

DISSOLUTION DES GAZ

(loi de Henry)

Sommaire

1	RAPPELS.....	2
2	MISE EN EVIDENCE.....	2
2.1	Analogie :.....	2
3	LOI.....	2
4	Notion de SATURATION.....	3
4.1	LES DIFFÉRENTS ÉTATS DE SATURATION.....	3
4.1.1	La saturation :.....	4
4.1.2	La sous saturation :.....	4
4.1.3	La Sursaturation :.....	4
4.1.4	La Sursaturation critique:.....	5
5	FACTEURS INFLUANT SUR LA DISSOLUTION.....	5
5.1	Autre loi sur la dissolution :.....	5
5.2	La pression dépend de la nature du gaz et du liquide :.....	6
5.3	La température :.....	6
5.4	La surface d'échange :.....	6
5.5	La diffusion :.....	6
5.6	Le temps :.....	6
6	LES TISSUS ET LEUR PÉRIODE.....	7
6.1	Les tissus ou compartiment:.....	7
6.2	Le gradient.....	8
6.3	La période d'un tissu :.....	8
6.4	Notion de tension final :.....	9
6.5	Notion de tissu directeur :.....	10
7	APPLICATIONS A LA PLONGÉE.....	11

1 RAPPELS

$$P. ABS = P. ATM + P. RELAT$$

$$PP = P. ABS \times X/100$$

Composition de l'air:

O₂: 20,93% N₂: 79,03% CO₂: 0,03% gaz rares: 0,01%

2 MISE EN EVIDENCE


Les variations de pressions étant très fortes en plongée, la loi de Henry est donc essentielle car elle permet de comprendre **la procédure de décompression** du plongeur ainsi que de déterminer les causes des **accidents de décompressions** et autres **accidents biophysiques**.

2.1 Analogie :

Quand vous ouvrez une bouteille de boisson gazeuse, il y a un dégagement de bulles qui prouvent la présence de gaz dans la boisson. Le gaz s'échappe plus ou moins rapidement en fonction de la vitesse d'ouverture de la bouteille.

3 LOI

Williams Henry, Physicien et chimiste anglais (1774-1836)



William Henry (1765-1836)
Chimiste et Physicien britannique

Né à Manchester, il fait des études de médecine à Edimbourg. Il va en fait consacrer son temps à la recherche en publiant en 1799 ses éléments de chimie expérimentale et en 1803 ses expériences sur la dissolution des gaz dans les liquides.

Henry a démontré que la quantité de gaz dissous dans un liquide augmente avec la pression. Cela concerne particulièrement le plongeur qui voit la quantité d'azote dissoute dans leur sang augmenter avec la profondeur.

La loi de Henry joue un rôle primordial en plongée car elle permet de déterminer la dissolution de l'azote dans l'organisme en fonction des paramètres cités ci-dessous, et plus particulièrement en fonction de la variation de pression et du temps.

D'où l'énoncé de la LOI DE HENRY :

A température constante et à saturation, la quantité de gaz dissoute dans un liquide est proportionnelle à la pression de ce gaz au-dessus de ce liquide.

Plus le coefficient de solubilité est élevé et plus la quantité de gaz dissout sera importante à pression égale. Par exemple l'huile dissout plus les gaz que l'eau alors attention au personne avec du surpoids ou avec un fort volume de tissu adipeux.

Le gaz le plus important, et qui nous concernera dorénavant à ce sujet est l'azote. Sa notation chimique est N_2 elle contient 2 atomes de "nitrogène" qui est le mot en vieux français qui remplaçait "azote". Il est resté en anglais (nitrogène)

On emmagasine beaucoup d'azote au départ (c'est la tension d'azote T_{N_2}), puis de moins en moins au fur et à mesure du temps qui passe.

4 Notion de SATURATION.

Le corps humain étant composé à 70 % d'eau, il s'effectue des échanges entre les mélanges gazeux contenus dans les poumons et les tissus humains.

