené à
la pression ambiante

- Air disponible : $(200 \text{ bars} - 50 \text{ bars}) \times 12 \text{ litres} = 1.800 \text{ litres}$
- A 20 m, la pression est de 3 bars → on consomme 3 fois plus à 20 m → $20 \text{ l} \times 3 = 60 \text{ l}$
- À 20 m, Lucas consommera donc 60 l par minute, soit une autonomie de :

$$1.800 \text{ litres} / 60 \text{ litres par minute} = \mathbf{30 \text{ minutes d'autonomie}}$$

Certains facteurs influencent notre consommation en air

LE MATERIEL

- La ventilation est modifiée : équipement, détenteur, effort pour inspirer (augmentation de la densité de l'air respiré)
- Une combinaison trop serrée
- Le lestage

L'ENVIRONNEMENT

- Stress et anxiété : attention aux conditions difficiles (*courant, mer agitée, eau trouble*)
- Ventilation : des cycles amples et lents en insistant sur l'expiration

LE PLONGEUR

- Le froid : la ventilation augmente
- La forme physique (*manque de sommeil, alcool, tabac...*)
- Différences entre les individus

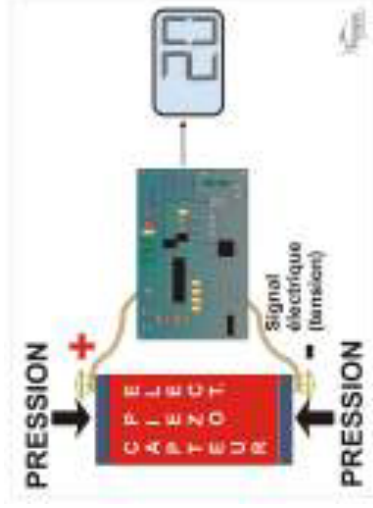
VOTRE BRIEFING

- Planifiez vos plongées avant de vous immerger, profil de plongée (*stock d'air suffisant*)
- Intégrez vos éventuels paliers dans la planification
- Infos mi pression
- Conserver une marge de sécurité

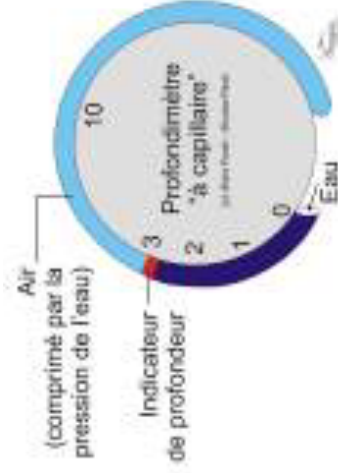


Instruments & Altitude

La profondeur affichée par les instruments peut varier selon la technologie employée :



- **Instruments électroniques** (ordinateur) : attention régler l'altitude !



- **Profondimètre à capillaire** (membrane déformable) : contient de l'air à la pression atmosphérique. Le volume diminue quand la pression augmente (l'eau pénètre par une extrémité du capillaire).

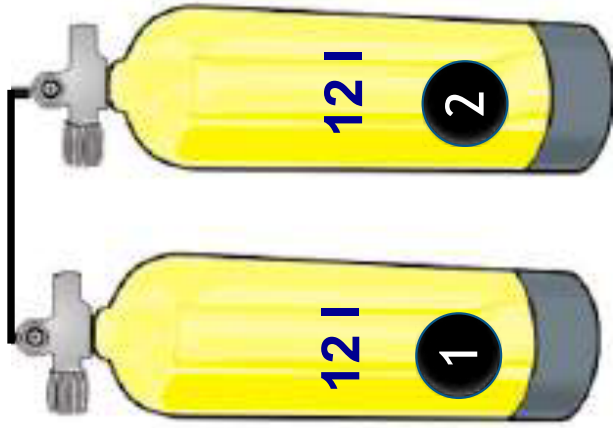


- **Profondimètre à tube de Bourdon** : se déclenche au-delà de 1 bar de pression. Toute augmentation de pression déforme le tube aplati (le tube se déroule).

4 PRESSION & GONFLAGE DES BLOCS DE PLONGEE

Rapport Pression – Volume : Gonflage des Blocs

- Application du rapport Volume Pression au gonflage des blocs de plongée



On raccorde 2 blocs de 12 l dont la pression résiduelle est de :

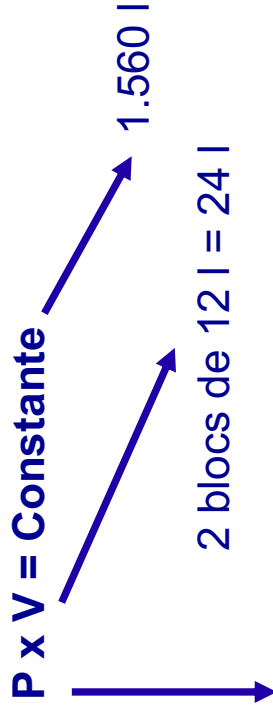
- Bloc 1 : 50 bars
- Bloc 2 : 80 bars

Quelle sera la pression finale des 2 blocs après leur raccordement ?

