

Cours de physique Niveau 4

CTD Bas Rhin

22 novembre 2006

# Plan du cours

## 1- Rappels du premier cours

1-1 Pression

1-2 Loi des Gaz parfaits (3 lois)

1-3 Archimède

## 2- Mélanges gazeux

2-1 Loi de Dalton

2-2 Applications

2-3 Exercices

## 3- La dissolution des gaz

3-1 Loi de Henry

3-2 Principes mathématiques

3-3 Saturation

3-4 Dessaturation

## 4- Optique et acoustique

### Principes de ce cours:

- Donner les éléments théoriques
- Une copie informatique peut-être communiquée ( [seb.burgun@wanadoo.fr](mailto:seb.burgun@wanadoo.fr) )
- Participatif (exemples, questions...)
  - Cours 3 fait par un moniteur du même club: liaison possible et assurée.

# 1-1 La pression

-C'est la valeur d'un rapport  $P=F/S$  où  $F$  est une force et  $S$  une surface

$$P=F/S$$

-Analogie talon aiguille semelle de basket

-Mais en plongée, la surface ne varie pas, seule la force appliquée varie:  
c'est le poids des éléments au dessus du plongeur/surface.

-c'est donc le poids de l'air/ ( donc la pression atmosphérique)  
ET le poids de l'eau/surface

On a la formule suivante:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{hydro}$$

$P_{hydro}$  est la pression hydrostatique et Equivaut à 1 bar tous les 10m

On utilisera le bar pour unité de pression dans ce cours.

$$1bar = 760mmhg$$

## 1.2 Loi des Gaz Parfaits

$P \times V = nRT$  ou  $R$  est une constante,  
 $n$  la quantité de molécules de gaz

Donc  $\frac{P \times V}{T} = Cte$

Une loi qui peut se scinder en trois formules

Nous admettrons donc que nous ferons varier uniquement deux des trois valeurs de la formule.

Une sera constante.

## 1.2.1 Mariotte - Température constante

En reprenant  $\frac{P \times V}{T} = \text{Cte}$  et T constant

En considérant une situation 1 et une situation 2

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

En plongée, intervient sur la dilatation des gaz en fonction de la pression

exemples: calculs de gonflages (avec rampe tampon)

calculs de relevages

calculs d'autonomie

mais aussi les barotraumatismes, certaines notions d'accident de décompression.

En tant que capacitaires, comment mettre ceci en évidence?

## 1.2.2 Loi de Charles Volume constant

En reprenant  $\frac{P \times V}{T} = Cte$  et  $V$  constant

En considérant une situation 1 et une situation 2

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

En plongée: Calculs de pression après remplissage et refroidissement  
Calculs d'autonomie (eau froide)

## 1.2.3 Loi de ~~Gay-Lussac~~ Pression Constante

En reprenant  $P \times V = Cte$  et  $P$  constant  
T

En considérant une situation 1 et une situation 2

$$\frac{V1}{T1} = \frac{V2}{T2} = Cte$$

Peu d'application directe en plongée

## 1.3 Archimède

« Tout corps plongé dans un fluide reçoit, de la part de celui-ci, une poussée verticale dirigée du bas vers le haut et égale au poids du volume de fluide déplacé par le corps »

C'est le bilan de forces:

Poussée-arch. = Volume  $\times$  Poids volumique (liquide) (ou donné densité)

Poids réel = Volume  $\times$  Poids volumique (objet)

Poids apparent = Poids réel - poussée arch.

Attention densité, masse volumique, poids et masse. En plongée on simplifie. On exprime

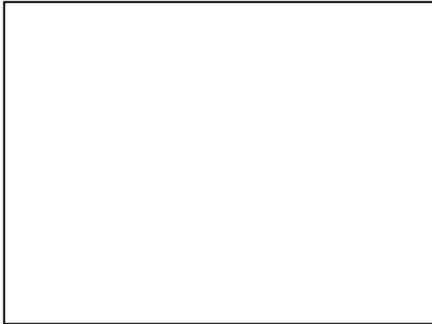
Souvent le poids en Kg (en réalité Newton)

Densité toujours un rapport donc pas d'unité.