Lorsqu'un gaz est en contact avec un liquide (ex : l'atmosphère et l'océan) il se produit des échanges gazeux de l'un vers l'autre pour atteindre un état d'équilibre appelé : SATURATION.

A saturation, les échanges sont identiques ; c'est à dire que le liquide dissout autant de gaz qu'il en élimine.

A saturation la pression exercée par le gaz au-dessus d'un liquide est égale à la pression exercée par le gaz au sein du liquide.

4.1 LES DIFFÉRENTS ÉTATS DE SATURATION

Ainsi, à la pression atmosphérique, les liquides de notre organisme se trouvent dans un état de **saturation** vis à vis de l'azote composant l'air contenu dans nos poumons. L'azote est complètement dissout alors que l'oxygène est transporté dans le plasma et consommé par les organes.

On appelle :

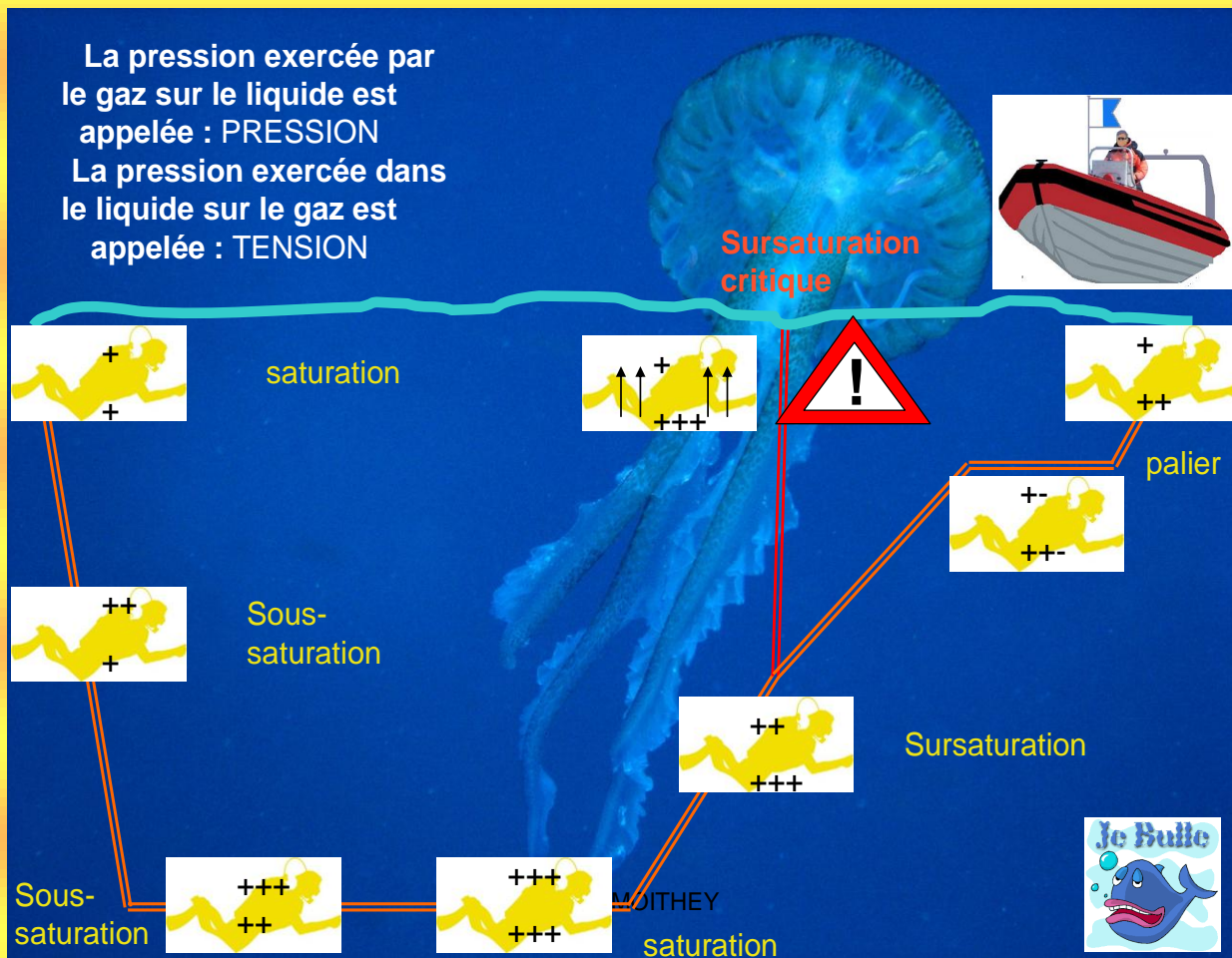
Saturation : l'état d'équilibre (initial ou final)