1 - Raisonnement sans poser de calculs/formules ?

2 – Raisonnement avec calculs ?

➔ Le litrage d'air total disponible est de : $(12l \times 50 \text{ bars}) + (12l \times 80 \text{ bars}) = 1.560$ litres d'air

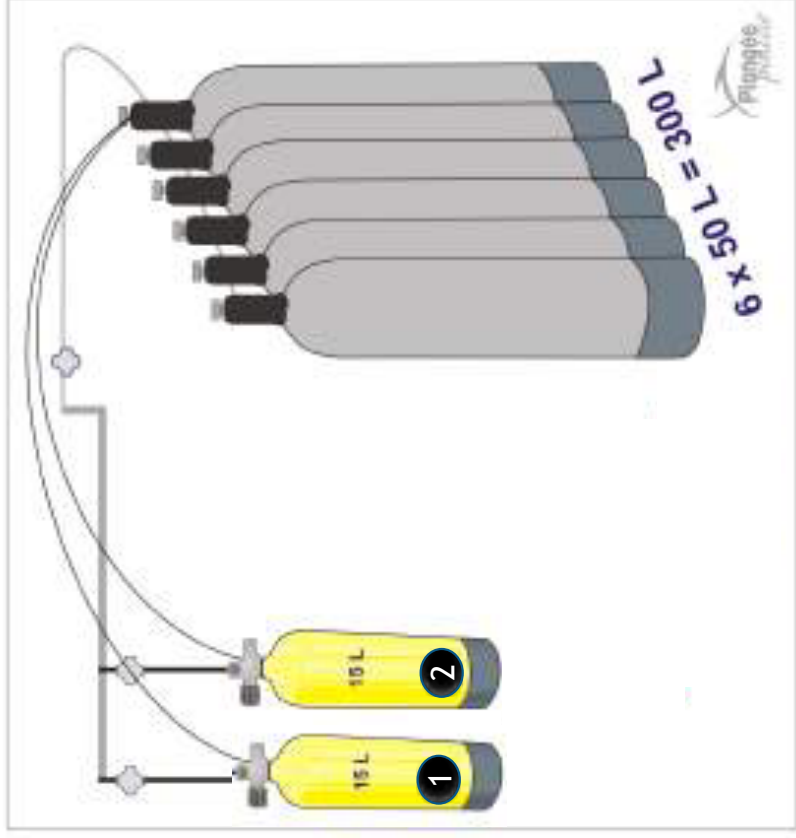


$$P = 1.560 / 24$$

$$P = 65 \text{ bars}$$

Rapport Pression – Volume : Gonflage des Blocs

➤ 2^{ème} exemple – Avec des blocs tampons



On souhaite gonfler 2 blocs de 15 l dont la pression résiduelle est de :

- Bloc 1 : 30 bars
- Bloc 2 : 70 bars

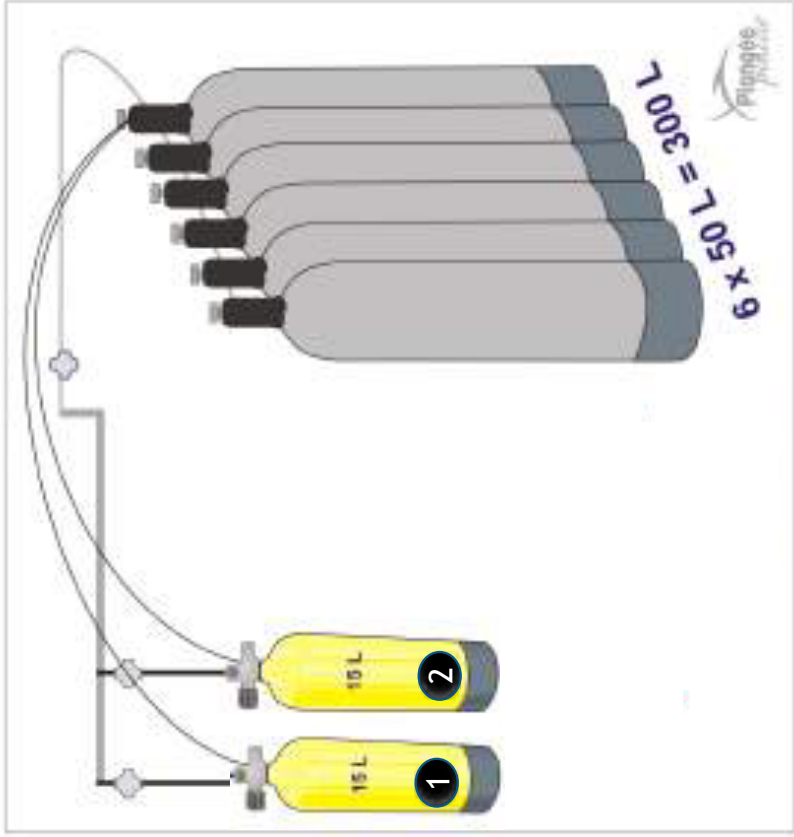
On dispose de 6 blocs tampons de 50 l chacun, tous gonflés à 300 bars.

