



PHYSIQUE : LOI DALTON – LOI HENRY

COURS THÉORIQUES - GUIDE DE PALANQUEE N4

11 Décembre 2021

VERSION 2021 - PROPOSÉE PAR :
LE-GOFF MARC / MF2 2293

Justificatif

- ❑ En plongeant, nous mettons en jeu des lois physiques
- ❑ Elles interviennent dans les phénomènes physiologiques spécifiques à la plongée
- ❑ Elles permettent de comprendre les accidents, donc de mieux les prévenir (**rôle du GP**)
- ❑ Aujourd'hui nous abordons les thèmes de la physique qui interviennent dans :
 - Les accidents biochimiques (Dalton)
 - Les accidents biophysiques (Dalton + HENRY)



□ LOI DALTON

- **1 – Justification**
- **2 - Rappels et notions fondamentales**
 - 2.1 - Les Pressions
 - 2.2 - La composition de l'air
 - 2.3 - La compressibilité des gaz
- **3 - Les mélanges gazeux**
 - 3.1 - La diffusion des gaz: L'expérience de Bertholet
- **4 - Applications à la plongée**
 - 4.1 - Les accidents dits "toxiques" ou biochimiques
 - 4.2 - Le calcul des tables de plongée.
 - 4.3 - La plongée aux mélanges autres que l'air
- **5 - Exercices d'application**

□ LOI HENRY

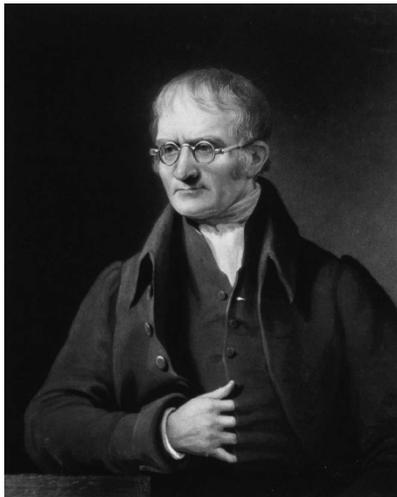
- **1 – Justification**

Idem Rappels / DALTON

- **2 - Rappels et notions fondamentales**
 - 2.1 - Les Pressions
 - 2.2 - La composition de l'air
 - 2.3 - La compressibilité des gaz
- **3 - Les mélanges gazeux**
 - 3.1 - La diffusion des gaz: L'expérience de Bertholet
- **4 - La dissolution des gaz dans les liquides**
 - 4.1 - L'équilibre dynamique: la saturation
 - 4.2 - Influence des variations de pression
 - 4.3 - Facteurs influents sur la dissolution
- **5 – Notion de Gradient & période**
- **6 - Courbes de saturation et désaturation**
- **7 – Coefficient de sursaturation critique**
- **8 – Compartiment directeur**



LOI DE DALTON - « Les pressions Partielles »



(1766 -1844)
Chimiste et physicien britannique

1 – Justification



DALTON a précisé quelques phénomènes observés tous les jours tels que :

→ La présence d'un gaz nocif dans l'air que l'on respire peut être soit inoffensif, soit provoquer des malaises. Tout dépend de la quantité de gaz qui s'y trouve. Le fait qu'il soit mélangé à un autre gaz n'empêche pas ses effets.

→ Un gaz exerce sa propre action comme s'il était seul.

→ Lorsqu'on laisse échapper une petite quantité de gaz de notre gazinière, l'odeur tend à envahir toutes les pièces. Plus le gaz se répand, moins son odeur est sensible car il se mélange dans une quantité d'air plus grande.

→ Le gaz envahit tout l'espace qu'il lui est offert ; si l'espace augmente, la concentration diminue.

2 - Rappels et notions fondamentales

- 2.1 - Les Pressions
- 2.2 - La composition de l'air
- 2.3 - La compressibilité des gaz



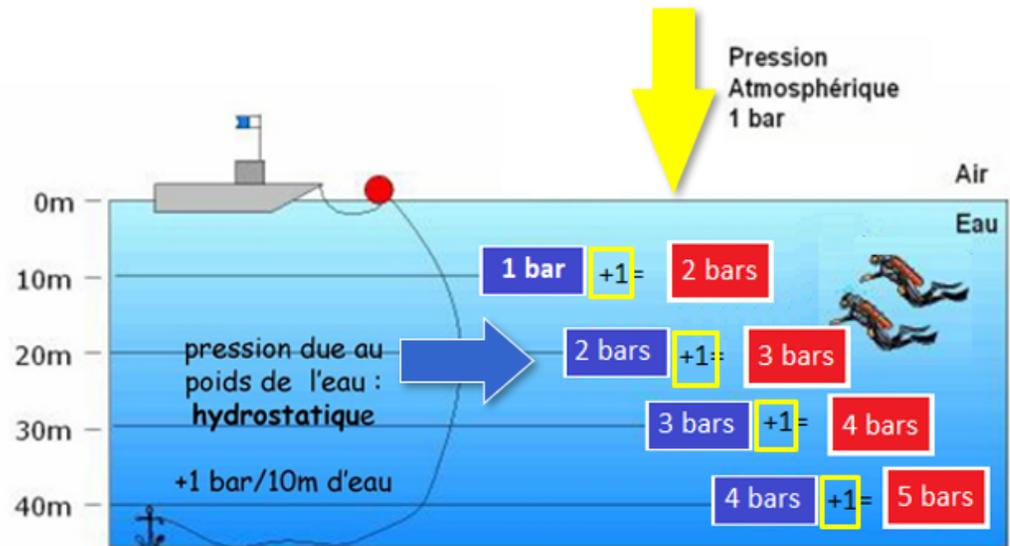
Les Pressions

- Fonction de l'altitude & de la densité de l'eau
- P. absolue = P. atmosphérique $f(\text{alt})$ + P. hydrostatique $f(d)$

$$1 \text{ Pascal} = \frac{1 \text{ Newton}}{1 \text{ m}^2}$$

$$1 \text{ Bar} = \frac{1 \text{ Kgf}}{1 \text{ cm}^2}$$

$$1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pascals} = 10^5 \text{ Pascals}$$



2 - Rappels et notions fondamentales

- 2.1 - Les Pressions
- 2.2 - La composition de l'air
- 2.3 - La compressibilité des gaz



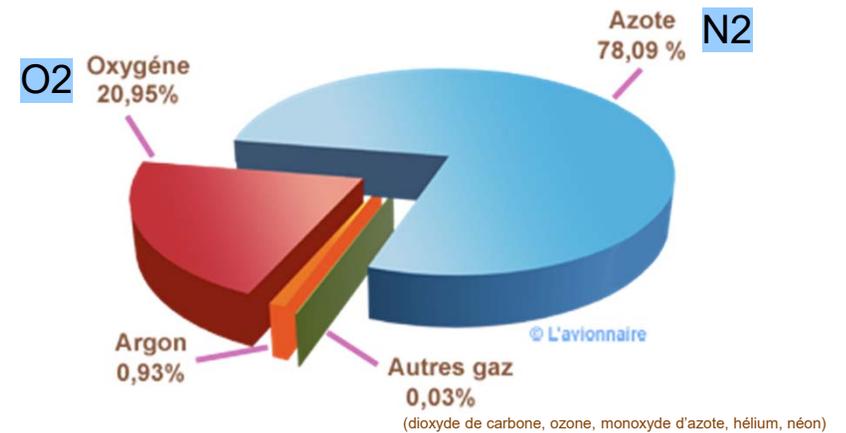
□ L'air respiré en plongée ...

