

Les lois de la physique des gaz et la plongée sous-marine

Tout d'abord quelques rappels simples et peu académiques

Un **volume** est ce qui est occupé dans l'espace par une matière (gaz, liquide, solide) ... Exprimé en litres faudra se souvenir qu'un volume **d'un mètre cube = 1.000 litres**

Poids ou masse ? La **masse** c'est une quantité de matière, de substance. Quel que soit son état, solide liquide ou gazeux la masse reste la même ...

Et alors, le poids ? Lorsque l'attraction de la terre s'exerce sur cette masse, attraction dite universelle ou g, **le poids** c'est la masse * g -- *le poids n'est pas le même sur la lune* --

Je suis tenté de vous parler aussi de la **densité**. C'est le rapport poids / volume. Ca ne vous dit rien ? Tiens quand on est en maillot de bain à plonger en piscine avec notre bloc, notre stab, et notre détendeur, on prend vite la pratique d'être équilibré. Pas de ceinture de plomb, alors qu'en mer avec une bonne combi néoprène pour éviter le froid sous l'eau, il nous faut du plomb. Pourquoi ce truc ? Mais le plomb a une très forte densité et il compense la flottabilité du néoprène, qui en dehors du fait qu'il est riche en air, a une très faible densité. Et plus la combi est épaisse et plus il faut de plombs !

Combi néoprène	Lest pour un individu moyen de 75 kg
Mono pièce 4 mm	4 à 5 kg de plomb
Mono pièce 6 mm	5 à 6 kg de plomb
Mono pièce 7 mm	6 à 7 kg de plomb
Combi 2 pièces 6 mm	6 à 8 kg de plomb
Combi 2 pièces 6 mm	7 à 9 kg de plomb

Ce tableau est simplement indicatif et non-absolu – considérez par ailleurs qu'entre une mono pièce et une bi pièce il faut sur-lester de 2 kg –

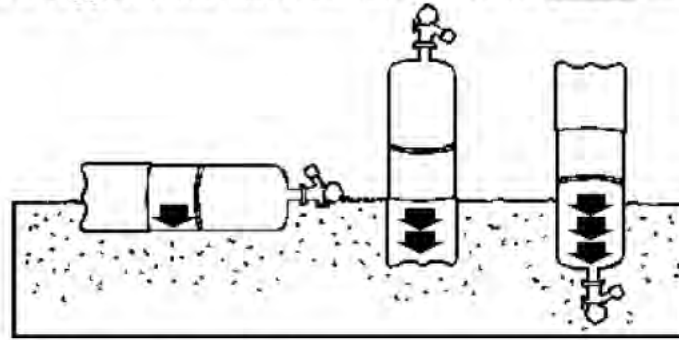
Autres remarques liées à la densité :

- Lorsque l'on atteint en général les **6 ou 7 m** on a l'impression tout d'un coup que la combinaison n'est plus « flottante ». En fait son écrasement à 1.7 bar a permis celui des petites bulles d'air qui sont incluses dans le néoprène et donc la densité de l'ensemble s'est modifiée. Plus la peine de lutter pour descendre. Mais à la remontée, attention quand on passe les 7 m !
- Lorsque l'on plonge 2 fois par jour pendant plusieurs jours, le néoprène reste humide et n'a pas le temps de se recharger en air – la densité du néoprène s'est modifiée à la diminution -. Au bout de 4 jours souvent on se sent sur-lester. Il faut alors retirer 2 kg pour une combinaison humide ...

La **température** : elle nous donne une sensation de chaud ou de froid suivant son degré ; mais ai-je besoin de vous la définir ?

Une **force** : c'est ce qu'il me faut pour soulever mon bloc de 18 litres...

Une **pression** : c'est le rapport d'une force sur une surface ou $P = F/S$ ---

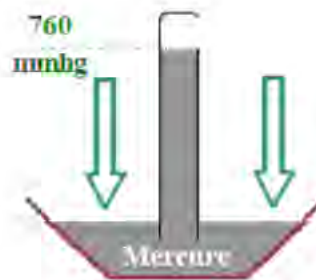


Suivant la position du bloc sur le sable, la pression exercée par celui-ci et matérialisée par les flèches n'est pas la même

Peu importe l'unité internationale que l'on utilise pour l'exprimer : chez nous on parle de pression atmosphérique --- c'est-à-dire de la pression des 10 km d'air qui sont au-dessus de nous et qui pèsent sur notre peau. --- Vous avez dit pression atmosphérique ... en surface de l'eau ---

Ainsi **1 atmosphère = 1 bar** ...

Dire que l'on plonge avec des blocs gonflés à 230 bars !



Y'a un mec nommé **Torricelli** qui a voulu mesurer la pression atmosphérique. Il a rempli une grande éprouvette d'1 mètre avec du mercure (métal à l'état liquide sous notre température ambiante) --- il l'a retournée pleine dans une assiette elle-même pleine de mercure et il s'est aperçu qu'un vide se formait dans le haut de l'éprouvette. Il a conclu que la colonne de mercure ainsi observée correspondait à la pression atmosphérique il a mesuré et a trouvé qu'un 1 bar = 760mm de Hg (mercure, bordel !) --- il a voulu recommencer en utilisant de l'eau à la place du mercure (c'est plus léger) et là stupeur : à la place des **760 mm pour le mercure, il lui a fallu 10m d'eau ... Ca nous parle tout d'un coup un peu mieux = chaque fois que l'on dépasse une dizaine de mètre sous l'eau on augmente la pression ambiante sur notre corps et notre matériel**, d'où le tableau suivant

Profondeur	Surface	10m	20m	30m	40m	50m	60m
Pression	1 atm	2 atm	3 atm	4 atm	5 atm	6 atm	7 atm

Ouai !ça ne nous en dit pas plus et après tout j'ai rappelé qu'une pression $P = \text{Force} / \text{Surface}$

Alors **une atmosphère ou 1 bar = 1kg/cm²**

Ça ne vous dit toujours rien ? Ça veut dire que sur 1 m² = 100*100 cm² = 10.000 cm² --- par 60 m de fond --- donc par une pression de 7 bar il s'applique une pression de 70.000 kg ou 70 tonnes au m² ... la tôle d'un sous-marin a intérêt à être résistante à cette profondeur !!! Et que dire d'un barrage hydro électrique de 60 m de hauteur ? Et bien c'est la même pression ...

Petite remarque faite aux plongeurs : à quel moment la pression double-t-elle en fonction de la profondeur ? Reprenons le tableau précédent : de 0 à 10 m – nous passons de 1 à 2 atm. – il faut ensuite doubler - passer de 2 à 4 atm – et l'on arrive aux 30 m . Certaines mauvaises langues disent que l'on risque autant entre 0 et 10 m qu'après 30 m ...