Quelle sera la pression finale (d'arrivée) en gonflant les 2 blocs sur l'ensemble des tampons en même temps ?

Rapport Pression – Volume : Gonflage des Blocs

Le litrage d'air total disponible est de :

- $(50\text{ l} \times 300\text{ bars}) + (15\text{ l} \times 30\text{ bars}) + (15\text{ l} \times 70\text{ bars}) = 91.500\text{ litres d'air}$



A l'ouverture des blocs et tampons, l'air se répartie dans l'ensemble des volumes :

$$\begin{array}{l} \text{P x V = Constante} \\ \text{6 blocs de } 50\text{ l} + (2 \times 15\text{ l}) \\ \quad \quad \quad = \\ \quad \quad \quad 330\text{ l} \\ \text{P = } 91.500 / 330 \\ \text{P = } 277,27\text{ bars} \end{array}$$

Loi de Charles : Température & Pression

→ Incidence de la **température** sur le gonflage des Blocs : au gonflage les blocs chauffent
Pourquoi ? Le nombre de molécules de gaz augmente dans la bouteille, elles s'entrechoquent dispersant de l'énergie sous forme de chaleur

Lorsque la **T°** augmente ou diminue, le rapport Pression Volume augmente ou diminue.

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

+ Incidence de la température

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

Si le volume est invariable seule la pression varie avec la température

$\frac{P}{T} = \text{Constante}$



P-Pression
V-Volume
T-Température



T symbolise la T° exprimée en **Kelvin** et non en degré Celsius

→ Il faudra donc effectuer une conversion :

$$0^{\circ} \text{ celsius} = 273 \text{ K (Kelvin)}$$

-273



Celsius (C°) Kelvin (K)



+273

$$P \text{ initiale} \quad \quad \quad P \text{ Finale}$$
$$\quad \quad \quad = \quad \quad \quad$$

$$T^{\circ} \text{ initiale en K} \quad \quad \quad T^{\circ} \text{ finale en K}$$

Loi de Charles : Température & Pression

→ Exemple :

La température d'un bloc gonflé à 200 bars à la fin de l'opération de gonflage est de 50°C. Quelle sera la pression du bloc une fois la température retombée à 15°C ?



$$\frac{P \text{ initiale}}{T^{\circ} \text{ initiale en K}} = \frac{P \text{ Finale}}{T^{\circ} \text{ finale en K}}$$

→ Convertir la T° C en Kelvin :

$$50^{\circ}\text{C} + 273 = 323 \text{ K}$$

$$15^{\circ}\text{C} + 273 = 288 \text{ K}$$

$$\frac{200 (P \text{ initiale})}{323 (T^{\circ} \text{ initiale})} = \frac{P \text{ Finale ?}}{288 (T^{\circ} \text{ finale})}$$

$$P \text{ Finale} = 288 \times 200 / 323 \\ = 178,3 \text{ bars}$$

5 LES PRESSIONS PARTIELLES

Loi de Dalton : Pressions Partielles

Définition : La pression partielle d'un gaz dans un mélange gazeux est égale à la pression qu'exercerait ce gaz s'il occupait tout le volume du mélange.

→ Autrement dit, la pression partielle d'un gaz est en quelque sorte la proportion de ce gaz dans un mélange.

1 bar de pression au niveau de la mer est donc constitué de :

$$1 \text{ bar d'air} \rightarrow 20\% \text{ O}_2 + 80\% \text{ N}_2$$

Calcul de la pression partielle d'un gaz =

$$\rightarrow P_p(\text{gaz}) = P_{\text{absolue}} \times \% (\text{gaz})$$

$P_p(\text{gaz})$: pression partielle du gaz du mélange

P_{absolue} : pression absolue

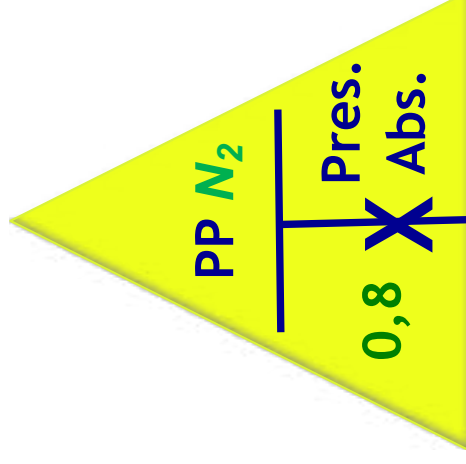
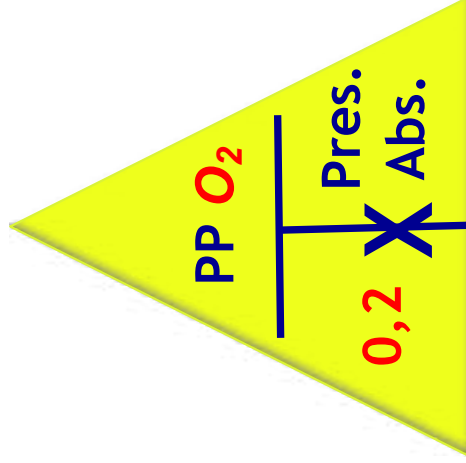
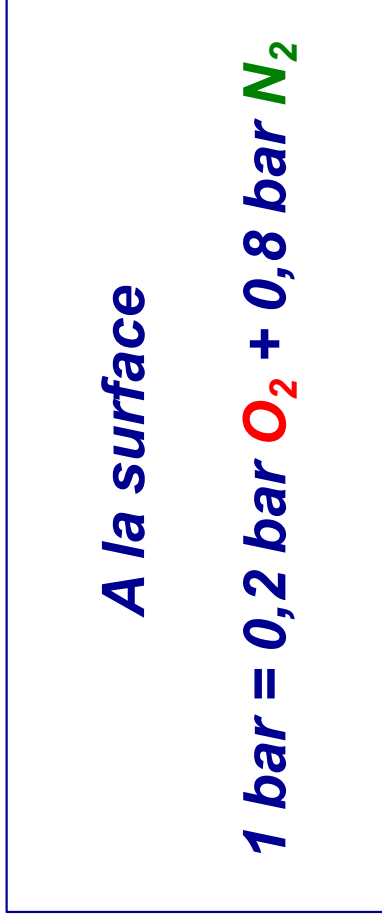
$\% (\text{gaz})$: proportion du gaz dans le mélange