- n'est pas un corps pur
- mais un mélange de gaz aux comportements chimiques et physiologiques différents

□ Très régulièrement, on prend N₂=80% et O₂=20%

□ De plus, l'air ambiant n'est pas sec.

- En fonction des conditions atmosphérique, la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air peut aller de 0 à 7%



Gaz constituants de l'air sec	Pourcentages en volume
Azote (N ₂)	78,09
Dioxygène (O ₂)	20,95
Argon (A)	0,93
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,035
Néon (Ne)	1,8 10 ⁻³
Hélium (He)	5,24 10 ⁻⁴
Krypton (Kr)	1,0 10 ⁻⁴
Hydrogène (H ₂)	5,0 10 ⁻⁵
Xénon (Xe)	8,0 10 ⁻⁶
Ozone (O ₃)	1,0 10 ⁻⁶
Radon (Rn)	6,0 10 ⁻¹⁸

2 - Rappels et notions fondamentales

- 2.1 - Les Pressions
- 2.2 - La composition de l'air
- 2.3 - La compressibilité des gaz

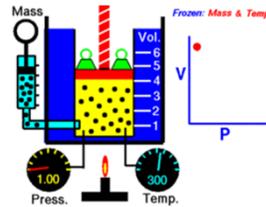
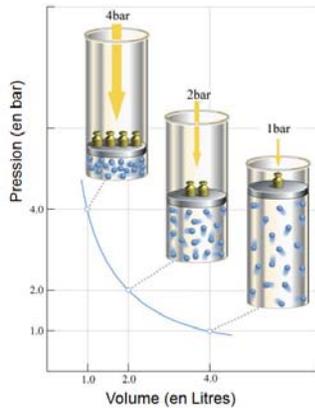


Loi de Boyle & Mariotte :

- Les corps solides et les liquides sont pratiquement incompressibles.
- En revanche, les gaz sont aisément compressibles (ex : pompe à vélo)
- La pression exercée par l'eau va donc comprimer les gaz (ici l'air)

Définition :

- A T° constante, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression exercée.



$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2 = Cste \text{ à même } T^\circ$$

Influence de la T° sur la pression de l'air :

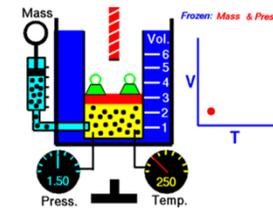
- Une molécule de gaz qui se réchauffe occupe un volume plus important et puisque dans la bouteille, le volume est invariant, c'est donc la Pression qui augmente !

Le Physicien Gay Lussac a pu compléter ainsi la loi de Mariotte :

- A volume constant, la pression absolue d'un volume gazeux est directement proportionnelle à la T° absolue :

$$P * V = n * R * T = Cste$$

- N = nombre de molécules gramme du gaz considéré
- R = constante des gaz parfaits
- T = température absolue (Kelvin et $0^\circ C = 273K$)

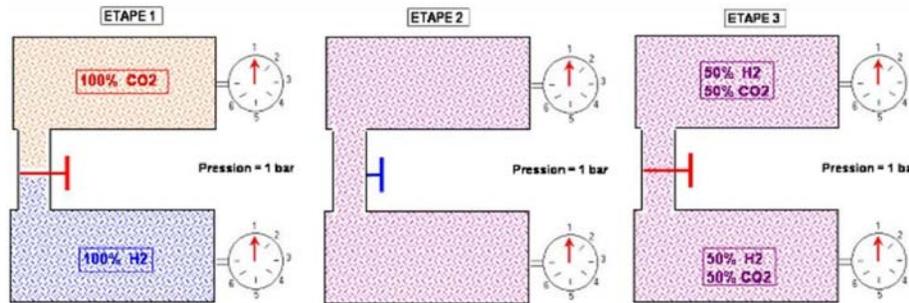


$$\frac{P}{T} = n * \frac{R}{V} = Cste \rightarrow \frac{P}{T} = Cste \text{ ou } \frac{P1}{T1} = \frac{P2}{T2}$$

3 - Les mélanges gazeux

3.1 - La diffusion des gaz: L'expérience de Bertholet

- On prend deux récipients d'un litre contenant l'un de l'hydrogène H₂ et l'autre du dioxyde de carbone CO₂ à la pression de 1 bar. Ces 2 récipients peuvent être mis en communication en ouvrant un robinet.



ETAPE 1

- Robinet fermé, un récipient contient 100% de H₂ à la pression de 1 bar et l'autre 100% de CO₂ à la pression de 1 bar

ETAPE 2

- On ouvre alors le robinet et on remarque que la pression des 2 récipients ne varie pas et reste égale à 1 bar.

ETAPE 3

- On referme le robinet. On constate alors que chaque récipient contient un mélange gazeux composé de 50 % de H₂ et 50 % de CO₂, ces mélanges étant **toujours à la pression de 1 bar**. Dans chaque récipient les 2 gaz occupent donc la **moitié du volume** et est responsable de la **moitié de la pression totale**.

Énoncé de la loi de DALTON

La loi de Dalton nous dit que dans le cas de gaz parfaits, la pression totale exercée par un mélange est égale à la somme des pressions partielles des constituants.

- Dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte comme s'il était seul à occuper le volume totale occupé par le mélange
- Dans un mélange gazeux, la somme des pressions partielles de chaque gaz est égale à la pression totale exercée sur le mélange

3 - Les mélanges gazeux

3.1 - La diffusion des gaz: L'expérience de Bertholet

□ Des gaz différents se mélangent de façon parfaite après un certain temps

□ Chaque gaz emplit le volume disponible comme s'il était seul



□ La pression « partielle » d'un gaz X, notée $P_p X$, est la pression qu'il y aurait s'il était seul (**Loi de Dalton 1**)

□ La pression totale P_{abs} d'un mélange gazeux est la somme des pressions partielles (**Loi de Dalton 2**)

$$\rightarrow \text{Application : } P_{abs} = P_{pN_2} + P_{pO_2}$$

□ La proportion (pourcentage) %X d'un gaz X dans un mélange est le rapport de sa pression partielle $P_p X$ à la pression totale P_{abs} (**Loi de Dalton 3**)

$$P_p \text{ Gaz} = \% \text{ Gaz} * P_{abs}$$

Enoncé de la loi de DALTON

La loi de Dalton nous dit que dans le cas de gaz parfaits, la pression totale exercée par un mélange est égale à la somme des pressions partielles des constituants.

- Dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte comme s'il était seul à occuper le volume totale occupé par le mélange
- Dans un mélange gazeux, la somme des pressions partielles de chaque gaz est égale à la pression totale exercée sur le mélange
- La pression partielle d'un gaz dans un mélange est égale au produit de la pression totale du mélange par le pourcentage du gaz considéré dans le mélange

4 - Applications à la plongée

- 4.1 - Les accidents dits "toxiques" ou biochimiques
- 4.2 - Le calcul des tables de plongée.
- 4.3 - La plongée aux mélanges autres que l'air

La Pp dans votre rôle de GP

❑ Toxicité de l'azote

- ❑ La toxicité à l'azote est liée à son action quand il se dissout dans les graisses des tissus nerveux.
- ❑ On l'appelle **la narcose** à l'azote, ou l'ivresse des profondeurs
 - ❑ Apparition de la narcose pour une pression partielle de 3,5 b chez les sujets très sensibles
 - ❑ les 1ers signes visibles apparaissent habituellement dès 3,9 b d'azote
 - ❑ la narcose est pratiquement constante vers 6 b d'azote, soit pour une pression absolue de 8 b en air, soit 70 m



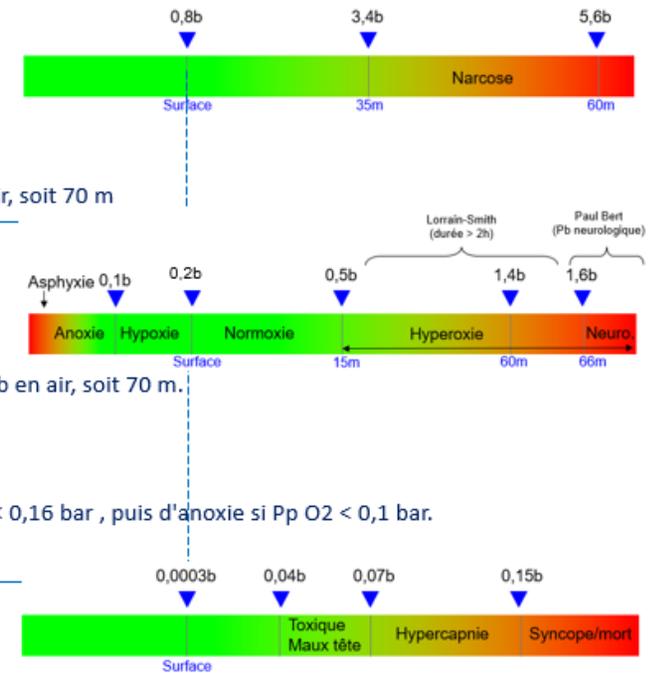
❑ Toxicité de l'oxygène

- ❑ On parle d'hyperoxie aigue, de toxicité neurologique de l'oxygène, ou encore d'effet Paul Bert.
 - ❑ Seuil de toxicité pour la PpO2:
 - ❑ en immersion on retiendra un seuil conventionnel de 1,6 bar, soit pour une pression absolue de 8 b en air, soit 70 m.
 - ❑ en décompression au sec (tourelle, bulle), on retiendra un seuil conventionnel de 2,2 bar.
- ❑ et d'Hypoxie
 - ❑ Si la pression partielle d'oxygène est trop faible, le cerveau va en souffrir. On parle d'hypoxie si Pp O2 < 0,16 bar , puis d'anoxie si Pp O2 < 0,1 bar.
 - ❑ Cela explique les syncopes survenant à la remontée après une apnée.



❑ Toxicité du gaz carbonique

- ❑ Lorsque la pression partielle de CO2 dépasse 0,07 bar (on parle d'Hypercapnie), le centre respiratoire du bulbe rachidien entraîne une accélération de la respiration, donc un **essoufflement**. Un peu de **CO2 dans l'air comprimé**, anodin en surface, devient dangereux en profondeur.



4 - Applications à la plongée

- 4.1 - Les accidents dits "toxiques" ou biochimiques
- 4.2 - Le calcul des tables de plongée.
- 4.3 - La plongée aux mélanges autres que l'air

- Qu'elles soient à l'air, à l'Oxygène, au Nitrox ou à l'Hélium, les **tables de plongées** sont conçues pour donner des paramètres de décompression en fonction du **temps de plongée et de la profondeur** à laquelle se trouve le plongeur.
- Dès lors, s'il l'on veut connaître la quantité d'Azote ou d'Hélium dissoute au fond ou si l'on désire connaître l'Azote résiduelle dans les tissus à l'issue d'une exposition à l'Oxygène il convient de se référer aux **pressions partielles**.
- En effet, la pression partielle de chaque gaz variera en fonction de la profondeur (pression absolue).

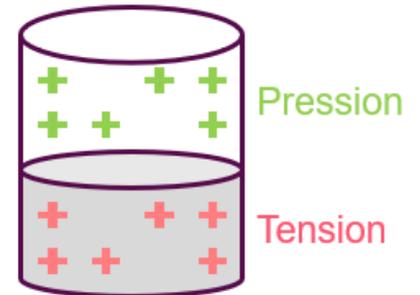
$$P_p \text{ Gaz} = \% \text{ Gaz} * P_{abs}$$

- Ex : à 40m, la Pp d'Azote sera donc cinq fois supérieure qu'en surface.
- → Par ailleurs, on commencera à évoquer la notion de **TENSION**

Tableau I : Détermination de l'azote résiduel

Intervalle de surface

	2h	3h30	4h	4h30	5h	5h30	6h	6h30	7h	7h30	8h	8h30	9h	9h30	10h	10h30	11h	11h30	12h
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
20	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
30	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
40	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
50	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
60	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
70	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
80	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
90	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
100	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
110	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
120	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12



4 - Applications à la plongée

4.1 - Les accidents dits "toxiques" ou biochimiques

4.2 - Le calcul des tables de plongée.

4.3 - La plongée aux mélanges autres que l'air

- ❑ Intérêt de diminuer PpN₂ :
 - ❑ éviter la Narcose
 - ❑ Éviter la dissolution dans l'organisme qui conduit à un risque d'ADD
- ❑ Pour diminuer PpN₂ à Pamb donnée, il faut diminuer %N₂
- ❑ Obtenu avec mélanges gazeux autres que l'air
 - ❑ Nitrox : mélange enrichi en O₂ (le diluant le moins cher et le plus pratique)
 - ❑ Trimix, HélioX : mélanges pour plongée Tech et professionnelle. Air ou O₂ et d'autres diluants : He, H₂ (gaz à faible densité pour limiter les efforts respiratoires sous forte pression)
- ❑ Le terme Nitrox est la contraction des noms anglais **NITR**ogen et **OX**ygen
 - ❑ Exemples : Nitrox 32/68, 36/64, 40/60 → c'est-à-dire 32% O₂ et 68% N₂
- ❑ **Attention** : la réglementation impose de respecter PpO₂ < 1,6 bar
- ❑ Pour chaque mélange il y a une profondeur plancher (ne pas aller au-delà)

- ❑ Différents mélanges :
 - ❑ NITROX, mélange gazeux oxygène/azote
 - ❑ TRIMIX, mélange azote/oxygène/hélium
 - ❑ HELIOX, mélange hélium/oxygène
 - ❑ HYDROX, mélange hydrogène/oxygène
 - ❑ HYDRELIOX, mélange hydrogène/hélium/oxygène



5 - Exercices d'application

Sachant que la pression partielle maximale d'Oxygène admissible lors d'une plongée à l'air est de 1,6 bar.
→ Quelle sera la profondeur maximale théorique d'utilisation de l'air?