Cette simplification arrangera tout le monde

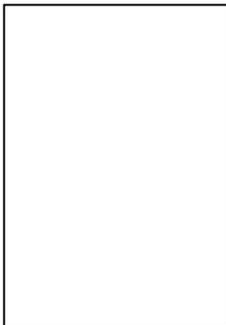
## 2.1 Loi de Dalton:

### Mise en évidence



$P=1\text{bar}$

Ce sont les molécules de gaz qui exercent une pression sur les parois de ma boîte



$P=2\text{bar}$



$P=2\text{bar}$

## Composition de l'air:

Azote (N <sub>2</sub> )	79,03%
Oxygène(O <sub>2</sub> )	20,93%
CO <sub>2</sub>	0,03%
Gaz rares	0,01%

Simplifions N<sub>2</sub> 80%  
O<sub>2</sub> 20%

Dans le cas 1, la pression atmosphérique est de 1 bar, e sont les molécules de N<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> qui poussent sur les parois.

80% de la pression, c'est N<sub>2</sub>

20% c'est l'O<sub>2</sub>

$$1\text{bar} = 0,8\text{bar} + 0,2\text{bar}$$

Même raisonnement si on double la pression.

« La pression totale d'un mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles de ses constituants. »

C'est la loi de Dalton ! Ce n'est pas compliqué !

Mais qu'est ce que la pression partielle?

« La pression partielle d'un gaz constituant d'un mélange est la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul le Volume du mélange. »

$$P_{\text{part}} = P_{\text{tot}} \times (\% \text{gaz}) = P_{\text{tot}} \times (x/100)$$

$$\text{Ou } P_{\text{tot}} = P_{p1} + P_{p2} + P_{p3} + \dots$$

Calculez les Pressions partielles de l'air à 1 bar

$$P_{pN_2} = P_{tot} \times \%N_2$$

$$P_{pN_2} = 1 \times 80 / 100 = 0,8$$

$$P_{pN_2} = 0,8 \text{ bar}$$

$$P_{pO_2} = P_{tot} \times \%O_2$$

$$P_{pO_2} = 1 \times 20 / 100 = 0,2$$

$$P_{pO_2} = 0,2 \text{ bar}$$

On peut calculer cela à 30 mètres...

Il suffit de calculer les Pressions partielles de l'air à 4 bar

$$P_{pN_2} = P_{tot} \times \%N_2$$

$$P_{pN_2} = 4 \times 80 / 100 = 3,2$$

$$P_{pN_2} = 3,2 \text{ bar}$$

$$P_{pO_2} = P_{tot} \times \%O_2$$

$$P_{pO_2} = 4 \times 20 / 100 = 0,8$$

$$P_{pO_2} = 0,8 \text{ bar}$$

On peut calculer cela à 70 mètres...

## 2.2 Applications concrètes

L'Azote et l'oxygène de l'air , à pression « normale » n'ont pas d'effets indésirables ou dangereux.

Mais en plongée, on va augmenter la pression et là, trois soucis:

- Ivresse des profondeurs (N<sub>2</sub>)
- Saturation en N<sub>2</sub>
- Crise hyperoxique (effet Paul Bert) (O<sub>2</sub>)

La loi de Dalton peut nous renseigner la dessus...

## 2.2 L'ivresse des profondeurs

On fixe le seuil de tolérance du N<sub>2</sub>, dans ce cas là à 5,6 bar.

A quelle profondeur ce seuil correspond-il à l'air?

Dalton  $P_p = P \times \%$

On cherche P (pression donc profondeur)

On connaît  $P_p$  et %

Donc  $P = P_p / \% = 5,6 / 0,8 = 7$  bar équivalent à 60 m

## 2.2 toxicité de l'O<sub>2</sub>; effet Paul Bert

L'arrêté de 2004 concernant les plongées aux mélanges fixe une limite d'O<sub>2</sub> à ne pas dépasser.

$P_{pO_2} \text{ maxi} = 1,6 \text{ bar}$

1 À quelle profondeur... pour de l'air?

2 Avec un gaz contenant 40% O<sub>2</sub> (Nitrox40-60)?

1 Dalton  $P_p = P \times \%$

Donc  $P = P_p / \% = 1,6 / 0,2 = 8 \text{ bar}$   
équivalent à 70 m

2 Dalton  $P_p = P \times \%$

Donc  $P = P_p / \% = 1,6 / 0,4 = 4 \text{ bar}$   
équivalent à 30 m

## 2.2 Le Nitrox

C'est un mélange gazeux ( $N_2$  et  $O_2$ ) dans le quel le pourcentage d'oxygène est supérieur à 21%.