→ Pressions partielles de l'**Oxygène** (**O₂**) et de l'**Azote** (**N₂**) au niveau de la mer :

- $P_p \text{ O}_2 = 1 \text{ bar} \times 20\% = 0,2 \text{ bar.}$
- $P_p \text{ N}_2 = 1 \text{ bar} \times 80\% = \underline{0,8 \text{ bar}}$ } la somme des pressions partielles = pression absolue
1 bar

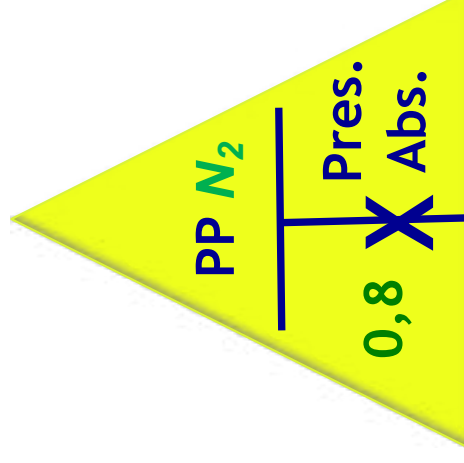
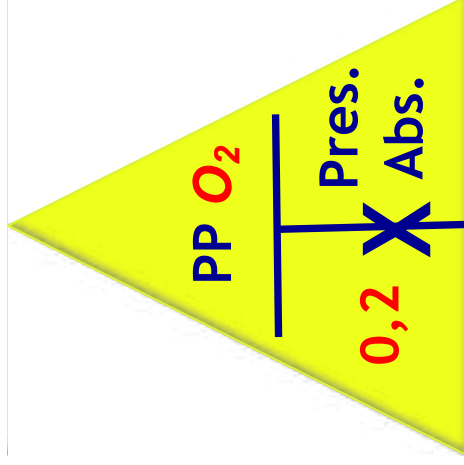
Loi de Dalton : Pressions Partielles

Moyen simple de calcul des pressions partielles → le diagramme de Dalton :



Loi de Dalton : Pressions Partielles

Cas pratique : Pour 1 mélange gazeux composé de 20% d'**oxygène** et de 80% d'**azote** à une profondeur de 20 m, quelles sont les pressions partielles d' **O₂** et de **N₂** ?



- 20 m = 3 bars de pression absolue
- Pp **O₂** = 0,2 X 3 bars = **0,6 bar**
- Pp **N₂** = 0,8 X 3 bars = **2,4 bars**

Vérification : la somme des Pp = Pression Absolue :

- 0,6 bar **O₂** + 2,4 bars **N₂** = **3 bars** de pression absolue

Pressions Partielles : Seuils de Toxicité

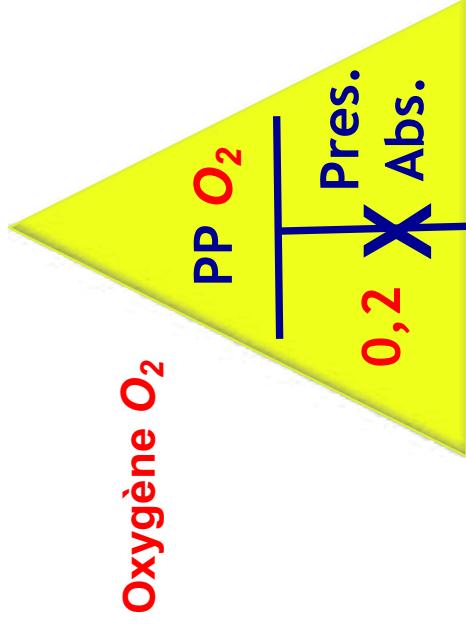


Nous plongeons à l'air ($O_2 + N_2$)