- Si $P_p = \text{Concentration (\%)} \times P. \text{ abs}$
- → $P. \text{ Abs} = \frac{P_p}{\text{Concentration}}$
- Ainsi → $P. \text{ abs} = \frac{1,6 \text{ bars}}{20\%} = \frac{1,6}{0,2} = 8 \text{ bars}$ soit 70 mètres

Bah ... qu'est-ce qui régit la profondeur max de la plongée à 60 m ???

→ $P. \text{ abs} = \frac{5,6 \text{ bars}}{80\%} = \frac{5,6}{0,8} = 7 \text{ bars}$ soit 60 mètres →



Quelle est la limite d'utilisation d'une bouteille Nitrox (40/60) : 40% d'O₂, 60% de N₂ ?



- ❑ NITROX 40/60
 - ❑ 40 → 40% d'Oxygène (O₂)
 - ❑ 60 → 60% d'Azote (N₂)
- ❑ Pp Gaz = % Gaz * Pabs
- ❑ Pp O₂ maxi = 1,6 bar

→ $1,6 = 0,4 \times P_{abs} \rightarrow P_{abs} = 1,6 / 0,4 = 4 \text{ bars} \rightarrow \text{Prof max } 30 \text{ m}$

5 - Exercices d'application

On dispose d'une bouteille de $V_1=10$ litres d'oxygène gonflée à 100 bars et d'une autre bouteille de $V_2=18$ litres d'azote gonflée à 50 bars.

On met les 2 bouteilles en communication jusqu'à équilibration complète.

- la pression totale du mélange
- la pression partielle de chacun des gaz
- la concentration respective de chacun des gaz



$$\square \frac{(V_1 \times P_1) + (V_2 \times P_2)}{(V_1 + V_2)} = \frac{(10 \times 100) + (18 \times 50)}{(18 + 10)} = P_3 \rightarrow P_3 = 67,86 \text{ b}$$

$$\square P_p = P \times \% \text{ du gaz utilisé}$$

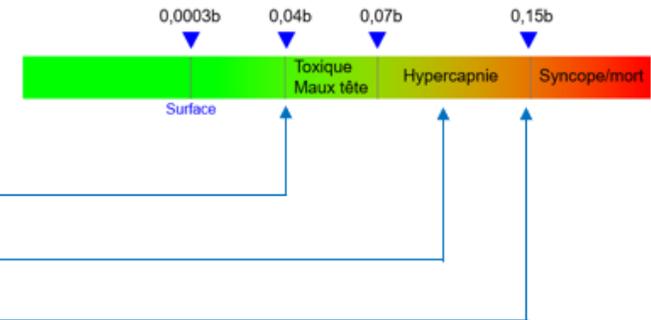
$$\square P_{pO_2} = \frac{(V_1 \times P_1)}{(V_1 + V_2)} = \frac{(10 \times 100)}{28} = 35,71 \text{ b} \rightarrow 52,62 \%$$

$$\square P_{pN_2} = \frac{(V_2 \times P_2)}{(V_1 + V_2)} = \frac{(18 \times 50)}{28} = 32,14 \text{ b} \rightarrow 47,36 \%$$

5 - Exercices d'application

Un plongeur à l'issu d'un mauvais chargement de bloc part avec un bloc contenant de l'air avec 2% de CO2

- S'en aperçoit-il en surface ?
- Quels sont les symptômes à 10M 30M 50M ?



- Si $P_p = \text{Concentration (\%)} \times P. \text{ abs}$
- À 10m → $P_p = 0,02 \times 2 \rightarrow P_p = 0,04 \text{ bars}$
- À 30m → $P_p = 0,02 \times 4 \rightarrow P_p = 0,08 \text{ bars}$
- À 50m → $P_p = 0,02 \times 6 \rightarrow P_p = 0,12 \text{ bars}$

- Attention au lieu de la prise d'air du compresseur
- + alerte si mal de tête

L'air contient aujourd'hui environ 0,04 % de CO2.
 À partir d'une certaine concentration dans l'air, ce gaz s'avère dangereux voire mortel.
 La valeur limite d'exposition est de 3 % sur une durée de 15 minutes.
 Cette valeur ne doit jamais être dépassée. Au-delà, les effets sur la santé sont d'autant plus graves que la teneur en CO2 augmente.
 Ainsi, à 2 % de CO2 dans l'air, l'amplitude respiratoire augmente.
 À 4 %, la fréquence respiratoire s'accélère.
 À 10 %, peuvent apparaître des troubles visuels, des tremblements et des sueurs.
 À 15 %, c'est la perte de connaissance brutale.
 À 25 %, un arrêt respiratoire entraîne le décès.



LOI DE HENRY - « La dissolution des gaz »



(1774 - 1836)

Physicien et physicien britannique

1 – Justification

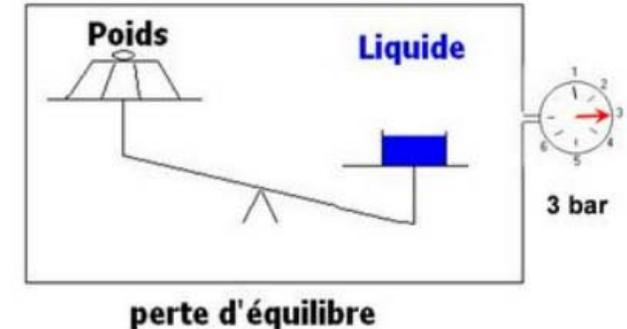
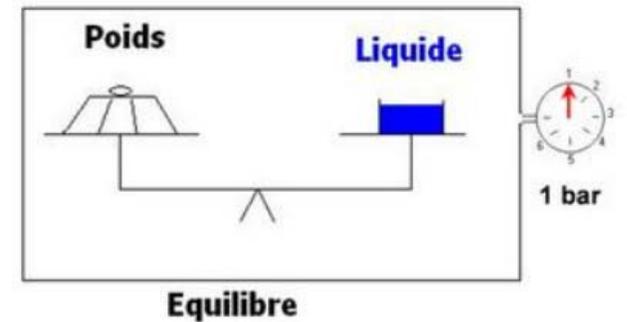


- Faisant appel à quelques notions de physique, l'étude de la dissolution des gaz dans les liquides va permettre au plongeur de comprendre le principe d'un phénomène auquel il est confronté dès lors qu'il s'immerge.
- En effet, depuis le niveau 1, le plongeur se voit expliquer qu'il doit réaliser des **paliers** (même s'ils ne sont que de « principe ») car cela lui permet de dissoudre l'Azote accumulée en plongée dans ses tissus.