Donc le pourcentage d'azote est inférieur à 79%

On donne toujours le taux d'oxygène

### **Avantages:**

-moins d'azote donc moins de saturation...

Equivalence air avantageuse

### **Inconvénient:**

-plus d'oxygène donc plus de risques liés à sa toxicité

Profondeur maximale d'utilisation (PMU)

## 2.2 Nitrox

La profondeur équivalente air...

Soit un nitrox 50%, à 20 m. Comparons avec de l'air

Air

Pression partielle de N<sub>2</sub> à 20m

Dalton

$$P_p = P \times \% \quad P = 3 \text{ bar}$$

$$P_p = 2,4 \text{ bar}$$

Nitrox 50/50

Pression partielle de N<sub>2</sub> à 20m

Dalton

$$P_p = P \times \%$$

$$P_p = 1,5 \text{ bar}$$

À quelle profondeur, à l'air avons nous une  $P_{pN_2} = 1,5 \text{ bar}$  ?

On réutilise Dalton:

$$P_p = P \times \%$$

$$P_p = 1,5 \text{ bar}$$

$$\% = 80\% \text{ (air)}$$

$$P = P_p / \% = 1,9 \text{ bar}$$

Soit 9 mètres Donc pas de saturation et pas de décompression

En combinant cette formule et la formule précédente

**On peut donc déduire une formule globale**

$$P_{\text{éa}} = P_{\text{abs}} \times (\%_{\text{N}_2} / \%_{\text{air}})$$

**En parlant de pression et non de profondeur**

## 2.2 Trimix

L'azote étant gênant (ivresse),  
on peut le remplacer par un autre gaz.  
Par exemple de l'Hélium.

On peut donc calculer une équivalence narcotique qui est  
Identique à la démarche d'équivalence air.

Il s'agit dans les deux cas de comparer des Pression partielles,  
De trouver une profondeur en utilisant Dalton.

Ce n'est donc pas compliqué!

## 2.3 exercice:

Un plongeur décide de plonger avec un Nitrox 30/70

1- Calculez sa PMU.

2- En utilisant les tables MN90, il décide d'effectuer une plongée de 25 minutes à 40m. Quelle profondeur d'entrée dans les tables utilisez-vous?

1- 43m

2- 34m soit 35m

### 3.1 Là, ça pourrait se compliquer mais...

#### Loi de Henry

« A température donnée, la quantité de gaz dissout à saturation dans un liquide est proportionnelle à la pression du gaz au dessus de ce liquide. »

Que veut dire à saturation ?

Quels facteurs font varier cette loi?

Et dans le temps?

# La saturation

La quantité de gaz dissous dans un liquide est appelée tension (T)