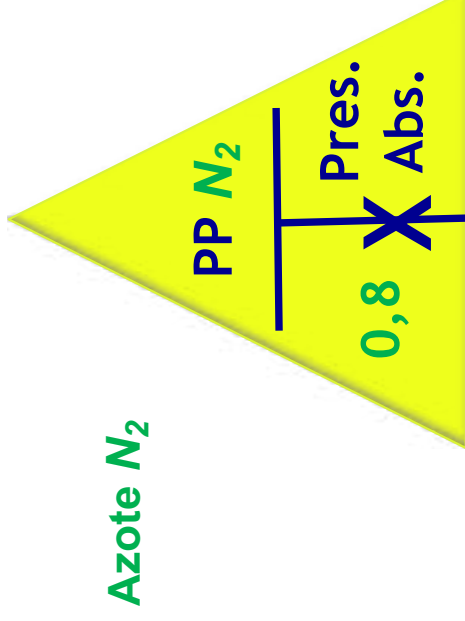
En France, la plongée à l'air est limitée à 60 m, pourquoi ?

→ Au-delà d'un certain seuil (pression partielle), un gaz devient toxique pour l'organisme :

- **Oxygène O_2** → Pp de **1,6 bar**
- **Azote N_2** → Pp de **5,6 bars** (*Narcose*)



→ 1,6 bar / 0,21 = 7,6 bars → soit 66 m

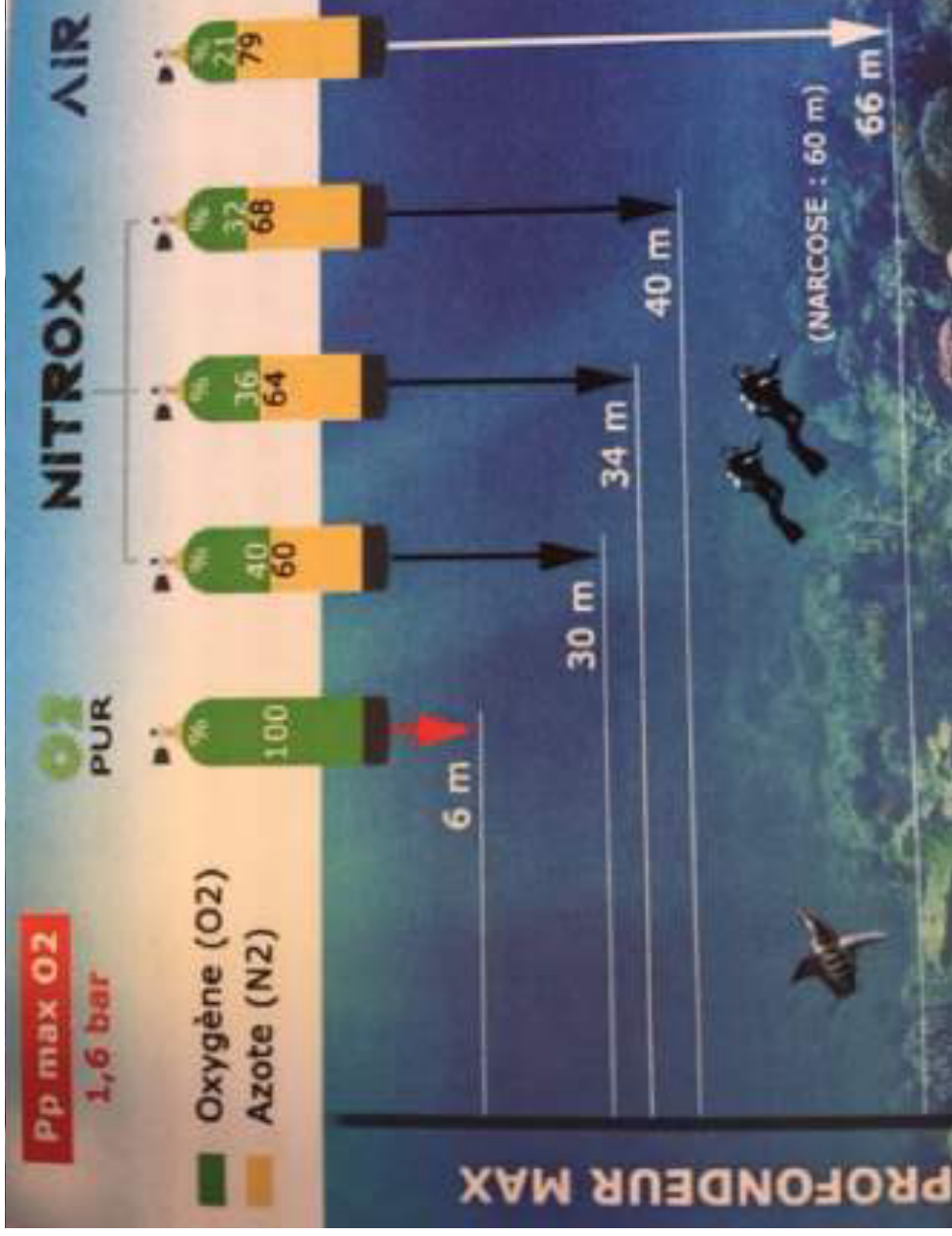


→ 5,6 bars / 0,79 = 7 bars → soit 60 m

→ **Donc une profondeur max de 60 m en plongée à l'air au sein de la FFESSM (dû à l'azote)**

Cas du Nitrox : Mélange Gazeux

→ Le Nitrox est un mélange gazeux enrichi en **oxygène** et réduit en **azote** (*réduction des risques de saturation, des paliers, de la fatigue*).