Les premières tables de plongées s'inspiraient de cette observation. Ce fut un anglais nommé HALDANE : il avait déterminé que le plongeur devait faire un palier à chaque fois que la pression qu'il subissait en remontant était divisée par deux ... enfin presque. Ses tables de décompression limitaient la profondeur de travail à 64 m. Les paliers étaient effectués à 24, 21, 18, 15, 12, 9, 6 et 3 mètres. Attention, notre ami Michel Nicolas a un ordinateur qui s'inspire des tables de Haldane, raison pour laquelle nous faisons ensemble des paliers d'une minute à 21 m et une minute 15 m avant de passer aux 6 et 3 mètres... Plus de 80% des ordinateurs utilisent ces tables mais c'est une autre histoire.

Pour les N2 vous vous souvenez de la courbe de sécurité, celle qui vous donne le rapport entre le temps passé au fond et la durée au delà de laquelle apparaît le premier palier à 3m

Profondeur maxi	9.25m	10 m	12m	15m	18m	20	25m	30m	40m	60m
Durée de la plongée sans palier	∞	5h30	2h15	1h15	55mn	45mn	25mn	15mn	10mn	<5mn

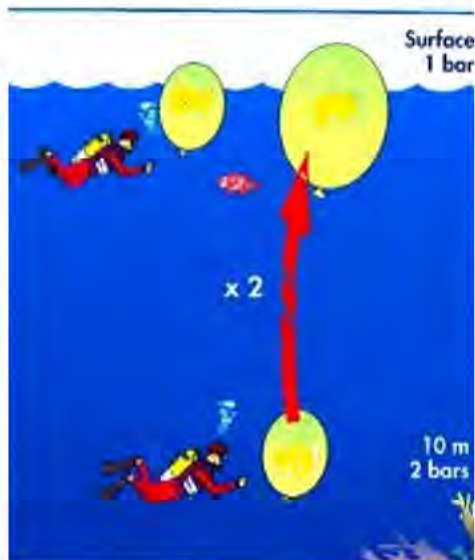
Attention il existe quelques variations infimes mais notoires suivant les ables de plongées, lesquelles se disent toutes conformes MN90...

ARCHIMEDE (principe ...)



Tiens voilà une sensation intéressante. Plonger dans l'eau et mal équipé, à vrai dire mal lesté et nous nous sentons remonter (la flèche blanche dans le crobar vous indique cette force qui vous remonte à la surface) . Il y a un vieux con d'Archimède , un grec de l'Antiquité, qui a sorti sa bulle ... **Tout corps plongé dans un liquide reçoit de celui-ci une force dirigée de bas en haut égale au poids du volume d'eau déplacé...** et toi tu rames vers le fond pour compenser ton manque de lest ...mais ça ne durera pas ! la prochaine fois si tu n'es pas assez lesté, ramasses un caillou en guise de lest ... et n'écoutes pas les grands qui plongent avec 4 kg = ils ont des trucs

Autre intérêt du principe d'Archimède. Je fais de l'archéologie en amateur, **ce qui est parfaitement interdit**. Je risque 6 mois de prison, 375.000 euros d'amande et la saisie de mon bateau et de mon matériel pour « recel d'épave ». Et justement j'ai trouvé une splendide petite amphore grecque qui pèse au moins 10 kg vue qu'elle est entière, et par 10 m de fond. Après l'avoir bien arrimée à mon « parachute », combien dois-je donner d'air au parachute pour voir mon amphore décoller vers la surface ? Réponse 10 kg d'eau de mer ça fait un peu moins de 10 litres de volume – Ouai c'est bien (en fait 1 litre d'eau de mer pèse 1.033 kg ...) --- mais arrivés en surface mes 10 litres d'air seront devenus 20 litres --- il y a intérêt à ce que le parachute ou le ballon n'explose pas ... j'ai donné en bas 10 l d'air à 2 bars de pression et je me retrouve avec 20 litres d'air à la pression de 1 bar en surface ... Y'a quelque chose qui cloche, j'y retourne immédiatement ...disait mon oncle bricoleur qui faisait en amateur une bombe atomique (loi ou voix de Boris Vian !)



Loi de BOYLE –MARIOTTE ... Et oui Archimède n'y connaissait rien en plongée sous-marine . C'est un autre grec nommé Aristote qui expérimenta la cloche de plongée ... Mais le coup des bulles qui grossissent et éclatent en surface, il ne connaissait pas lui non-plus !

Que dit la Loi de Boyle – Mariotte ?

A température constante :

$$\text{Pression} * \text{Volume} = \text{K ou constante}$$

$$P * V = \text{cte}$$

- Plus la Pression augmente et plus le Volume diminue en s'enfonçant sous l'eau
- Ou plus la Pression diminue et plus le Volume augmente en remontant vers la surface

- Pour les Préparations Niveaux 1 et 2

10 m d'eau = pression d'1 atmosphère + 1 atmosphère en surface = 2 atmosphères ---- 20 m d'eau = pression de 2 atmosphères + 1 atmosphère en surface = 3 atmosphères

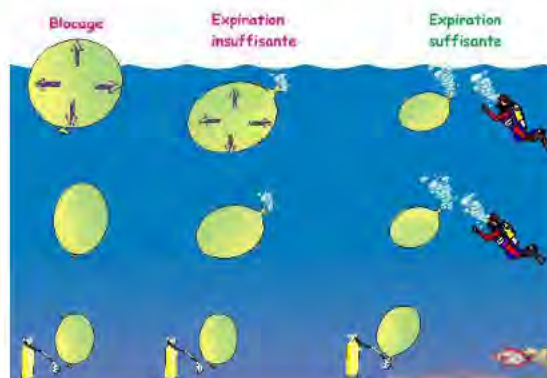
Nous respirons avec le scaphandre de l'air à pression ambiante

soit à 10 m : de l'air à P = 2 atm // soit à 20 m : de l'air à P = 3 atm

soit à 30 m : de l'air à P = 4 atm // soit à 40 m : de l'air à P = 5 atm

soit à 50 m : de l'air à P = 6 atm // soit à 60 m : de l'air à P = 7 atm

autre formulation : $P_1V_1 = P_2V_2$



pour un volume d'inspiration constant = environ 2 l par inspiration ; $PV = K$ donc :

à 10 m : $PV = 2\text{atm} * 2\text{l} = 4$ litres en surface

et à 20 m : $PV = 3\text{ atm} * 2\text{l} = 6$ litres en surface

Si l'on bloque sa respiration en remontant

De 10 m : $PV = 4$ pour $P = 1\text{ atm}$ alors V qui était de 2 l devient 4 et est donc multiplié par 2