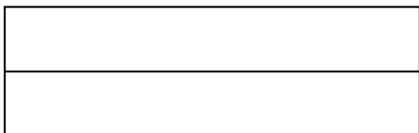
## 1-Equilibre, Saturation



## 2-Sous saturation



## 3-Sur saturation

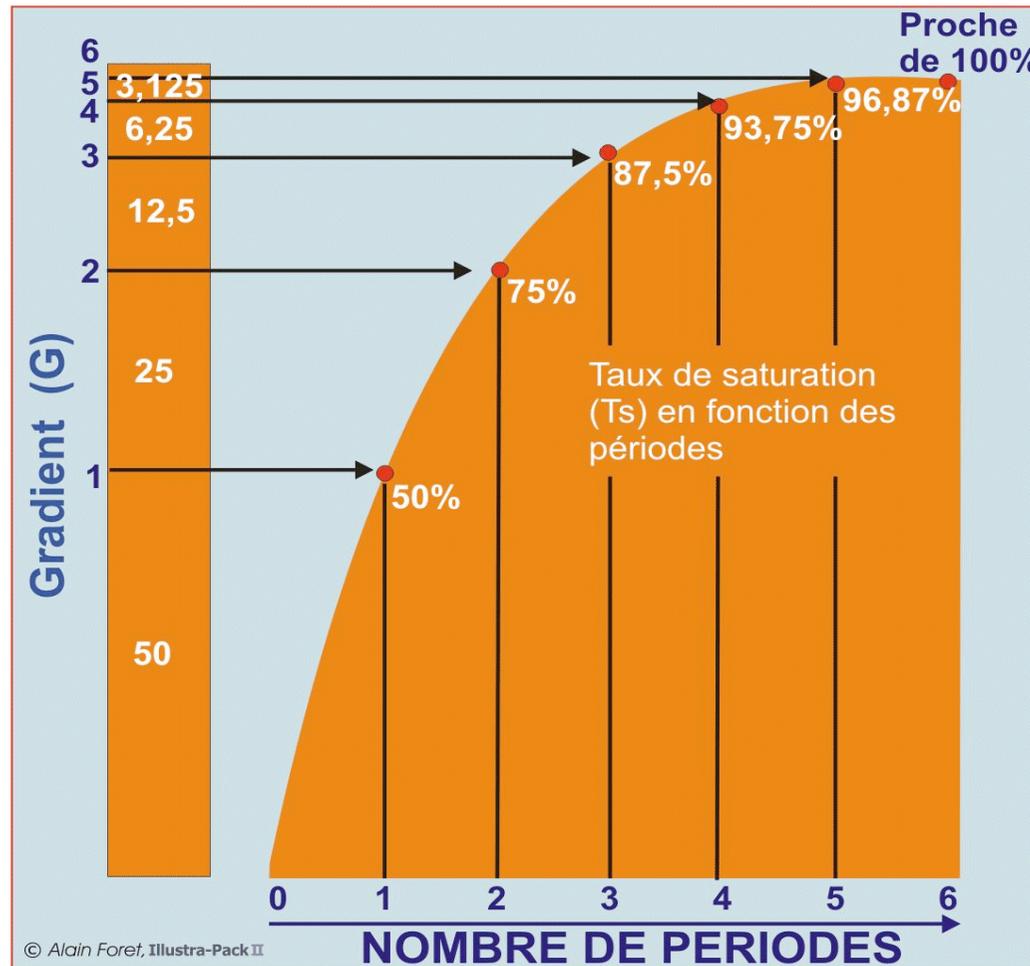


## Facteurs en plongée

- Pression (Profondeur)
- Le temps ( pour arriver à saturation, le temps de plongée)
- La température (37°)
- Surface de contact (alvéoles)
- L'agitation (vitesse de saturation)
- Nature du gaz (N<sub>2</sub>)
- Nature du liquide (sang, graisse...)

Donc la quantité de gaz dissout est en fonction du temps et du liquide. Ce sont les fameux éléments de calculs de Tables

Mais revenons à la physique, regardons la courbe de saturation  
D'un liquide au fond en fonction du temps



## Le Gradient $G$

C'est l'écart entre :

la tension initiale ( $N_2$ )  
(Quantité dissoute au départ)

Et

La tension finale ( $N_2$ )  
(Quantité dissoute après un temps infini, à saturation)

## La période

C'est une durée (en minutes) équivalente au temps nécessaire pour dissoudre une quantité de N<sub>2</sub> égale à la moitié du gradient (à la situation initiale).

On constate que la deuxième période a la même durée que la Première période. La tension de N<sub>2</sub> est de 75% à la fin de la Deuxième période.

À chaque période, on dissout la moitié de ce qu'il reste à dissoudre. D'où  $75\% = 50\% + 25\%$

## Les périodes

1 période =  $1/2$  du gradient soit 50% = %<sub>1</sub>  
2 périodes =  $3/4$  du gradient soit 75% = %<sub>2</sub>  
3 périodes =  $7/8$  du gradient soit 87,5%  
4 périodes =  $15/16$  du gradient soit 93,75%  
5 périodes =  $31/32$  du gradient soit 96,875%  
6 périodes =  $63/64$  du gradient soit 98,4375%  
À la septième période, on estime que l'équilibre est atteint

On peut utiliser une formule pour connaître une tension,  
à la fin d'une période =

$$T_n = T_0 + (T_f - T_0) \times \%n$$

## Compartiments et tissus

En appliquant les formules précédentes,  
il apparaît tout de suite qu'une formule ne suffit pas,  
en effet, le corps est composé de différents tissus.  
**Ces tissus anatomiques n'ont pas les mêmes temps de saturation.**