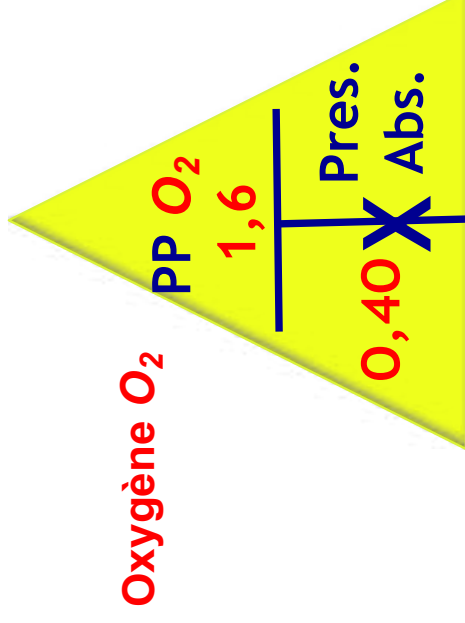
Un Nitrox 32%, possède 32% **O₂** et 68% **N₂** :

- soit Pp **O₂** = 0,32 bar et Pp **N₂** = 0,68 bar ; donc 1 bar au total, à la surface
- Le % d' **O₂** limitera la profondeur de la plongée, du fait du seuil de toxicité **O₂** : Pp **O₂** de 1,6 bar

Cas du Nitrox : Mélange Gazeux

Exemple : Alexandre, certifié Nitrox, veut plonger avec un mélange Nitrox 40 %. Quelle sera sa profondeur maximum à ne pas dépasser ?

- Un Nitrox 40% possède 40% d'**O₂**, il est donc enrichi.
- Nous savons que le seuil de toxicité pour l'**O₂** est fixé à une Pp de 1,6 bar.



- 1,6 bar / 0,40 = 4 bars de pression absolue → soit **30 m max**
(1 bar de pression atmo + 3 bars de pression hydro)



6 FLOTTABILITE

La Flottabilité

→ La flottabilité définit la capacité d'un corps à pouvoir flotter ou couler dans l'eau.



- Si un corps flotte → **Flottabilité Positive**
- Si un corps se stabilise entre deux eaux → **Flottabilité Neutre**
- Si un corps coule → **Flottabilité Négative**

La Flottabilité : Archimède

→ En plongée nous sommes soumis à 2 forces opposées :



→ Force verticale dirigée vers le haut, qui s'applique à tout le corps, égale au poids du volume d'eau déplacé

La Flottabilité : Le poids Apparent

Le poids apparent d'un objet ou d'un corps plongé dans l'eau est plus léger que son poids réel à cause de la poussée d'Archimède :



→ La différence correspond au poids apparent

$$\text{Poids Apparent} = \text{Poids Réel} - \text{Poussée d'Archimède}$$

↓

En kg
Ou
Masse volumique X volume

Masse volumique : 11,3
(ex : 1 dm³ de plomb pèse 11,3 kg)

↓

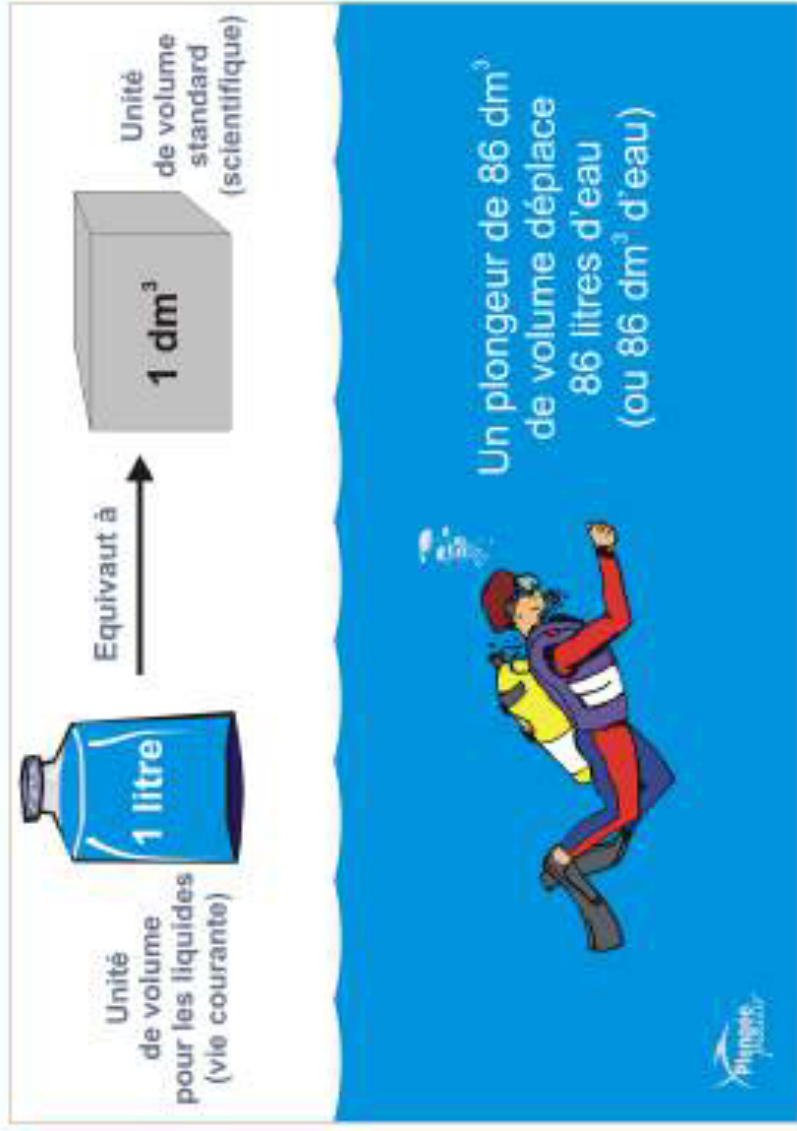
Volume d'eau déplacé, soit :