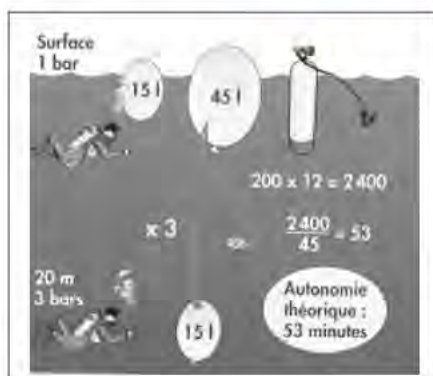
De 20 m : $PV = 6$ pour $P = 1\text{ atm}$ alors V qui était de 2 l devient 6 et est donc multiplié par 3

D'où une surpression pulmonaire ---- et donc un traumatisme grave et mortel dans les minutes qui suivent par éclatement du poumon. On remonte donc en EXPIRATION CONTROLÉE

Remédiassions :

- A la descente faire son « Valsalva » pour équilibrer la pression interne du tympan par rapport à la pression externe en descente. Attention, jamais de « Valsalva » à la remontée sinon on risque de faire exploser le tympan...
- ne pas donner d'air à un apnéiste qui remontera obligatoirement en bloquant sa respiration
- ne pas remonter rapidement pour un scaphandre,
- ne pas remonter en respiration bloquée
- apprendre le plutôt possible la remontée en expiration contrôlée (**REC**)
- apprendre à remonter **très très lentement** -- si remontée à **2 sur un embout** – et en **REC**
- rappel : en milieu naturel la REC suit une remontée de **15m par minutes**
- Limiter l'importance de la remontée en poumon ballaste
- Et donc apprentissage de l'utilisation du **gilet**

Exemple de dilatation des bulles à la remontée : nous sommes sur le Rubis, un sous-marin coulé par 41 m de fond. Et nous sommes près des 2 mats à l'arrière du kiosque. Regardez les bulles du plongeur qui est sous ma position



Conséquences --- (pour les PN2) : **l'autonomie diminue avec la profondeur !** – ceci peut permettre de faire par les PN2 un peu de calcul mental ... du type ... avec 1 bloc de 12, 13 ou 15 l gonflé à 200 bars pour une respiration à 15 ou 20 l à la minute en surface ... durée approximative de la plongée à 10, 20 ou 40 m (en plongée carrée...) – résultat théorique : 53 minutes ! attention à ne pas s'y amuser : ce calcul comprend la descente, la remontée, les éventuels paliers de décompression ... le mot est lancé !

Autre aspect des choses, les répercussions sur le gilet stabilisateur (la STAB^o)

Pour pouvoir décoller du fond :

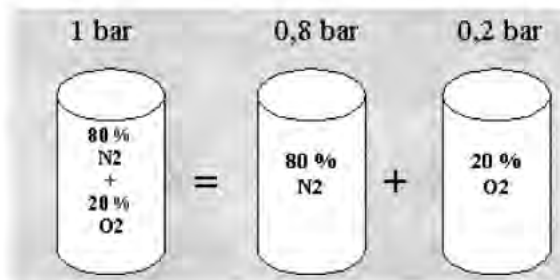
- et plus on est profond --- et **plus il faudra insuffler de l'air** dans la stab pour pouvoir décoller --
- Mais si nous sommes partis de profond, **l'air de la stab se dilate en remontant** ... il va donc falloir **purger** au fur et à mesure de la dilatation. Les purges de la stab sont faites pour cela. Souvenez-vous que si vous partez des 60 m, ça va doubler vers 35 m puis vers 10 m ... commencez sérieusement à purger dès les 30 m
- Si votre partenaire à une combinaison sèche et que vous lui portez assistance, n'oubliez pas de le purger au niveau du plastron de sa combi

En fait et je vous le rappelle, l'air n'est pas un gaz mais un mélange de gaz : de l'oxygène (à hauteur de 20.9%) de l'azote (moins de 80%) et des gaz rares etc mais pour des raisons de commodité on annonce d'une part l'oxygène en premier et l'azote en second et l'on estime que l'air est du 20*80

Composition de l'air : N2 = 78,084% -- O2 = 20,948% -- Ar = 0,934% -- CO2 = 348ppm
--- Ne = 18ppm -- He = 5ppm -- Kr = 1ppm -- Xe = 0,08ppm -- CH4 = 2ppm -- H2 0,5ppm
-- N2O = 0,3ppm -- CO = 0,05 à 0,2ppm -- O3 = 0,02 à 10ppm -- NH3 = 4ppb -- NO2 =
1ppb -- SO2 = 1ppb -- H2S = 0,05 ppb

La loi de Dalton

Si l'on retient que l'air est à 20% d'O2 et 80% d'N2 --- que nous le respirons à la pression de 1 bar en surface on peut estimer que nous respirons en même temps 0.80 bar d'N2 et 0.2 bar d'O2 ...



en fait il s'agit là d'additionner les 2 pressions partielles pour obtenir la pression de l'air

1^{ère} formulation de la loi de Dalton : la pression partielle d'un gaz dans un mélange est la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul tout le volume du mélange.

2^{nde} formulation de la loi de Dalton : La pression partielle d'un gaz dans un mélange est obtenue par la formule suivante :

$$P_p = (P \text{ absolue}) * (\% \text{ du gaz})$$

3^{ème} formulation de la loi de Dalton : Dans un mélange gazeux, la somme des pressions partielles des composants de ce mélange est égale à la pression du mélange.

$$P(\text{air}) = P \text{ partielle}(\text{O}_2) + P \text{ partielle}(\text{N}_2)$$

Application à la plongée : la toxicité des gaz

- **L'oxygène est toxique pour une pression de 1.6 bar** /// Cela veut dire que si nous respirons de l'oxygène pur (du 100%) lors d'un palier de décompression, ... sachant

que la pression en surface est de 1 bar et qu'elle augmente de 0.1 bar sous l'eau par m de profondeur ... passer 6 m ... nous allons être atteints d'hyperoxie /// cet été j'avais plongé sur le « Togo » avec une bouteille pour la décompression gonflée à 77% d'oxygène ... quel était la profondeur au-dessous de laquelle je risquai l'hyperoxie ? ... La pression toxique est de 1.6 bar donc Plancher toxique 1.6 – Pression ambiante en surface 0.77 = différentiel de Pression 0.83 rapporté aux 0.1bar / m d'eau : limite d'utilisation = -8.3 mètres /// et à l'air 20*80 jusqu'où puis je descendre sans risque ? $P_p(O_2) = 0.20$ $P_{tox} = 1.6$ donc $1.6 / 0.20 = 8$ de différentiel de pression : 8 bar c'est la pression relative à 70 m

- Et pour l'azote ? Sa **P(N2) toxique est de 5.6 bars** /// avec de l'air 20/80 (20% d'O2 et 80% d'azote N2 ... $5.6/0.8 = 7$... 7 bars c'est la pression relative à 60 m