→ Application directe de la loi de HENRY

1 – Justification

- Prenons une balance placée dans une enceinte close dans laquelle la pression est de 1 bar.
 - Plaçons en équilibre sur cette balance un récipient contenant de l'eau et un poids.
- Augmentons la pression au sein de l'enceinte à 3 bars.
 - On remarque au bout d'un certain temps que la balance n'est plus en équilibre : le récipient contenant l'eau est plus lourd que le poids. Ce déséquilibre est dû au gaz qui s'est dissout dans l'eau à cause de l'augmentation de la pression.
- Si on redescend la pression de l'enceinte à 1 bar la balance se rééquilibre, l'échange gazeux se fait donc dans les 2 sens.



La Loi de HENRY

A température constante et à saturation, la quantité de gaz dissout dans un liquide est proportionnelle à la pression qu'exerce ce gaz sur le liquide.

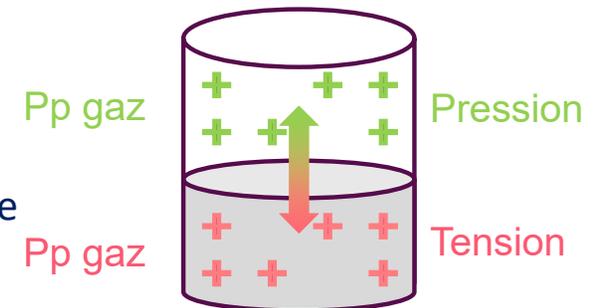
4 - La dissolution des gaz dans les liquides

- 4.1 - L'équilibre dynamique: la saturation
- 4.2 - Influence des variations de pression
- 4.3 - Facteurs influents sur la dissolution

❑ Le gaz mis en contact avec le liquide va se dissoudre dans le liquide jusqu'à ce que la quantité de gaz dissoute dans le liquide (Tension exprimée en pression partielle) soit égale à la pression partielle du gaz en contact avec le liquide.

❑ Il y a équilibre dynamique, la quantité de gaz se dissolvant dans le liquide est égale à la quantité de gaz s'échappant du liquide.

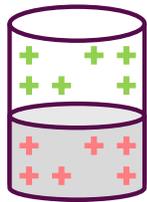
❑ Cet état est appelé **saturation** : la pression partielle de gaz en contact avec le liquide est égale à la pression du gaz dissout dans le liquide (Tension).



4 - La dissolution des gaz dans les liquides

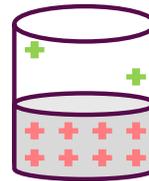
- 4.1 - L'équilibre dynamique: la saturation
- 4.2 - Influence des variations de pression
- 4.3 - Facteurs influents sur la dissolution

$P = T \rightarrow$ Saturation



L'état de **saturation** correspond à l'état d'équilibre entre la pression du gaz libre et la tension du gaz dissous dans le liquide.
C'est par exemple l'état avant le **début de plongée**

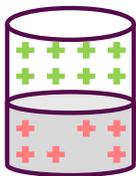
$P \ll T \rightarrow$ Sursaturation critique



En revanche si le déséquilibre entre la pression et la tension est trop important, comme cela peut être le cas **après une remontée trop rapide**, on se trouve en état de **sursaturation critique**.
C'est dans ces conditions que surviennent les **Accidents De Décompression**.

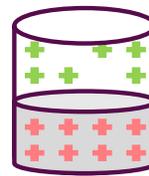


$P > T \rightarrow$ Sous-saturation



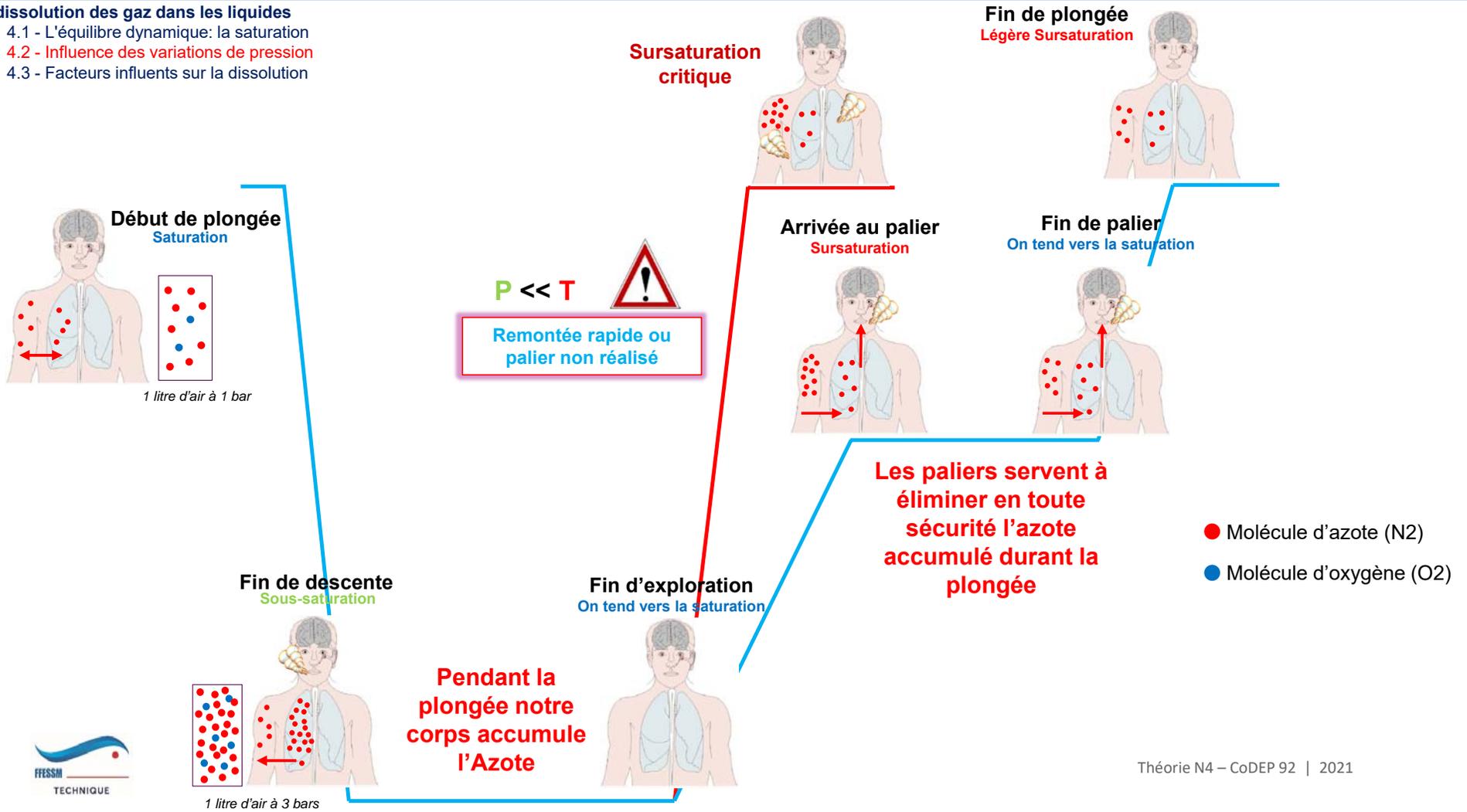
L'état de **sous-saturation** correspond à un état de déséquilibre. La pression du gaz libre est supérieure à la tension du gaz dissous.
C'est l'état à la **fin de la descente**.
Pour équilibrer le système, le gaz pénètre et se dissout dans le liquide.
C'est ce que l'on appelle la **Diffusion**.