Sous-saturation: l'étape au cours de laquelle le liquide absorbe le gaz en le dissolvant.

Sur-saturation : l'étape au cours de laquelle le liquide restitue le gaz dissout préalablement pour tendre vers une nouvelle valeur de saturation.

La pression exercée par le gaz sur le liquide est appelée : PRESSION

La pression exercée dans le liquide sur le gaz est appelée : TENSION



4.1.1 La saturation :

État stable qui n'évolue pas où la pression du gaz au-dessus du liquide est égale à la tension du gaz dissous. **La pression du gaz est égale à la tension du gaz dans le liquide ; c'est l'état d'équilibre.**

Exemple : Le plongeur qui a séjourné longtemps à la même profondeur.

4.1.2 La sous saturation :

État instable qui évolue vers la saturation où la pression au-dessus du liquide est supérieure à la tension du gaz dissous. Le liquide va recommencer à dissoudre du gaz pour tendre vers un nouvel état de saturation. **La pression du gaz est supérieure à la tension du gaz dans le liquide ou tissu, celui-ci dissout une partie de ce gaz de façon à rétablir l'équilibre.**

Exemple : Le plongeur qui descend.

4.1.3 La Sursaturation :

État instable qui évolue vers la saturation où la pression du gaz dissous est supérieure à la tension du gaz libre. Le liquide va éliminer du gaz pour tendre vers un nouvel état de saturation. **C'est l'inverse de la sous saturation, la pression du gaz dans le liquide est inférieure à la tension du liquide et celui-ci élimine l'excédent de gaz dissous pour obtenir la saturation.**

Exemple : le plongeur qui remonte.

4.1.4 La Sursaturation critique:

La différence entre la pression du gaz et la quantité de gaz dissous dans le liquide est trop importante. Non seulement le gaz dissous s'échappe du liquide, mais en plus, il se dégage sous forme de bulles au sein de ce liquide et ce sont ces bulles qui, entraînées dans la circulation sanguine vont provoquer les accidents de décompression. Attention, même en décompression normale le respect des paliers est impératif. **Lorsqu'un tissu désature, il se forme de petites bulles dont le diamètre est proportionnel à la différence de pression entre P et T.**

Ces bulles, lors d'une désaturation normale en plongée sont microscopiques et normalement évacuées par la respiration. D'où l'intérêt de ne pas bloquer sa ventilation au palier. Au contraire, si la chute de pression est trop rapide il se produit une désaturation anarchique, matérialisée par des bulles de gros diamètre.

En résumé :

Saturation	Pression = Tension
Sous-saturation	Pression > Tension
Sur-saturation	Pression < Tension

5 FACTEURS INFLUANT SUR LA DISSOLUTION

5.1 Autre loi sur la dissolution :

La quantité de gaz dissout à saturation dans un liquide dépend de la nature du gaz et du liquide, lié de manière proportionnelle à la surface de contact, lié de manière exponentielle au temps de contact, et lié de manière inverse à la notion de température.

Plusieurs facteurs influent sur la dissolution des gaz dans les liquides.