Vous comprenez donc mieux la toxicité des gaz et les limites données par les tables de plongée ... limites à ne pas dépasser

La loi de Henry (pour les N3 et N4)

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

On peut écrire cette loi ainsi :

$$P = Kh C$$

où : **P** est la pression, **Kh**, la constante de Henry et **C** la concentration
ou alors :

$$C = P / Kh$$

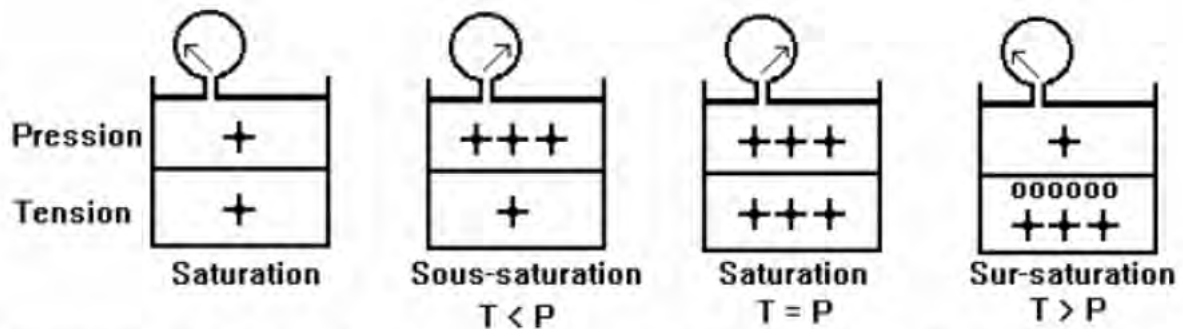
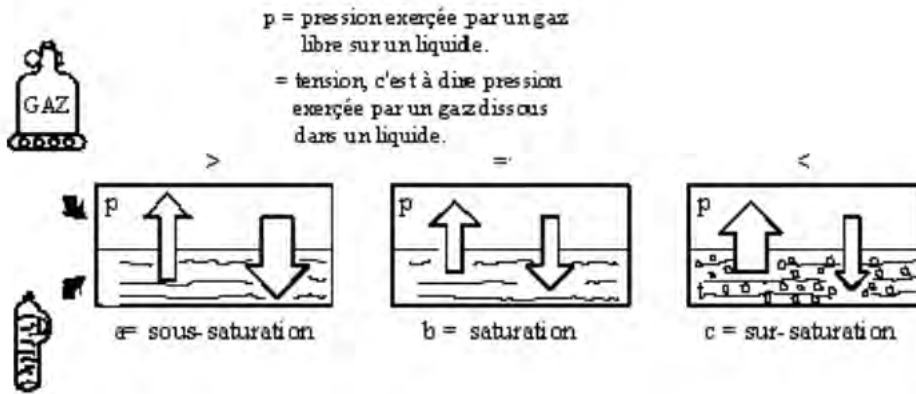
Cette loi régit donc la dissolution des gaz dans les liquides ¹. Lorsqu'un gaz est au contact d'un liquide cela provoque un échange gazeux entre les deux par dissolution. On appelle

« Tension » (Tg) la pression exercée par le liquide sur le gaz dissous.

La « saturation » est le résultat de l'équilibre entre la pression « P » du gaz et la tension « Tg » de ce gaz au sein du liquide, c'est-à-dire lorsque le maximum de gaz est dissous.

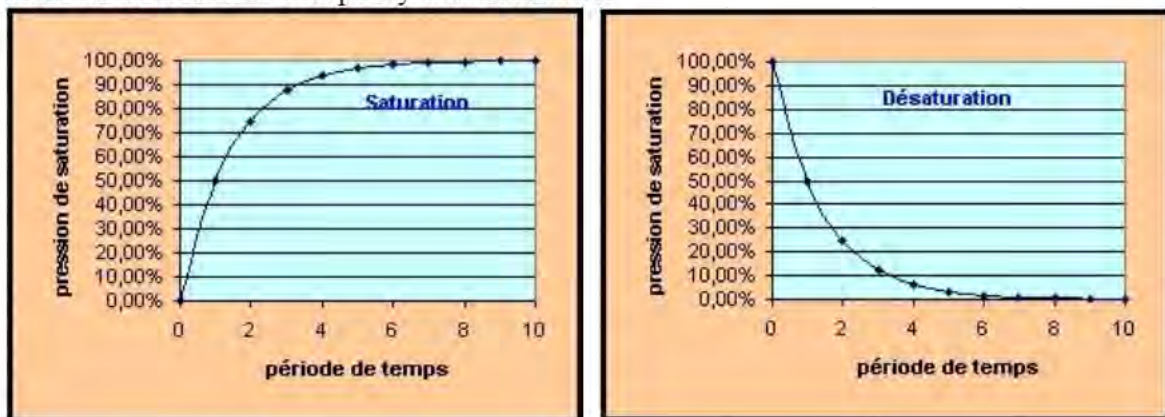
Si $P = Tg$ --- on est à saturation	= le maximum de gaz dissous et en équilibre dans le liquide
Si $P < Tg$ --- sous-saturation	= le gaz se dissout dans le liquide
Si $P > Tg$ --- sursaturation	= le gaz redevient gazeux et quitte le liquide, ce qui arrive à la remontée du plongeur

¹ Dans le vide, le gaz a une expansion infinie. /// Quand vous ouvrez une bouteille de boisson gazeuse, il y a un dégagement de bulles qui prouvent la présence de gaz dans la boisson. Ce gaz est à une pression supérieure à la pression du même gaz dans le milieu ambiant. Les gaz sont donc solubles dans les liquides en fonction de leur coefficient de solubilité dans le liquide.

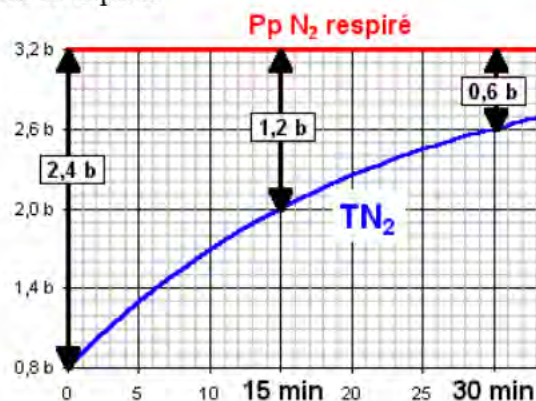


Remarque : le gaz met un temps « t » pour se dissoudre Cette dissolution n'est pas immédiate