V x D (densité de l'eau)

V = en litre ou dm³
D = 1 (eau douce)
D = 1,025 (mer)

- Se stabiliser c'est : Poids = Archimède
- D'où, on gonfle la stab en descendant et on la vide en remontant

La poussée d'Archimède & Lestage



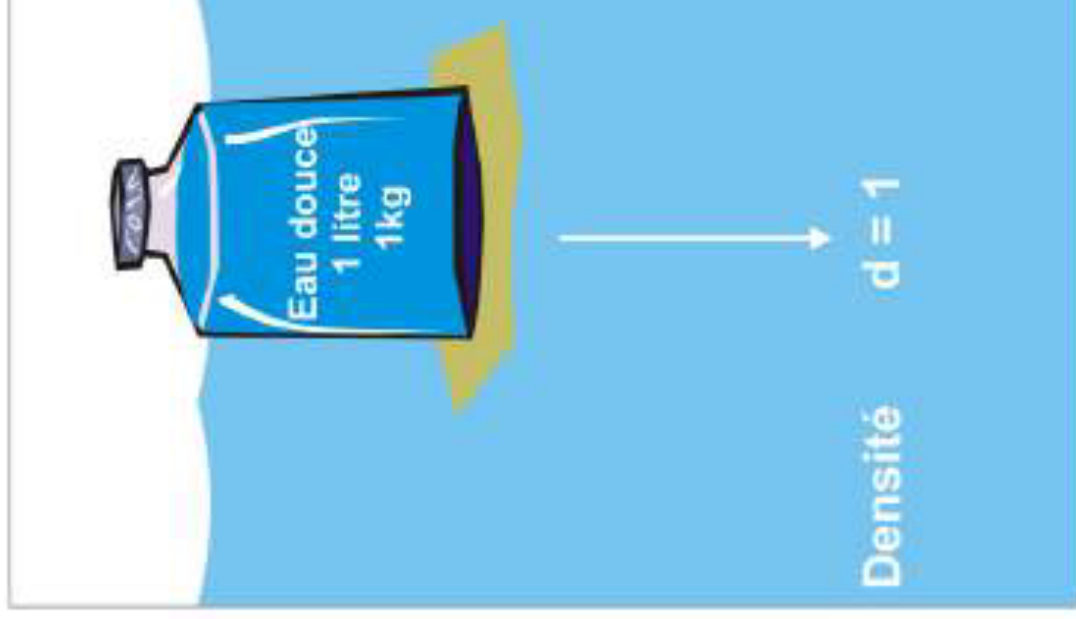
	Poids réel	Volume
Plongeur	60 kg	60 dm3 → 60 l → 60 kg
Combinaison	1 kg	6 dm3 → 6 l → 6 kg
Bloc 12 l	15 kg	12 l → 12 kg
Total	76 kg	78 kg

➤ Check lestage

→ On flotte: le poids apparent est < 0

➡ Rajouter 2 kg de lest

Eau douce & Eau de mer



L'eau de mer est plus dense que l'eau douce : plus forte portabilité

Densité eau de mer : 1,025

Exemple précédent :

- Volume de 78 litres X 1,025
= 79,95 litres soit 79,95 kg
- En mer, il faudra rajouter environ 2 kg supplémentaires aux 2 kg de lest initial



Principaux Facteurs ayant une influence sur notre Flottabilité

- ✓ La combinaison en néoprène
- ✓ Notre ventilation (poumon-ballast)
- ✓ Notre bouteille (matériau, longue, courte)
- ✓ Notre consommation d'air au cours de la plongée (entre le début, bouteille pleine et la fin)
- ✓ Notre gilet
- ✓ Et d'une manière générale tout équipement embarqué

Signes de surlestage :

- Incapacité à se maintenir en surface gilet vide
- Descente rapide
- En immersion, difficulté à trouver son équilibre
- Plongeur droit, en hippocampe dans l'eau, il palme quasi debout

Risques du surlestage :

- Fatigue, essoufflement
- Consommation d'air excessive
- Mal de dos
- Difficultés à maintenir un niveau d'immersion en pleine eau, dépasse une profondeur plancher
- Risque de noyade pour soi et pour un équipier qui aide, le surpoids rendant la remontée difficile

Flottabilité et relevage d'objet en Plongée

Une ancre de volume 3 dm^3 et de densité $D=7$ est posée sur un fond de 25m , en mer.