La dissolution = Absorption d'un gaz ou d'un solide par un liquide

La dissolution augmente quand:

Facteurs	Action	Lien avec la plongée
La Pression	→	Quand la profondeur augmente
La Température		Constante ; celle du corps pas de l'eau
La Durée d'exposition	→	Durée de la plongée.
La Surface de contact	→	Les alvéoles pulmonaires représentent 100m ² (facteur stable!)
La Nature du gaz (solubilité)	→	Dans notre cas l'azote
L'Agitation	→	L'irrigation sanguine augmente (efforts)
La Nature du liquide		Cela dépend du tissu concerné (sang, muscles, lymphes, graisses, os...)

5.2 La pression dépend de la nature du gaz et du liquide :

Selon les liquides et leur coefficient de solubilité, les gaz se dissolvent plus ou moins bien.

La quantité de gaz dissout dépend pour un même gaz, de la nature du liquide et pour un même liquide, de la nature du gaz.

5.3 La température :

Il y a peu d'influence de la température du corps sur la dissolution des gaz en plongée car celle-ci se situe au niveau des échanges gazeux et donc varie peu. Ce n'est pas le cas de la température de l'eau.

Vasoconstriction périphérique d'où un épaissement de la fluidité du sang; en sacrifiant la thermorégulation des extrémités, l'organisme concentre ses capacités de réchauffement sur le noyau central et limite les échanges vers l'extérieur.

Il existe un autre moyen susceptible d'augmenter la chaleur produite par l'organisme, il s'agit de l'effort physique. Cependant ce dernier est vivement déconseillé en plongée pour les raisons que l'on sait.

5.4 La surface d'échange :

La surface d'échange se situe au niveau des alvéoles pulmonaires.

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.

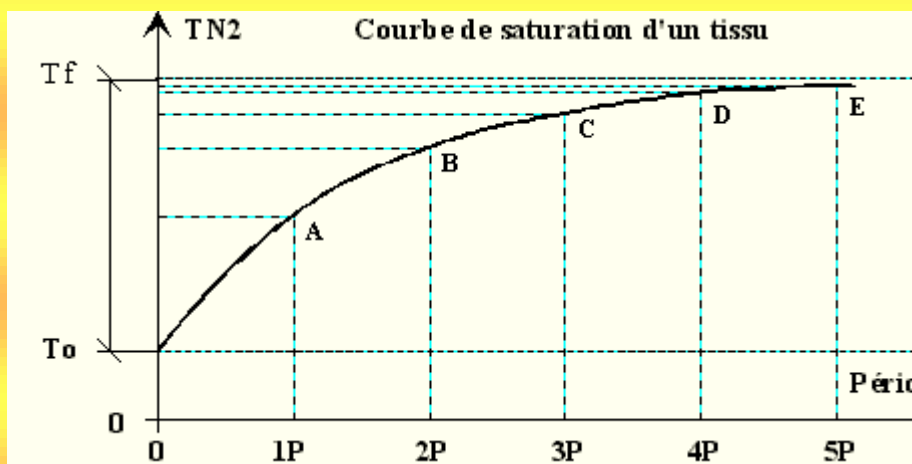
L'agitation : le renouvellement du liquide au contact du gaz accélère la vitesse de dissolution. Un effort important durant la plongée modifie les paramètres de dissolution. C'est pourquoi il y a des tables professionnelles et des tables sportives.

5.5 La diffusion :

Capacité d'un gaz à pénétrer à l'intérieur d'un milieu où sa concentration y est plus faible.

5.6 Le temps :

Plus longue sera la durée, plus importante sera la quantité de gaz à se dissoudre, donc sa tension



==> courbe exponentielle

6 LES TISSUS ET LEUR PÉRIODE

Principe de la dissolution tissulaire.

6.1 Les tissus ou compartiment:

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 corps humain est constitué d'une multitudes de TISSUS (osseux, sanguins, nerveux etc.). Tout comme les liquides, chacun de ces tissus met un temps différent pour dissoudre (ou éliminer) l'air que nous respirons. Ce temps est variable selon plusieurs paramètres.

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.

Pour un environnement donné, il est possible de mesurer la quantité de gaz dissous (ou éliminer) pour chaque tissu. Cette quantité de gaz dissout (ou éliminé) est mesurée grâce à la PERIODE exprimée en bar.