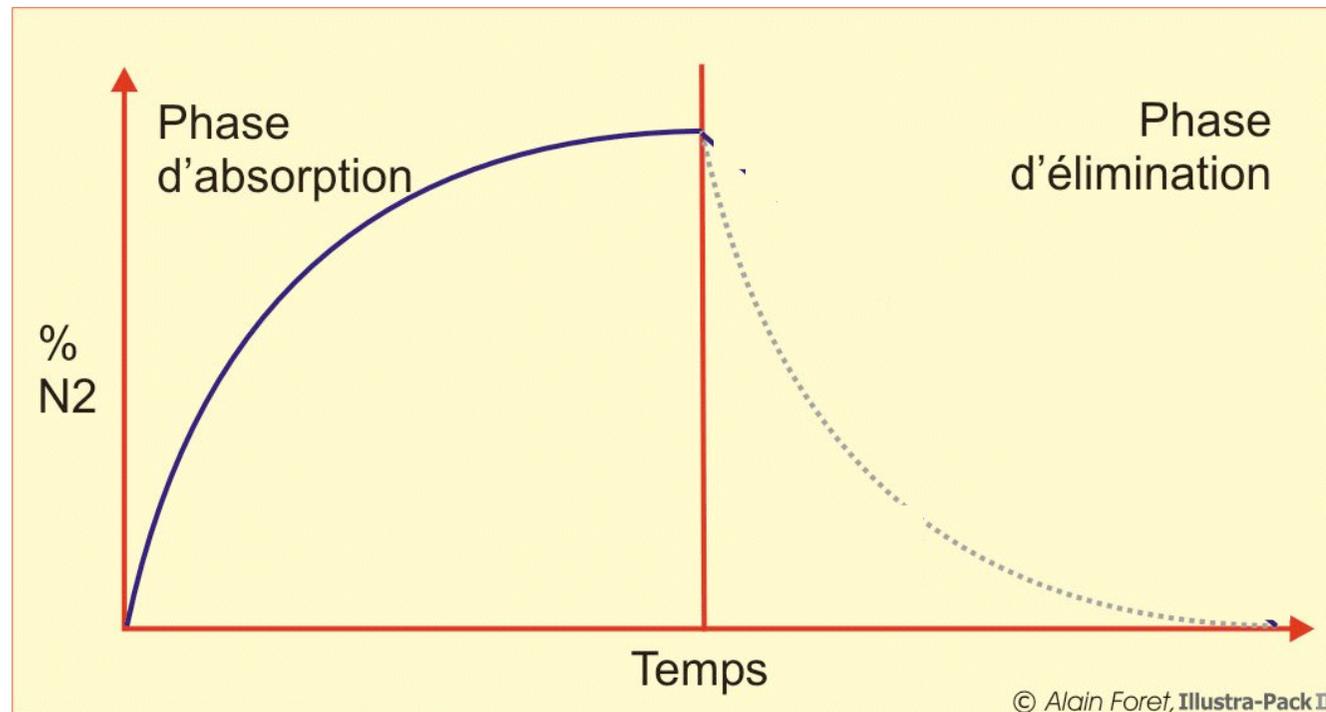
En les regroupant, on obtient des tranches que l'on peut  
**Nommer compartiments.**

Les tables MN 90 ont été calculées avec 12 compartiments.

On peut appliquer ces théories au fond (courbe de saturation ou d'absorption)

Mais aussi à la remontée (Courbe de désaturation ou d'élimination)

C'est la même formule



## Le coefficient de sursaturation

Si on compare la pression du gaz et la tension dans le liquide,  
On a la formule suivante:

$$S = T_{N_2} / P_{abs}$$

A saturation, à l'équilibre 0.8 (en considérant le raccourci  $T = P_p$ )

En sursaturation, en remontant, la pression absolue baisse  
Ce coefficient sera donc supérieur à 0,8

## La sursaturation critique

C'est la valeur du coefficient de saturation qui correspond à l'apparition de bulles d'azote dans l'organisme.