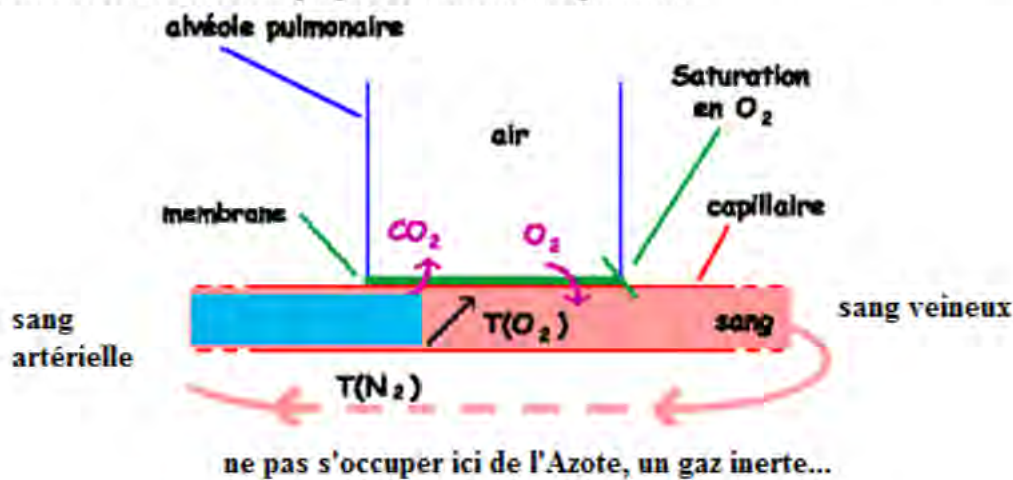
Idem en sens inverse lorsqu'il y a sursaturation –



On appelle **période** « T » le temps nécessaire pour atteindre 50% de la saturation. Ce « T » définit l'affinité du gaz pour le liquide



Vous avez compris que cette loi de Henry régit la dissolution de l'oxygène et de l'azote dans le sang, mais pas seulement, dans aussi les différents tissus de notre corps que sont les os, les muscles, la lymphe, le système nerveux etc., et qu'à la remontée, le plongeur va subir un phénomène de désaturation qui peut se révéler dangereux ...



Les tables de décompression de Haldane

Le modèle de Haldane

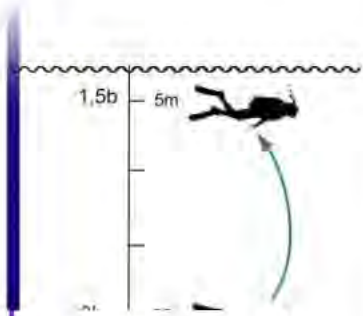
En 1906, le gouvernement anglais inquiet de l'incidence des accidents de décompression chez les travailleurs sous pression demande à l'Écossais J.S. Haldane de poursuivre les travaux de Paul Bert afin de fournir un moyen de prévention à la maladie. L'étude expérimentale qu'il mena sur des chèvres permit à Haldane de fournir le premier jeu de table de décompression. Leur usage fut aussitôt répandu chez les scaphandriers et le taux d'accident chuta significativement.

Non seulement Haldane emprunta à P. Bert l'idée **d'une remontée lente**, mais il mis en évidence que si le rapport entre tension en azote dans le corps et pression ambiante n'excédait pas un certain seuil, l'accident ne se produisait pas.

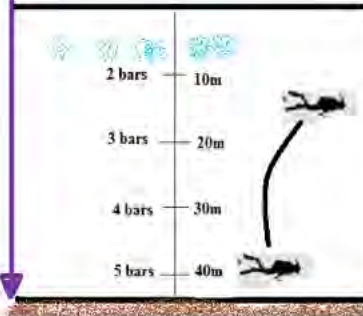
Il publia en 1908, le premier jeu de tables de décompression, basé sur l'idée **qu'un corps peut toujours remonter dans une zone où la pression est deux fois moindre que celle à laquelle le plongeur a accumulé son azote**. C'est à dire que la **pression de saturation** doit toujours être plus petite (ou égale) à **deux² fois la pression ambiante**. En fait, la tension du corps doit être plus petite que deux fois la pression partielle d'azote à la profondeur à laquelle le plongeur se trouve.

$$T_g(N_2) < 2 \times P_p(N_2)$$

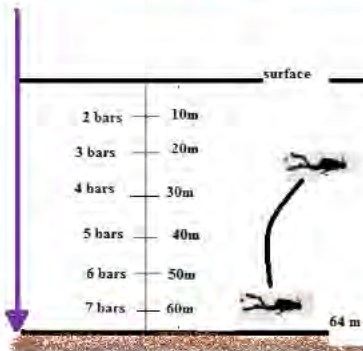
² 2 = voir plus loin le seuil de saturation critique --- expérimentalement Haldane détermine Sc comme égal à 2 – hors cela signifie qu'il n'a pas encore pris en compte les compartiments, ou qu'il assimile le plongeur à 1 seul compartiment : le sang --- On qualifie sa théorie de théorie par perfusion ...



Exemple 1 : Pour un corps saturé en azote à 20m (3 bar), la tension en azote est $Tg(N_2) = 3b \times 80\% = 2,4 \text{ b}$. --- On doit avoir : $Tg(N_2) = 2,4 < 2 \times Pp(N_2)$, donc $Pp(N_2) = Tg(N_2)/2$ vaut au minimum $2,4/2 = 1,2b$. --- On atteint une pression partielle d'azote $Pp(N_2) = 1,2b$ pour une pression absolue **Pabs(du palier) = $Pp(N_2) / 80\%$** soit $(1,2 \times 100)/80 = 1,5b$ soit 5m de profondeur. /// Suivant Haldane, un plongeur saturé à 20m peut toujours remonter à 5m sans risque d'accident (on notera que les tables MN90 ne commencent leurs paliers qu'à 3m pour une profondeur de 20m).



Exemple 2 : pour une remontée à partir des 40 m , la pression absolue à 40 m est de 5 bars ---la pression de saturation en azote $Tg(N_2) = 5 \times 0,8 = 4 \text{ bar}$ /// $T(N_2) < 2 \times Pp(N_2)$ ---- ou $4 < 2 \times Pp(N_2)$ --- ou $Pp(N_2)$ -- la pression partielle en azote du palier est $< \text{ou} = 2 \text{ bars}$ --- donc la pression absolue du palier est **Pabs(du palier) = $Pp(N_2) / 80\%$** = $2 / 0,8 = 2,5 \text{ bars}$ => c'est la pression absolue à 15 m de profondeur d'où un palier à 15 m