Pour le calcul des tables de plongée on utilise un certain nombre de "tissus" dont les périodes forment une sorte de "courbe enveloppe" autour de la réalité physiologique.

Les tissus qui se saturent vite (sang, graisse...) sont appelés "tissus courts". Leur période peut être que de quelques minutes. Les "tissus longs" (os, tendons...) ont des périodes pouvant atteindre plusieurs heures.

La période dépend uniquement du couple liquide-gaz. Dans la plongée à l'air, le gaz étudié est toujours l'azote. Par contre, les liquides sont différents. Car bien que 70% du corps humain soit composé d'eau, toutes les parties du corps ne se comportent pas de la même manière vis à vis de la dissolution de l'azote. Notre corps a été modélisé en compartiments (appelés auparavant tissus comme on peut encore le lire sur la documentation de certains ordinateurs de plongée). Chaque compartiment est caractérisé par une période qui détermine la vitesse de saturation ou de désaturation de cette partie du corps.



Les tables MN 90, utilisées par la F.F.E.S.S.M. prennent en compte 12 compartiments dont voici les périodes

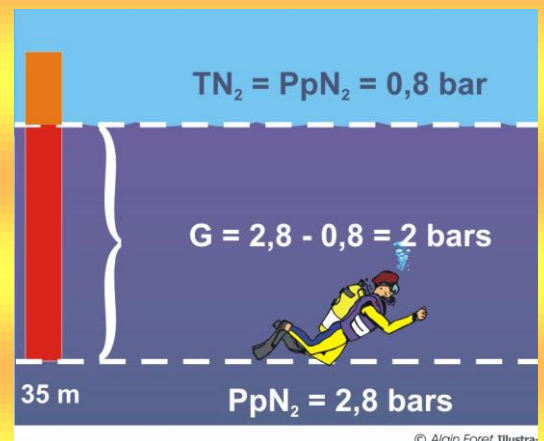
6.2 Le gradient

On parlera de tension d'un gaz lorsqu'on sera en phase dissoute dans un liquide, et de pression partielle d'un gaz dans un mélange lorsqu'on sera en phase gazeuse. Nous avons vu, que le liquide possède un état de saturation lorsqu'il est soumis à la pression d'un gaz. Mais cet état n'apparaît pas instantanément. Il faut un certain temps d'exposition pour atteindre l'état de saturation. Ce temps dépend de nombreux facteurs dont le principal est la différence entre la pression du gaz exercé à la surface du liquide et la tension du gaz dissous dans le liquide. On appelle cette différence **le gradient de pression**.

Plus ce gradient est élevé, plus la vitesse de dissolution du gaz dans le liquide est grande. Puisque la tension du gaz dissous se rapproche de la pression extérieure, le gradient diminue et la vitesse de dissolution baisse. Donc plus on se rapproche de la saturation, plus il faut de temps pour l'atteindre. La vitesse de dissolution n'est donc pas constante. Elle baisse avec le temps plus on se rapproche de l'équilibre. Il en est de même pour la désaturation.

D'où le Gradient est égal à la Tension finale moins la tension initiale.