$P < T \rightarrow$ Sursaturation



L'état de **sursaturation** correspond à un état de déséquilibre.
La pression du gaz libre est inférieure à la pression du gaz dissous.
C'est l'état à la remontée **avant les paliers**.
Pour équilibrer le système, le gaz s'échappe du liquide et reprend sa forme gazeuse.

- 4 - La dissolution des gaz dans les liquides
- 4.1 - L'équilibre dynamique: la saturation
- 4.2 - Influence des variations de pression
- 4.3 - Facteurs influents sur la dissolution



4 - La dissolution des gaz dans les liquides

- 4.1 - L'équilibre dynamique: la saturation
- 4.2 - Influence des variations de pression
- 4.3 - Facteurs influents sur la dissolution

La Pp dans votre rôle de GP

La pression

- Pour nous plongeurs, la pression dépend de **la profondeur**. Elle va agir sur la dissolution des gaz dans nos tissus :
 - **La nature du gaz**: Pour la plongée à l'air, ce gaz est l'**azote**. Le coefficient de solubilité de l'azote est élevé ce qui explique la plongée aux mélanges qui tente à remplacer une portion de l'azote par un autre gaz dont la solubilité est plus faible.
 - **La nature du liquide**: Le facteur et la vitesse de dissolution de l'azote est **différent suivant le tissu organique** : muscle, **graisse...** La quantité d'azote dissoute dans ces différents tissus sera donc différente.



La température

- La quantité de gaz dissoute diminue lorsque la température augmente et inversement. En général la température de l'organisme est constante, cependant en cours de plongée elle peut descendre **en cas de froid** ce qui entraîne une augmentation de la quantité de gaz dissoute et donc peut poser problème.



La durée d'exposition

- La dissolution n'est pas immédiate mais est directement liée à la **durée de la plongée**, ce qui a permis de réaliser la courbe de sécurité. Plus longue sera la durée, plus importante sera la quantité de gaz à se dissoudre, donc sa tension ==> courbe exponentielle



4 - La dissolution des gaz dans les liquides

- 4.1 - L'équilibre dynamique: la saturation
- 4.2 - Influence des variations de pression
- 4.3 - Facteurs influents sur la dissolution

La Pp dans votre rôle de GP

La surface d'échange

- Plus la surface de contact entre un gaz et un liquide est grande, plus la dissolution sera rapide pour un même volume de gaz à dissoudre : c'est le phénomène de diffusion (Capacité d'un gaz à pénétrer à l'intérieur d'un milieu où sa concentration y est plus faible).
- La surface de contact entre le liquide et le gaz. **Ce facteur n'intervient pas dans le cas de la plongée** car la surface des poumons est fixe. La surface d'échange se situe au niveau des alvéoles pulmonaires.

L'agitation

- L'agitation du gaz augmente la dissolution des gaz. Cette agitation a lieu si un **effort important** est réalisé en cours de plongée.

La nature des tissus et leur période

- Les tissus** : Afin d'étudier le mécanisme de dissolution de l'azote dans le corps humain, on fait appel à la notion de **tissu ou compartiment**. Le tissu ou compartiment est un liquide hypothétique censé représenter les propriétés moyennes des tissus anatomiques lors de la dissolution de l'azote dans le corps humain.
- La période d'un tissu** : La période d'un tissu est le temps nécessaire à ce tissu pour absorber ou restituer la moitié de la quantité de gaz qu'il lui manque ou qu'il a en trop pour être à saturation.

... du temps ...

- La loi de Henry décrit l'état de saturation d'un liquide (tissus) en gaz.
- Cet état ne sera atteint qu'après une longue période de contact entre le liquide et le gaz.

→ Ce n'est pas le cas de nos tissus

... un écart ...

- La vitesse à laquelle le tissu va se saturer (tendre vers l'état de saturation) va dépendre de la différence existant entre la pression partielle du gaz en contact avec le liquide et la tension du gaz dans le liquide: c'est le **gradient**
- La **période** d'un tissu sera le temps qu'il mettra à dissoudre la moitié du gradient disponible.
- Il existe des tissus dits "**longs**" et des tissus dits "**courts**".
- Les tables de plongée à l'air Marine Nationale 1990 (MN90) ont été réalisées à partir de **12 tissus** ayant chacun une **période différente**. Ces tissus différenciés par leur période et leur coefficient de sursaturation critique sont appelés **compartiments**.

Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	minutes
Sc	2.72	2.54	2.38	2.20	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54	

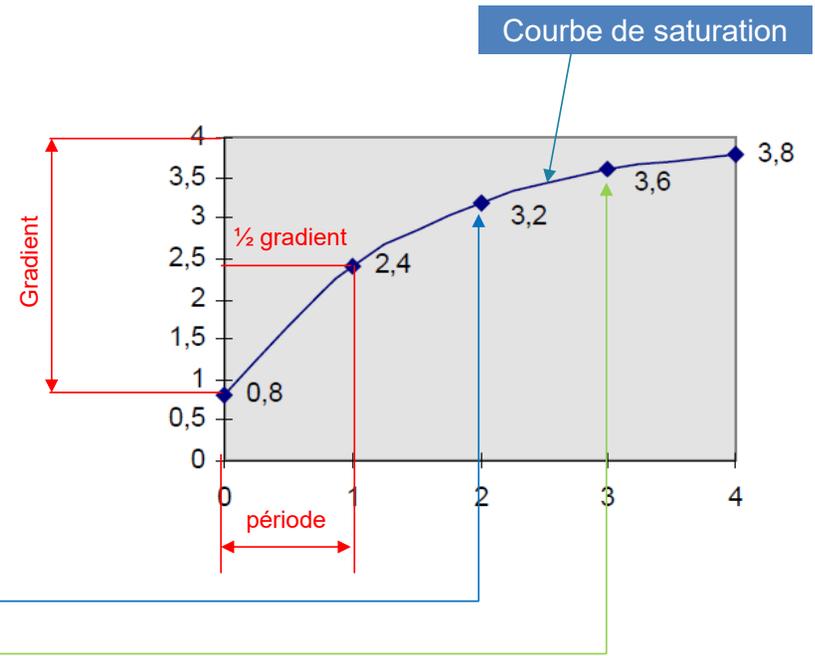
6 - Courbes de saturation et désaturation

Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	minutes
Sc	2.72	2.54	2.38	2.20	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54	

- Comme il a été vu précédemment, à chaque période, un tissu (ou compartiment) absorbe la moitié du gradient disponible.
- Soit un tissu d'une Période P saturé en Azote à pression ambiante et à l'air (PpN2 = 0,8 bar). On comprime ce tissu à une pression ambiante de 5 bars à l'air
- D'où PpN2 = 80% x 5 bars = 4 bars

Cas pratique :

- Après une période la tension d'azote dans le tissu augmentera de 50% du gradient,
- soit: $(4 - 0,8)/2 = 1,6$ bar → Donc TN2 = 0,8 + 1,6 = 2,4 bars.
- Après 2 périodes la tension d'azote dissoute sera de: $(4 - 2,4)/2 = 0,8$ bars.
- Donc TN2 = 2,4 + 0,8 = 3,2 bars
- Après 3 périodes la TN2 sera de → TN2 = 3,2 + $(4 - 3,2)/2 = 3,6$ bars.



$$TN2 = \left[Tension\ initiale + \left(\frac{Tension\ finale - Tension\ initiale}{2} \right) \right]$$

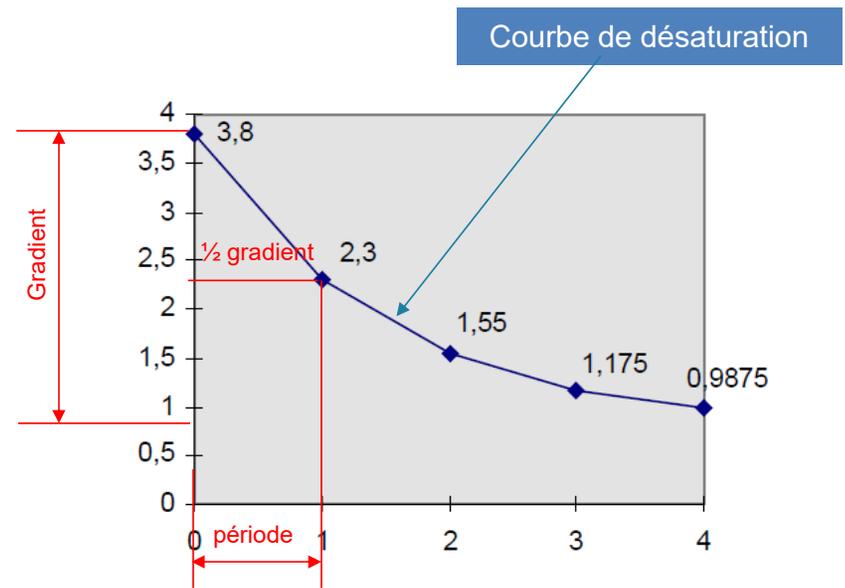
6 - Courbes de saturation et désaturation

Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	minutes
Sc	2.72	2.54	2.38	2.20	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54	

- La courbe de désaturation se présente comme la courbe de saturation mais est inversée.
- Si l'on reprend le même tissu que précédemment qui présente une tension d'azote de 3,8 bars en le soumettant à une pression partielle d'Azote de 0,8 bar (correspondant à la PpN2 dans l'air à la pression atmosphérique)

Cas pratique :

- Après une période la tension d'azote dans le tissus diminuera de 50% du gradient
- soit: $(0,8 - 3,8)/2 = -1,5$ bar → Donc TN2 = $3,8 - 1,5 = 2,3$ bars.
- Après 2 périodes la tension d'azote sera de: $(0,8 - 2,3)/2 = -0,75$ bar.
- Donc TN2 = $2,3 - 0,75 = 1,55$ bar
- Après 3 périodes la TN2 sera de → TN2 = $1,55 + (0,8-1,55)/2 = 1,175$ bars.

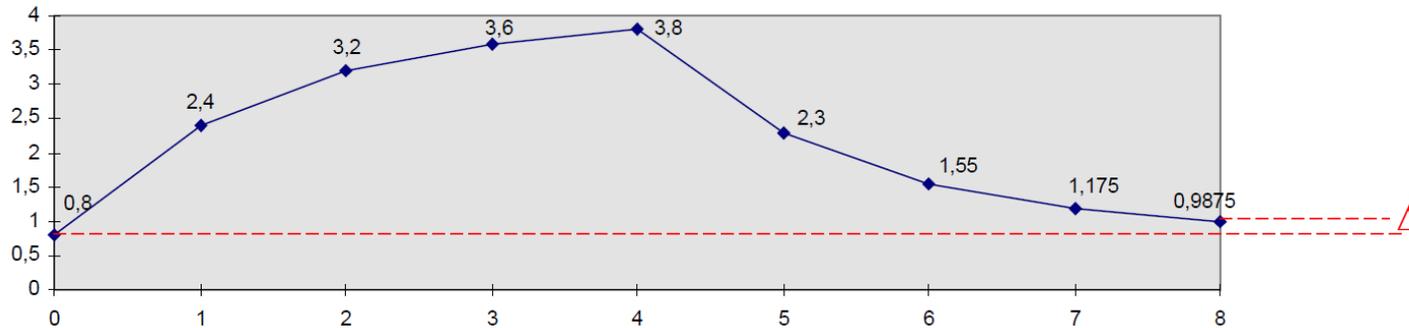


$$TN2 = \left[Tension\ initiale + \left(\frac{Tension\ finale - Tension\ initiale}{2} \right) \right]$$

6 - Courbes de saturation et désaturation

Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	minutes
Sc	2.72	2.54	2.38	2.20	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54	

- On s'aperçoit que le niveau de saturation du tissu après 4 périodes de désaturation est de 0,9875 bar ce qui est supérieur à la tension initiale du tissu avant la phase de saturation (0,8 bar).
- Ainsi, s'il a fallu 4 périodes de saturation pour obtenir une Tension d'Azote dans le tissu de 3,8 bars, il faudra plus de 4 périodes pour le désaturer complètement.
- La courbe d'une plongée d'un tissu ne sera donc pas symétrique: la phase de saturation ne correspondra pas à la phase de désaturation. Cela explique que pour toutes les plongées, la durée totale de **désaturation des tissus sera supérieure à la durée de la plongée**.
- On considère que tous les tissus ne sont totalement désaturés après une plongée qu'après une période de 24 heures. En pratique, on ne retient qu'une période de 12h00 après laquelle on peut réutiliser la table de plongée simple.