3^{ème} exemple : remontée de 64 m profondeur maximale donnée par Haldane : la pression absolue à 64 m est de 7.4 bars ---la pression de saturation en azote $Tg(N_2) = 7,4 \times 0,8 = 5,92 \text{ bar}$ /// $Tg(N_2) < 2 \times Pp(N_2)$ ---- ou $5,92 < 2 \times Pp(N_2)$ --- ou $Pp(N_2)$ -- la pression partielle en azote du palier est $< \text{ou} = 5,92/2 = 2,96 \text{ bars}$ --- donc la pression absolue du palier est **Pabs(du palier) = $Pp(N_2) / 80\%$** = $2,96 / 0,8 = 3,7 \text{ bars}$ => c'est la pression absolue à 27 m de profondeur d'où un palier à 27 m

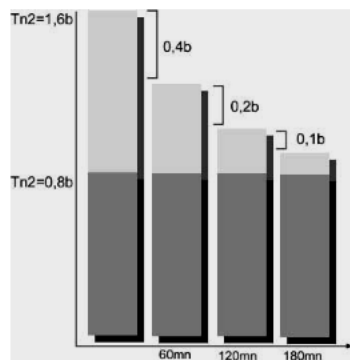
En fait il y a une correction à apporter pour les grandes profondeurs le facteur 2, fut rabaisé à 1,54 pour les compartiment le plus long, et monté à plus de 2,72 pour le compartiment le plus court .

Compartiments ? La notion de compartiment est rarement expliquée dans notre littérature spécialisée. Il s'agit de **modèles mathématiques correspondant aux divers tissus** de l'organisme : En voici quelques exemples (données plus récentes – 2004 -) lesquels reste approximatifs, car un même organe , vue la diversité de ses tissus , appartient à plusieurs compartiments :

-Compart. 1 – Période = 5mn –	Reins
-Compart. 2 – Période = 10 mn	Estomac, foie, viscères, Système Nerveux Central (SNC)
-Compart. 3 – Période = 20 mn –	Foie, viscères, SNC
-Compart. 4 – Période = 40mn --	Peau
-Compart. 5 – Période = 80 mn –	Peau, muscles et cœur
-Compart. 6 – Période = 160 mn –	Muscles
-Compart. 7 – Période = 320 mn –	Muscles, articulations, os, graisse
-Compart. 8 – Période = 640 mn –	Articulations, os, graisse

Avec Haldane nous avons calculé la profondeur des paliers – maintenant nous allons calculer la durée des paliers.

J.S. Haldane s'intéresse aussi à la vitesse à laquelle l'azote est assimilé (ou restitué) par le corps. L'hypothèse d'Haldane repose sur un découpage (artificiel) du corps en compartiments. Un compartiment est constitué de **tissus qui vont absorber (ou restituer) en une période T, une quantité de gaz égale à la moitié de ce que ces tissus doivent absorber (ou restituer)** pour arriver à saturation (**la tension en azote** = pression partielle en azote). ... Un tissu qui a une période de 60 minutes mettra 60 minutes pour emmagasiner (restituer) la moitié de l'azote nécessaire pour l'amener à l'équilibre. Si ce tissu a été saturé à 10m, sa tension en azote est de (1,6b), remonté en surface ($P_{pn2}=0,8\text{bar}$) ce tissu libérera $0,8/2=0,4$ bar pour les premières soixante minutes. Puis, $0,4/2$ pendant les 60 minutes suivantes, $0,2/2$ les suivantes etc. ...



T, la période du tissu est de 60mn pour libérer la $\frac{1}{2}$ de son azote dissous --- saturé à 10 m = à 1.6 bar ($2 \cdot 0,8$) à 60 mn il perd la moitié de son gaz dissous soit $0,8 \text{ bar} / 2 = 0,4 \text{ bar}$ // à 120 mn $\Rightarrow 0,4 \text{ bar} / 2 = 0,2 \text{ bar}$ /// à 180 mn $\Rightarrow 0,2/2 = 0,1 \text{ bar}$...

Haldane dénombre **5 compartiments : 5, 10, 20, 40, 75 minutes**. **Ces périodes sont aussi appelées "demi-vies"**, par référence aux éléments radioactifs qui perdent leur radioactivité suivant un même schéma.

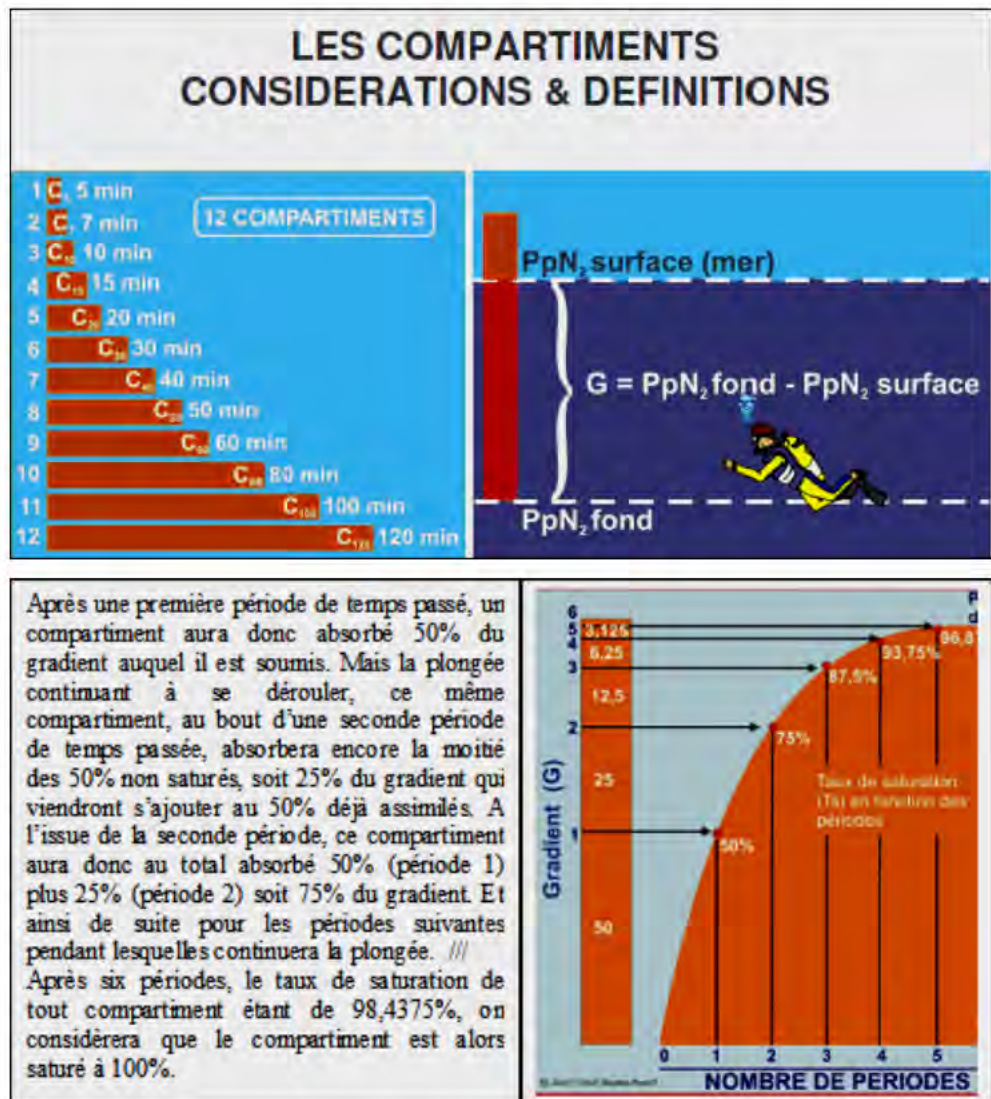
Avec ces éléments, il est facile de reconstruire la première table de plongée élaborée par J. S. Haldane. Cette dernière fut utilisée pendant une trentaine d'années, avant que d'autres études menées par l'US Navy n'introduisent un coefficient de sursaturation critique (M-value) pour chaque compartiment. En effet, on remarqua que les compartiments les plus "longs" (plus grande période), semblaient plus sensibles aux variations de pression.