$$G = PpN_2 \text{ fond} - PpN_2 \text{ surface}$$



6.3 La période d'un tissu :

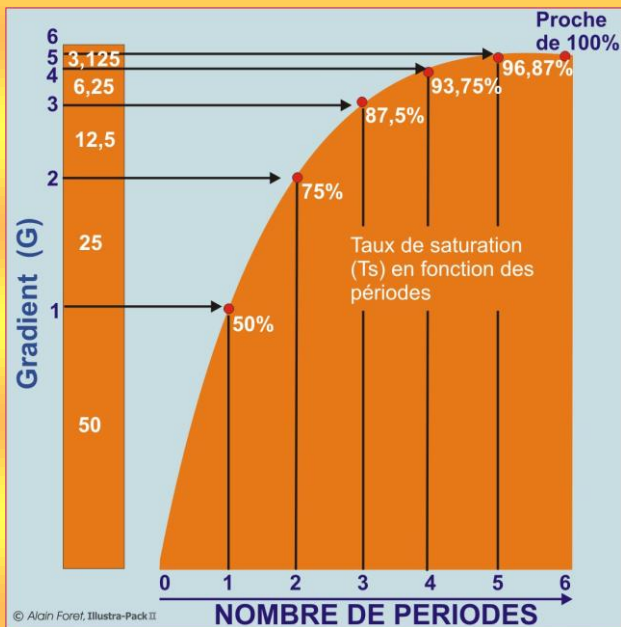
"La période est le temps nécessaire à un liquide pour dissoudre (ou éliminer) la moitié de la quantité de gaz qu'il pourrait dissoudre à saturation pour une pression donnée"

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.

Plus simplement, la période est le temps nécessaire pour atteindre la 1/2 saturation.

La période est une constante de temps qui est définie pour un couple liquide-gaz. Cette constante a pour valeur la durée nécessaire à la dissolution ou à l'élimination de la moitié de la différence entre la pression ambiante et la tension, soit la moitié du gradient.

La période est égale au gradient divisé par 2 :



à la première période, le tissu dissout 50% de ce qu'il peut assimiler
à la deuxième période, le tissu dissout 50% des 50% restant soit 75% au total.
à la troisième période, le tissu dissout 50% des 50% restant soit 87,5% au total
à la quatrième période, le tissu dissout 50% des 50% restant soit 93,75% au total.
et ainsi de suite jusqu'à complète dissolution de ce qu'il peut absorber.

La formule :

Pour la première période : $Ts = 100 / 2$

Pour les suivantes : $Ts = \% + (100 - \%) / 2$

6.4 Notion de tension final :

Pour calculer la tension final d'un tissus il faut utiliser la formule suivante :

Formule utilisée

$$TN2 = Ti + ((Tf - Ti) \times \text{période du tissu concerné})$$

Ou

$$TN2 \text{ finale} = T_{\text{initiale}} + (\text{Gradient} \times \text{taux de saturation})$$

Ou

$$TN2 \text{ finale} = Ti + (G \times Ts)$$

Ou

$$TN2 \text{ finale} = Ti + (Tf - Ti) \times (1 - 0.5(\Delta T / T))$$

6.5 Notion de tissu directeur :

Chaque tissu du fait de sa composition, possède un seuil au-delà duquel se produit le phénomène précité. Ce seuil, est appelé : **SURSATURATION CRITIQUE**.

SC = tension finale d'azote dans le tissu

Coefficient de saturation critique

Le coefficient de sursaturation critique d'un tissu se note **Csc**. C'est un simple nombre. C'est une valeur à ne pas dépasser.

Les premières tables de plongées utilisaient un coefficient $C_{sc} = 2$ pour tous les tissus ! Elles ont été calculées en considérant qu'un tissu pouvait supporter une TN_2 deux fois plus grande que la pression ambiante sans que n'apparaissent de bulles dans ce tissu. Cette approximation n'était pas assez sévère.

Avec l'expérience on s'est aperçu que tous les tissus n'ont pas le même seuil de tolérance. Voilà pourquoi on a été amené à déterminer pour chaque groupe de tissus l'écart maximum qu'il peut supporter entre la TN_2 et une pression ambiante plus faible. Pour établir ces tables, on associe à chaque tissu (caractérisé par sa période), un coefficient de sursaturation critique.