Chaque compartiment a son Coefficient de saturation critique

On peut donc connaître la pression à ne pas dépasser pour que le coefficient reste inférieur à sa valeur critique.

$$P_{abs} = TN_2 / S_c$$

Ce qui implique une seule formule à maîtriser:

$$T_n = T_0 + (T_f - T_0) \times \%n$$

Compartiment	5'	7'	10'	15'	20'	30
Sc	2,72	2,54	2,38	2,20	2,04	1,82

Compartiment	40'	50'	60'	80'	100'	120'
Sc	1,68	1,61	1,58	1,56	1,55	1,54

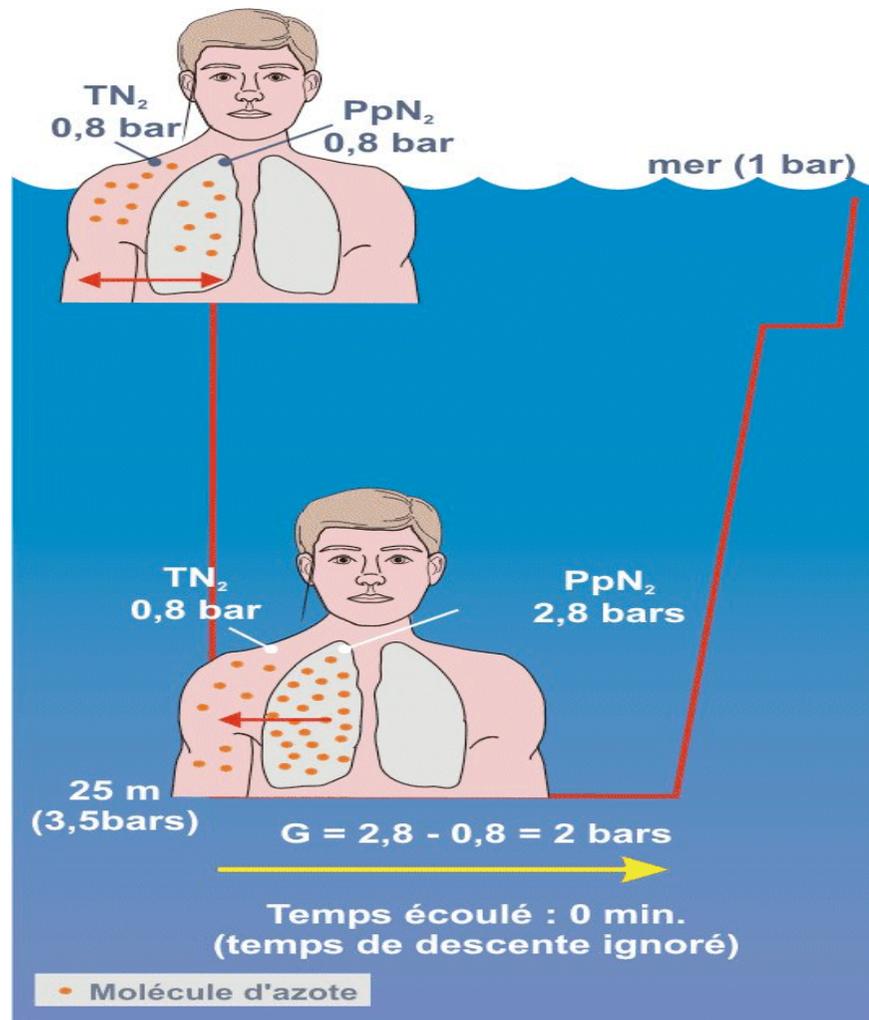
# Méthodologie-exemple

Un plongeur s'immerge à 25 m. En considérant le compartiment de période 10'

Calculez la tension d'azote de ce compartiment au bout de 30'.

Calculez la profondeur d'un éventuel palier.