LES COMPARTIMENTS

- Le corps humain est représenté par **12** compartiments (20 pour certains auteurs modernes)
- Au **gradient** ($G = PpN_2 \text{ fond} - PpN_2 \text{ surface}$) va correspondre la Quantité maxi de N_2 que peuvent absorber les compartiments
- La **période** est le temps (en min) que met un compartiment pour absorber la moitié du gradient de pression. /// La période caractérise chaque compartiment (C_5, C_{10}, \dots) /// Se basant sur le modèle Haldanien, les tables MN90 (Marine Nationale 1990) considèrent que : Le corps humain peut être représenté par un ensemble de régions anatomiques factices appelées « compartiments ». exemple : un compartiment = les reins ; un autre compartiment = les os etc. ---

La différence des pressions partielles d'azote entre le fond et la surface est appelée « gradient » (G) et correspond à la quantité maximum d'azote assimilable par l'organisme.

- Chaque compartiment est caractérisé par une période définie en minute correspondant au temps que mettra chaque compartiment pour absorber la moitié du gradient de pression partielle d'azote.



A chaque période supplémentaire T' , chaque compartiment se sature en N_2 de 50% de sa capacité de saturation restante. ($P_1 : 50\%$, $P_2 : 50\% + 25\% = 75\%$, $P_3 : 75\% + 12,5\% = 87,5\%$, ...) --- Après 6 périodes, le taux de saturation (T_s) est » 100%

Examinons le comportement du **compartiment C10** lors d'une plongée à **25 m** durant **30 mn**

Rappel : le compartiment C10 a un période de 10mn
- donc 30 mn au fond = 3 périodes

1) Calcul de la Tension finale en N2 après 3 périodes (**Tg(fin)**)

$$(\mathbf{Tg(fin)}) = \mathbf{Tension\ initiale\ (Tg(ini\ / \ de\ surface))\ +\ [\mathbf{Gradient}(\Delta\ pression\ partielles)\ * \mathbf{Taux\ de\ saturation\ (Ts)}]$$

Tension initiale en Azote ou de surface = $TgN2\ initiale = PpN2\ en\ surface = 0,8\ bar\ ---$

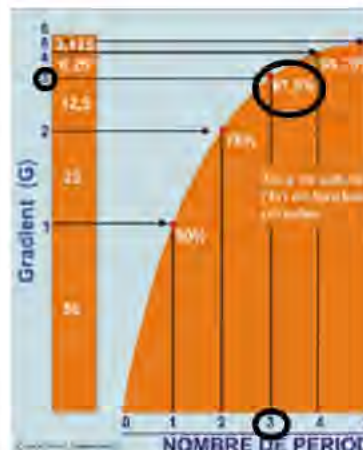
Pression partielle $PpN2\ fond = (2,5 * 0,8 + 0,8) = 2,8\ bar$

Gradient = $G = PpN2\ fond - PpN2\ surface = 2,8 - 0,8 = 2\ bars$

Taux de saturation = $Ts = 50\% + 25\% + 12,5\% = 87,5\%$
(cf shama des périodes)

$TgN2\ finale = TgN2\ initiale + (G \times Ts) = 0,8 + (2 \times 87,5\%) = 2,55\ bar\ ---$

c'est-à-dire que j'ai une tension de 2.55b au bout de 30minutes donc inférieure aux 2.8 bar lorsque mon compartiment C10 (les reins est à saturation) --- La tension finale d'un compartiment, c'est à dire la quantité d'azote qui se sera dissoute dans un compartiment donné après un nombre de périodes donné, s'obtient en ajoutant à la tension initiale de ce compartiment (les 0,8 bars de PpN2 en surface), la fraction de gradient supplémentaire d'azote qui se sera dissoute dans le compartiment durant le nombre de périodes considéré



Calcul de **Ts** (taux de saturation)



Calcul du gradient **G**

- La tension de N2 = **Tg(N2)** traduira la même notion de Quantité de N2 que la PpN2 mais, dissoute dans les compartiments

Comportement du compartiment C10 lors d'une plongée à 25 m durant 30 min :

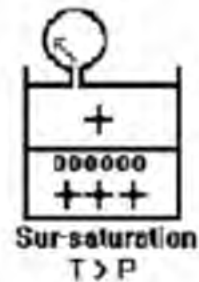
Le compartiment C10 peut-il regagner la surface sans palier ?

- **OUI** si le rapport entre $TgN2\ finale$ et $Pabsolue$ ne dépasse pas un seuil appelé le seuil de **Sursaturation critique (Sc)**
- **NON** dans le cas inverse => PALIER(s) !!! /// Souhaitant regagner la surface, $Pabs$ doit être $< ou = 1\ bar \dots$

$$\mathbf{Sc\ (seuil\ de\ sur\ saturation\ critique)} = \mathbf{TgN2\ (Tension\ d'N2\ finale) / P\ absolue}$$

Le tableau ci-dessous va nous donner le seuil de saturation critique pour le compartiment C10

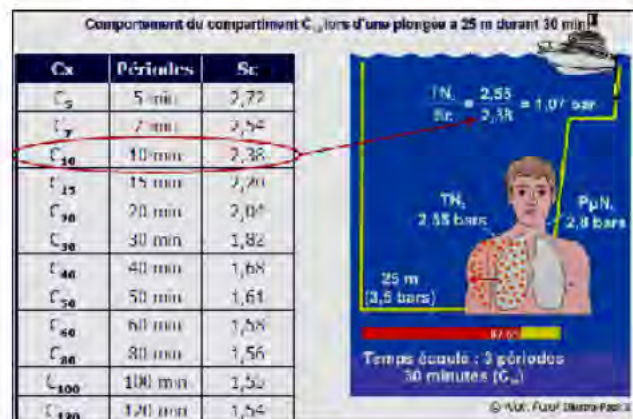
Cx : Compartiment	Période (en minutes)	Sc (seuil de saturation critique)
C 5	5	2.72
C 7	7	2.54
C 10	10	2.38
C 15	15	2.20
C 20	20	2.04
C 30	30	1.82
C 40	40	1.68
C 50	50	1.61
C 60	60	1.58
C 80	80	1.56
C 100	100	1.55
C 120	120	1.54