1. *Quel est son poids réel ?*
2. *Quel est son poids apparent ?*
3. *Pour la relever à l'aide d'un parachute de relevage, combien d'air devez-vous mettre dans le parachute ?*
4. *A quel volume cela correspond-il en équivalent surface ?*



1. Poids réel = $3 \text{ dm}^3 \times 7 \text{ kg/dm}^3 = \mathbf{21 \text{ kg}}$
2. Poids apparent = Poids réel – Poussée d'Archimède
Poids apparent = $21 \text{ kg} - (3 \text{ dm}^3 \times 1,025 \text{ kg/dm}^3) = 21 \text{ kg} - 3,075 \text{ kg} = \mathbf{17,925 \text{ kg}}$
3. Il faut que la poussée d'Archimède corresponde à $17,925 \text{ kg}$ ou litres, dans une eau de densité $1,025$.
→ Volume $\times 1,025 = 17,925$ litres
→ Volume = $17,925 / 1,025 = \mathbf{17,48 \text{ dm}^3}$
4. A 25m la pression est de $3,5$ bars. Les $17,48 \text{ dm}^3$ à 25m correspondent à un volume équivalent surface de : $17,48 \text{ dm}^3 \times 3,5 \text{ bars} = \mathbf{61,18 \text{ dm}^3}$

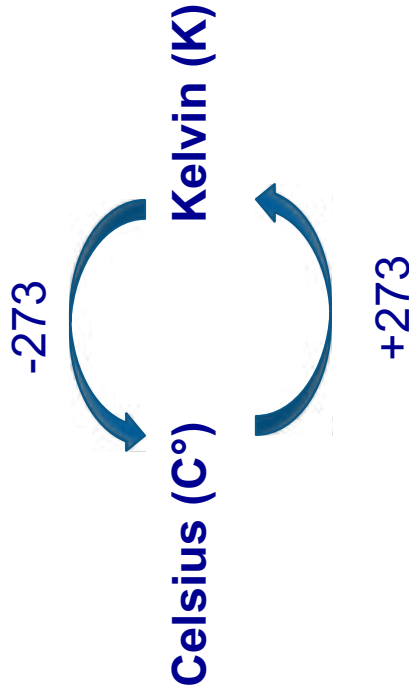
7 SYNTHESE LES FORMULES CLES

Synthèse – Formules Clés

PRESSION – VOLUME *(loi de Mariotte)*

→ $P \times V = \text{Constante}$

TEMPERATURE & PRESSION *(loi de Charles)*

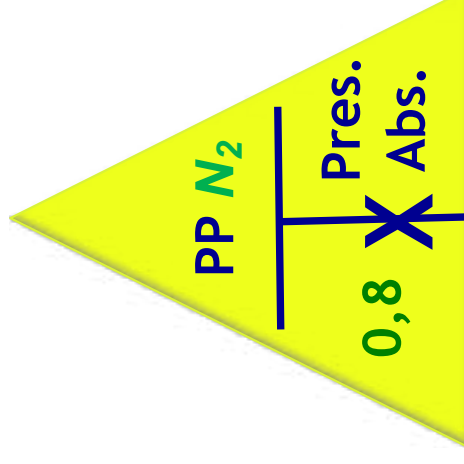
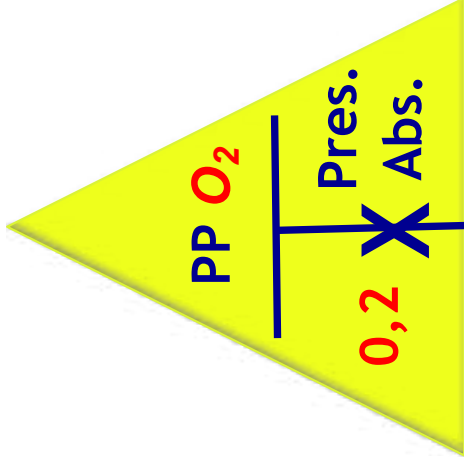


P initiale	=	P Finale
_____		_____
T° initiale en K		T° finale en K

Synthèse – Formules Clés

PRESSIONS PARTIELLES *(loi de Dalton)*

→ $P_p(\text{gaz}) = P \text{ absolue} \times \%(\text{gaz})$



→ Seuils de toxicité :

- **Oxygène O_2** → Pp de 1,6 bar
- **Azote N_2** → Pp de 5,6 bars (*Narcose*)

FLOTTABILITE (*Archimède*)

→ Poids Apparent = Poids Réel - Poussée d'Archimède

→ Densité eau de mer : 1,025

Fin