# Détermination du gradient:



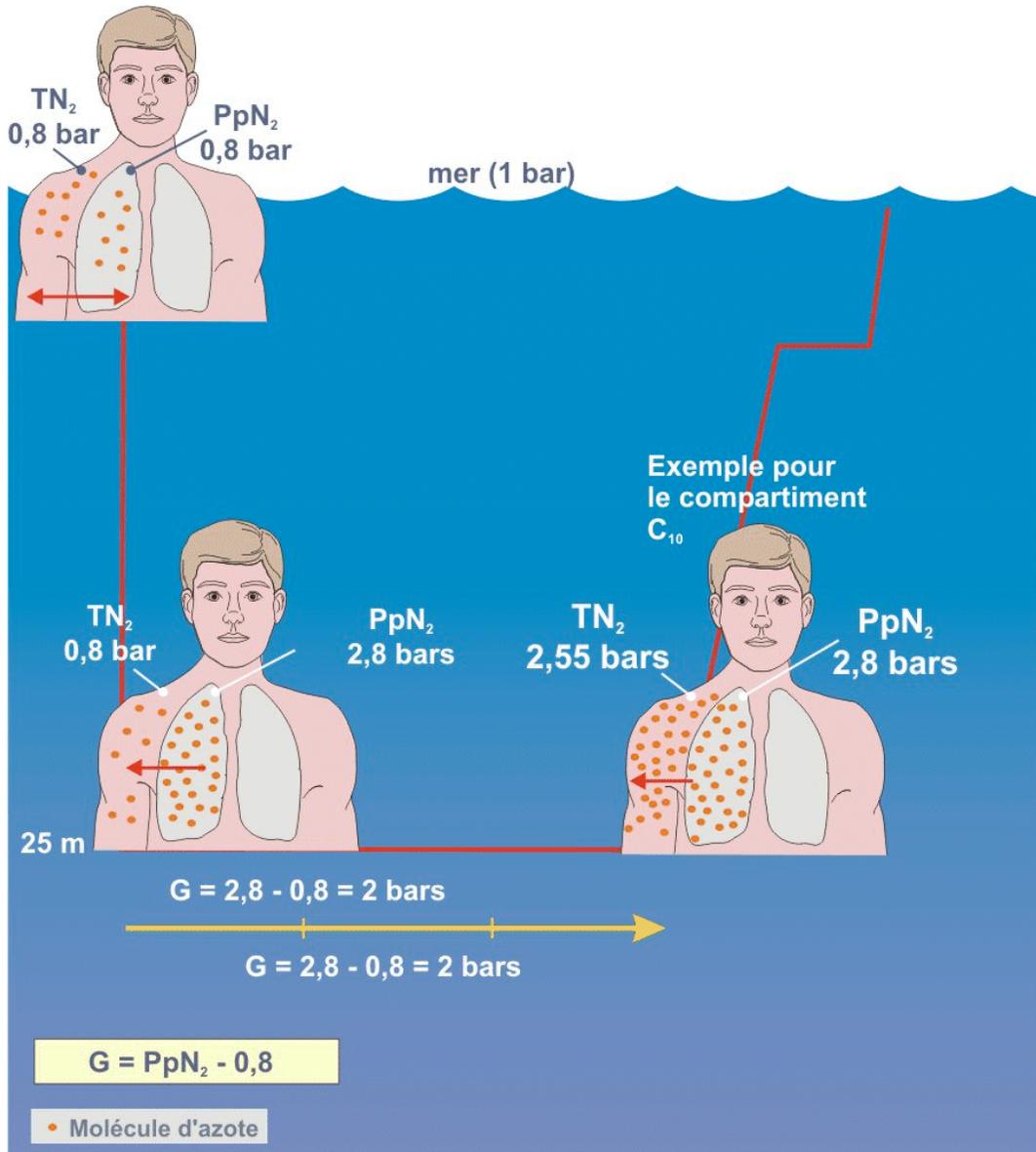
© Alain Foret, Illustra-Pack II

$$G = T_f - T_i$$

$$T_f = PpN_2$$

$$G = 2,8 - 0,8 = 2,0 \text{ bar}$$

# Détermination de la tension à 30'

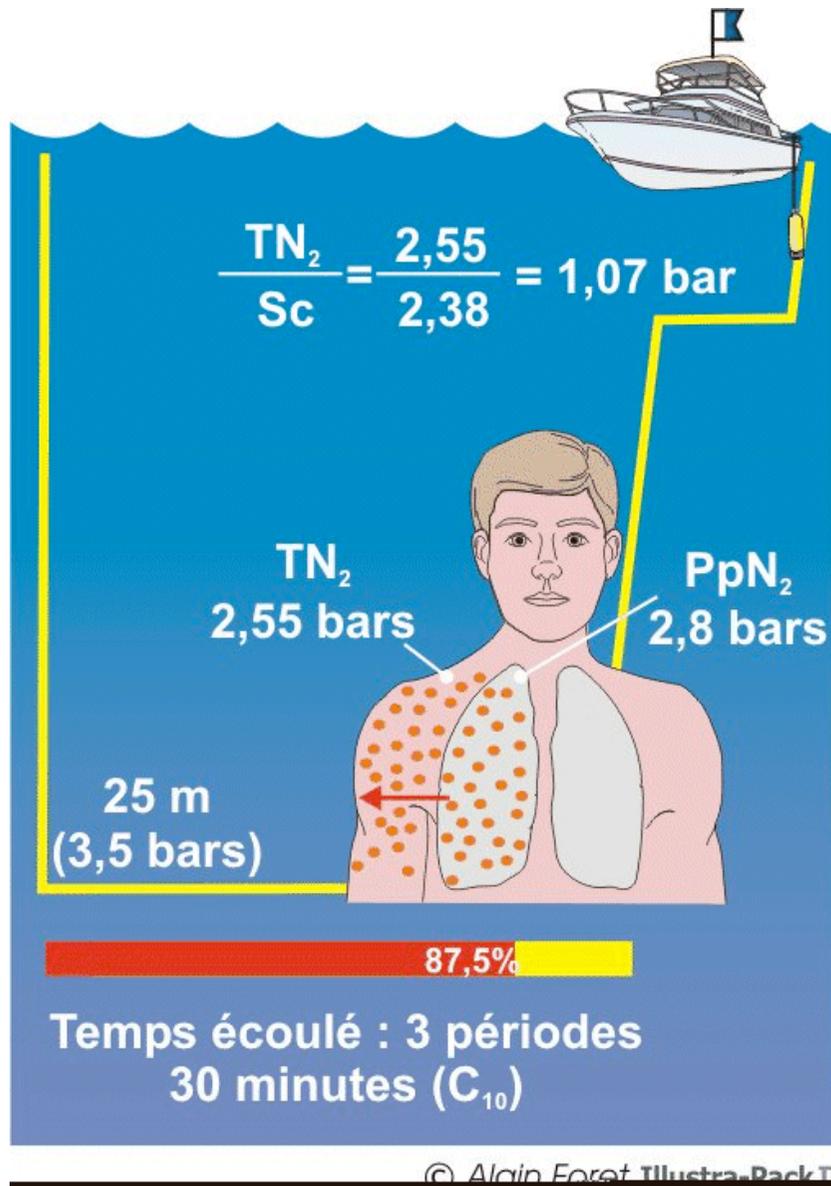


$$T = T_0 + G \times \%$$

$$T_0 = 0,8 \text{ bar}$$

$$30' = 3 \text{ périodes}$$

$$\% = 87,5\%$$



$$T_{N_2} = 0,8 + 2 \times 0,875$$

$$T_{N_2} = 2,55 \text{ bar}$$

$$S = T_{N_2} / P_{abs}$$

$$S_c = 2,38$$

$$P_{abs} = T_{N_2} / S_c$$

$$P_{abs} = 1,07 \text{ bar}$$

Cette pression absolue est équivalente à 0,7 m

Il faudra attendre à cette profondeur que la tension d'azote baisse donc ceci équivaut à un palier à 3 m.

## Notion de compartiment directeur

Si on observe une déssaturation à l'aide de plusieurs compartiments, le compartiment directeur sera celui qui va ordonner le palier le plus bas  
( en utilisant la formule  $P_{abs} = T_{N_2} / S_c$ )

Voir cours du 29/11

Il convient donc d'être rigoureux dans la résolution et de toujours appliquer les formules sans mélanger les termes.

## 4-Optique

Quand un rayon lumineux change de milieu, le trajet de ce rayon changera : le rayon sera dévié.

Il existe une formule trigonométrique:

$\sin i / \sin r = 4/3$  dans le cas du passage de l'eau à l'air

Concrètement:

Distance apparente =  $3/4$  distance réelle

Ou Taille apparente =  $4/3$  taille réelle

## 4 Optique suite

L'eau va absorber la lumière mais les couleurs ne seront pas absorbées de la même manière. L'eau va agir comme un filtre.

Les rouges (5m) et jaunes (10-25m) seront absorbés en premier.

À 40 m , une lampe permet de retrouver les couleurs absorbées

L'intensité lumineuse baissera également.

## 4 Optique

Le masque restreint également les champs de vision:

On voit moins large et celui qui regarde voit moins large

Le guide de palanquée devra tenir compte de ceci dans son exercice au fond, ou lors de l'examen N4...

## 4 Acoustique

La vitesse du son dans l'eau est beaucoup plus grande que dans l'air (5 fois)

Air: 330 m/s

Eau :1500 m/s

Localisation des son difficile: Différence oreille droite oreille gauche difficile.

Par contre perception accrue: on entend plus loin ou on pense que le son est proche.

Merci de votre attention