Simplification :

- Formule initiale :
$$TN2 = \left[Tension\ initiale + \left(\frac{Tension\ finale - Tension\ initiale}{2} \right) \right]$$
 → à chaque période

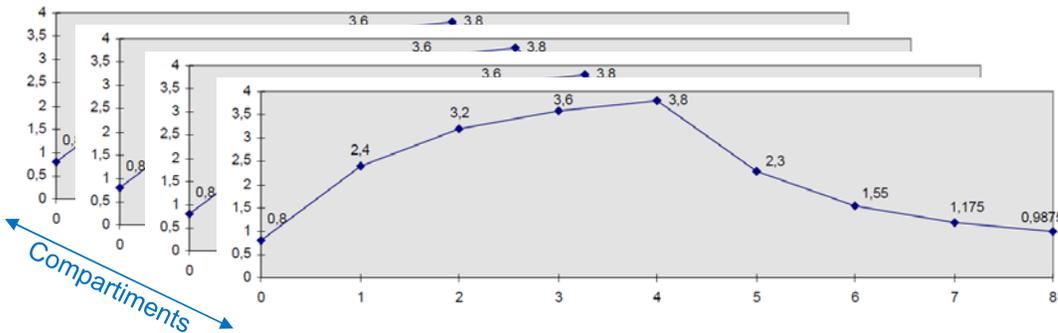
- Il est possible de calculer directement la Tension d'Azote à l'issue de plusieurs périodes selon la formule suivante:

$$TN2 = \left[Tension\ initiale + (Tension\ finale - Tension\ initiale) \times \% \right]$$

- Le pourcentage représente le pourcentage du gradient qui est dissout à l'issue d'un nombre de période donné.
- Pour différentes périodes d'exposition, ce pourcentage sera:

Nombre de périodes	Pourcentage
1	50%
2	75%
3	87,5%
4	93,75%
5	96,875%
6	98,4375%

7 – coefficient de sursaturation critique



Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	minutes
Sc	2.72	2.54	2.38	2.20	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54	

- Le tissu considéré dans l'exemple ci-dessus n'aurait-il pas nécessité de respecter un ou des paliers avant d'être remonté en surface, considérant que le coefficient de sursaturation critique de ce tissu est de 2,72 ?
- Cette question doit être posée dès qu'il s'agit de remonter, dans notre exemple, à la fin de la 4ème période.
- Au début de la remontée, la PpN2 dans le tissu est de 3,8 bars.
- Arrivée en surface, quel serait son coefficient de sursaturation ?

$$Sc = \frac{\text{Tension}}{P. \text{ abs}}$$

← Tension dans le tissu au moment de la remontée (3,8 bars)
← P. abs du niveau où doit être remonté le tissu (soit 1 bar en surface)

$$Sc = \frac{3,8}{1} = 3,8$$

- Le coefficient de sursaturation critique est donc dépassé en surface, on ne peut remonter le tissu sans risque d'accident.

La pression de 1,397 bar → 3,97 mètres
Le palier sera donc réalisé à 6 mètres (car le tissu ne doit pas remonter au-delà de 3,97 mètres pour ne pas risquer d'accident)
Paliers = multiples de 3

$$Sc = \frac{\text{Tension}}{P. \text{ abs}}$$

$$\rightarrow P. \text{ abs} = \frac{\text{Tension}}{Sc}$$

Donc
 $P. \text{ abs} = \frac{3,8}{2,72} = 1,397 \text{ bar}$

- Il convient donc de déterminer une profondeur de palier, c'est-à-dire de déterminer la profondeur (pression absolue) à laquelle la Tension du tissu sera au plus égale à 2,72

Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	minutes
Sc	2.72	2.54	2.38	2.20	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54	

Exercice:

Etudions les Compartiments C 5, C 10 et C 20 pour une plongée de 20 min à 40 mètres.
Quel sera le compartiment directeur et la profondeur du premier palier ?

- 20 mn de plongée → C 5 : 4 périodes / C 10 : 2 périodes / C 20 : 1 période
- Prof = 40m → Pabs = 5 bars → $TN^2 = 0,8 \times 5 = 4$ bars → Gradient : $4 - 0,8 = 3,2$ bars
- Tf (C5) = $0,8 + (3,2 \times 93,75\%) = 0,8 + 3 = 3,8$ bar
- Tf (C10) = $0,8 + (3,2 \times 75\%) = 0,8 + 2,4 = 3,2$ bar
- Tf (C20) = $0,8 + (3,2 \times 50\%) = 0,8 + 1,6 = 2,4$ bar

Nombre de périodes	Pourcentage
1	50%
2	75%
3	87,5%
4	93,75%
5	96,875%
6	98,4375%

- Pabs = $T(C5) / Sc(C5) = 3,8 / 2,72 = 1,39 \rightarrow 3,90 \text{ m} \rightarrow$ palier à 6 m
- Pabs = $T(C10) / Sc(C10) = 3,2 / 2,38 = 1,34 \rightarrow 3,40 \text{ m} \rightarrow$ palier à 6 m
- Pabs = $T(C20) / Sc(C20) = 2,4 / 2,04 = 1,17 \rightarrow 1,70 \text{ m} \rightarrow$ palier à 3 m

→ Compartiment directeur: C 5

→ Dans le cas d'intervalle de surface, il s'agit du compartiment 120 minutes (compartiment le plus long) qui est directeur
→ Dans le calcul de vitesse de remontée, il s'agit plutôt des compartiments courts qui sont directeurs

Maintenant, vous savez :

- Comment évaluer la pression partielle de chacun des gaz respirés et donc leur toxicité

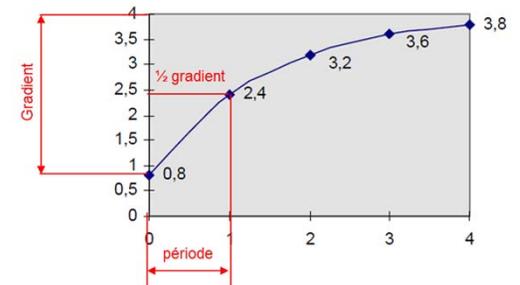
$$P_{abs} = P_{pN_2} + P_{pO_2}$$

$$P_p \text{ Gaz} = \% \text{ Gaz} * P_{abs}$$

- Comment fonctionne un modèle de décompression (tables MN90)
- et vous pouvez appréhender le fonctionnement des autres modèles de décompression, en particulier les ordinateurs

- **Compartiments** : représentation mathématique des tissus pour calculer la décompression
- **Gradient** : D Pp gaz entre état initial et état final
- **Période** : Temps que met un compartiment à saturer la moitié de gradient
- **Courbe de saturation et désaturation** : modèle de désaturation des tissus/compartiments
- **Sc** : coefficient saturation critique → permet de définir les paliers / compartiment
- **Compartiment directeur** : Celui qui est le plus limitatif pour faire les paliers

$$Sc = \frac{\text{Tension}}{P_{abs}}$$





Des questions ?



❑ REFERENCES :

▶ Pressions :

<https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/seconde/thermodynamique/pression.html>

<http://tpeflottabilitebateaux.e-monsite.com/pages/la-densite-des-eau.html>

▶ DALTON :

<https://fr.khanacademy.org/science/chemistry/gases-and-kinetic-molecular-theory/ideal-gas-laws/a/daltons-law-of-partial-pressure>

[La plongée, un plaisir à découvrir \(free.fr\)](#)

▶ HENRY :

<http://plongeedecouverte.free.fr/loidehenry/index.html>





MERCI DE VOTRE ATTENTION
Fin de la 1^{ère} partie