Dans le cas de plongée qui nous préoccupe $Sc = 2.38$
 Reprenons la formule précédente mais
 $TgN2 / Sc = P \text{ absolue}$
 (palier si P absolue supérieure à 1)

Donc $TgN2 / Sc = 2.55 / 2.38 = 1.07$
 --- 1.07 est la Pression absolue ,

donc si > 1 ... 1 est la Pabsolue en surface) ... La P absolue va nous indiquer la profondeur de notre palier ... Ici ... 1.07 est la P absolue pour une profondeur de 70 cm , celle du palier ... donc 3 m !



La notion de seuil de sursaturation critique nous renvoie à la constatation initiale faite par Haldane du rapport de pression de 1 à 2 à ne pas dépasser au risque de s'exposer aux dangers du « mal des caissons ».

Depuis Haldane qui ne considérait qu'un unique seuil de sursaturation critique égal à 2, commun à tous les compartiments, le modèle a évolué pour considérer désormais des seuils de Sc spécifiques pour chaque compartiment (cf. tableau).

Pour qu'un compartiment puisse regagner la surface sans danger, le rapport de la tension en azote du compartiment considéré sur la pression absolue doit donc respecter à ne pas dépasser la valeur du seuil de sursaturation critique. En d'autres termes, **le rapport de la tension en azote par le seuil de sursaturation du compartiment (rapport qui correspond à la pression absolue) doit donc être inférieur ou égal à 1** (pression atmosphérique de la surface). Si ce rapport n'est pas inférieur ou égal à 1, cela signifie que ce compartiment ne peut supporter une pression absolue égale à celle de la surface. Ce rapport déterminera donc la profondeur minimale supportable. **De tous les compartiments, on appellera le « compartiment directeur », le premier des compartiments à limiter la remontée.**

Les tables MN90 : Calculs



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	*

Les modèles non Haldaniens : il existe d'autres modèles qui tiennent compte des imperfections du modèle Haldanien

- **Modèles par diffusion ou « slab model »** ***1952 : Hempleman – Au lieu de considérer la diffusion des gaz par « perfusion » comme chez Haldane, Hempleman prend en compte la « résistance des tissus » à l'absorption ou l'élimination de l'Azote – Il envisage aussi le cas des microbulles non pathogènes *** Repris par T. Henney, ce travail donne naissance en 1988 aux tables British Sub-Aqua Club (BS-AC) **calculées sur un seul compartiment théorique** – Le premier palier est à 5 m !
- **Compartiment en série (DCIEM)** *** dès 1962 les canadiens Kidd et Stub démontrent qu'il vaut mieux considérer les « compartiments » comme étant « en série et non en parallèle » comme chez Haldane – prenant ainsi en compte les échanges d'un compartiment à un autre (pas d'indépendance) – leurs laboratoires fusionnent en 1971 au sein de la DCIEM (Defense and Civil Institute of Environmental Medicine) – à partir de 1983 : nouvelles tables DCIEM / Canada
- **Noyaux gazeux et microbulles : modèles diphasiques** *** Haldane ne tient compte que des gaz dissous et donc qu'aucune bulle n'apparaît tant que l'on est pas arrivé au seuil critique (Sc)... ce qui n'est pas le cas lors de la désaturation, dans le cas de plongées profondes, successives, ou Yoyo --- Divers modèles ont été élaborés en tenant compte de Haldane mais aussi de la présence de noyaux gazeux (gaz nucléi) ou microbulles pouvant provoquer la formation de bulles dangereuses : *** Le VPM (Varying Permeability Model) *** Le RGBM (Reduced Gradient Bubble Model – modèle amélioré et que l'on retrouve dans les ordinateurs Suunto (Stinger – Mosquito – Cobra – Vyper) ; ainsi que dans les Mares (M1 –

RGBM , Nemo) *** Les travaux du Pr Bühlmann ont été actualisés et se retrouvent dans les modélisations ZH-L8 et ADT MB – intégrés par UWATEC.

• **Taux de risque accepté : approche statistique** La marine des USA a édité des tables de plongées en fonction des risques acceptés par les plongeurs – A titre d'exemple en 1957 – une plongée à 30 m de 25 minutes était sans palier – et de 8 minutes pour un risque d'accident pour 10.000 plongées (Les MN90 fixent le temps à 30 m sans palier à 10 minutes)

Prof en m	US Navy 1957	Nouvelle approche (statistique)	
		Risque 1/10.000	Risque 5/10.000
9	310	170	240
12	200	100	170
15	100	70	120
18	60	40	80
21	50	25	80
24	40	15	60
27	30	10	50
30	25	8	50
33	20	7	40

Loi de Graham

Il faut également donc prendre en compte la vitesse de diffusion des gaz : c'est la **Loi de Graham** : La vitesse de diffusion d'un gaz est inversement proportionnelle à la racine carrée de son poids moléculaire. /// Ainsi, l'oxygène O₂ diffuse plus vite que le dioxyde de carbone CO₂. /// Cette loi est aussi appliquée par exemple pour séparer l'uranium 235 du 238 avec un système de filtres poreux.

Loi de Fick :

La vitesse de transfert d'un gaz à travers une couche d'un tissu est proportionnelle à la surface et à la différence de concentration du gaz de part et d'autre du tissu et inversement proportionnel à l'épaisseur. /// $Debit = SD\Delta c/e$ Où D est la constante de diffusion. /// *Exemple* : Les poumons ont une très grande surface-celle d'un cours de tennis) mais de très faible épaisseur environ 5µm

Loi de Charles

Enfin il nous faut revenir à une dernière loi sur les gaz mais elle ne concerne pas directement nos problèmes de saturation ... la loi de Charles ... à volume constant, pression et température sont liés

Ce qui se traduit par $P/T^{\circ} = K$ (cte) ou $P_1/T_1 = P_2/T_2$

Application : Lorsque l'on gonfle un bloc, l'air est chaud et le bloc est gonflé à 230 bars ... laissons le bloc refroidir e quelques jours plus tard on s'aperçoit en consultant son manomètre avant de plonger que la pression est descendue dans le bloc : il ne s'agit pas de fuite mais d'une baisse de pression proportionnelle à la baisse de température de l'air comprimé, à volume constant : les 12 l du bloc