Le coefficient de sursaturation critique (C_{sc}) est la valeur maximale du rapport $TN_2 / PABS$ admissible pour un tissu sans dégazage anarchique (facteur d'accident)

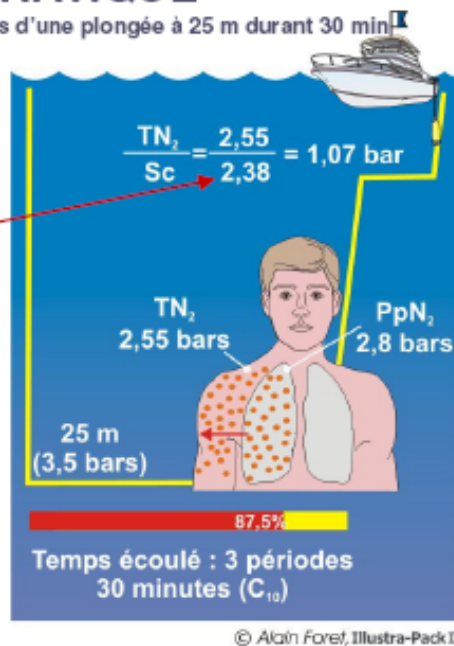
(mn)	Compartiment	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
Csc		2.72	2.54	2.38	2.20	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54

Lorsque l'on doit considérer plusieurs tissus, comme c'est le cas dans le corps humain, il apparaît alors une notion de **tissu directeur**; c'est le tissu qui imposera, de part sa valeur de tension d'azote et de son coefficient de sursaturation, un arrêt de décompression le premier.

MISE EN PRATIQUE

Comportement du compartiment C_{10} lors d'une plongée à 25 m durant 30 min

Cx	Périodes	Sc
C_5	5 min	2,72
C_7	7 min	2,54
C_{10}	10 min	2,38
C_{15}	15 min	2,20
C_{20}	20 min	2,04
C_{30}	30 min	1,82
C_{40}	40 min	1,68
C_{50}	50 min	1,61
C_{60}	60 min	1,58
C_{80}	80 min	1,56
C_{100}	100 min	1,55
C_{120}	120 min	1,54



$P. Abs = TN_2 / C_{sc}$
Si le resultat est supérieur à 1 le palier est obligatoire

MISE EN PRATIQUE

Comportement des compartiments
 C_{10} ($Sc=2,38$), C_{20} ($Sc=2,04$), C_{40} ($Sc=1,68$),
 lors d'une plongée à 25 m durant 40 min

	C_{10}	C_{20}	C_{40}
A. TN_2 initiale	0,8 bar	0,8 bar	0,8 bar
B. Pression (25 m)	3,5 bars	3,5 bars	3,5 bars
C. PpN_2 (80% d'azote)	$3,5 \times 0,8 = 2,8$ bars	2,8 bars	2,8 bars
D. Gradient [C - A]	$2,8 - 0,8 = 2$ bars	2 bars	2 bars
E. Temps au fond	40 min	40 min	40 min
F. Période	10	20	40
G. Nb périodes [E + F]	$40 \div 10 = 4$	$40 \div 20 = 2$	$40 \div 40 = 1$
H. Taux de saturation	93,75 %	75 %	50 %
I. N_2 dissout [D x H]	$2 \times 0,9375 = 1,875$ bars	$2 \times 0,75 = 1,5$ bars	$2 \times 0,5 = 1$ bar
J. TN_2 finale [A + I]	$0,8 + 1,875 = 2,675$ bars	$0,8 + 1,5 = 2,3$ bars	$0,8 + 1 = 1,8$ bars
K. Sc	2,38	2,04	1,68
L. $Pabs = TN_2 \div Sc$	$2,65 \div 2,38 = 1,123$ bars	$2,3 \div 2,04 = 1,127$ bars	$1,8 \div 1,68 = 1,07$ bars
M. Profondeur min	1,23 m	1,27 m	0,70 m
N. Palier	*	Compartiment directeur Palier à 3 m	*

7 APPLICATIONS A LA PLONGÉE

⇒ **Respecter scrupuleusement les tables de plongée ainsi que la vitesse de remontée**

Pour éviter les problèmes liés à la désaturation de l'azote, on doit faire des paliers. On détermine les paliers en fonction de la profondeur atteinte et du temps passé en plongée. Il y a plusieurs modes d'élaboration des tables indiquant les paliers à faire. Haldane fut un des pionniers en matière d'élaboration de tables plongée.