



GUIDE DE PALANQUÉE – NIVEAU 4

LES MODÈLES DE DÉCOMPRESSION



GUIDE DE PALANQUÉE – NIVEAU 4

En plus des acquis du niveau 3, le GP devra avoir des connaissances plus approfondies sur les tables et les ordinateurs de plongée :

- Le principe d'un ordinateur de plongée
- Les algorithmes
- Les différences entre les tables et les ordinateurs
- Les différents modèles de désaturation
- Il devrait également avoir des notions sur les ordinateurs les plus utilisés afin de pouvoir comprendre et gérer ceux des plongeurs qu'il encadre et les renseigner si besoin.



SOMMAIRE

- 1. DISSOLUTION DE L'AZOTE DANS L'ORGANISME**
- 2. MODÈLE DE HALDANE**
- 3. LES AUTRES MODÈLES DE DÉCOMPRESSION**



DISSOLUTION DE L'AZOTE DANS L'ORGANISME

- **LOI DE HENRY**
- **LOI DE DALTON**
- **LES DIFFÉRENTS ÉTATS DE SATURATION EN PLONGÉE**



LOI DE HENRY

« A température constante et à saturation (équilibre), la quantité de gaz dissoute dans un liquide est proportionnelle à la pression exercée par ce gaz sur le liquide. »

Cette dissolution de gaz varie en fonction de :

- **La pression :**

Comme annoncé précédemment, c'est le facteur le plus important en plongée.

- **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.

- **La durée d'exposition :**

La dissolution n'est pas immédiate mais est directement liée à la durée de la plongée.



LOI DE HENRY

- **L'agitation :**

La quantité de gaz dissoute augmente en cas d'agitation. Cette agitation à lieu si un effort important est réalisé en cours de plongée.

- **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 :**

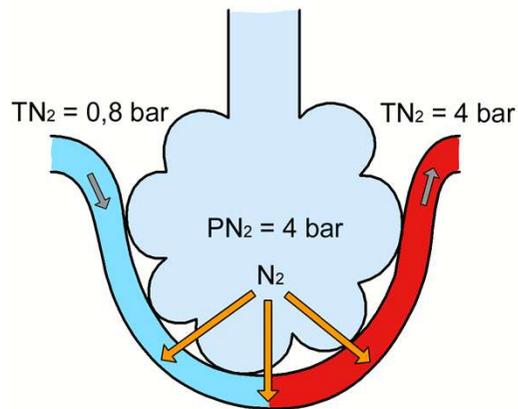
Le facteur et la vitesse de dissolution de l'azote est différent suivant le tissu organique : muscle, graisse... La quantité d'azote dissoute dans ces différents tissus sera donc différente.

LOI DE DALTON

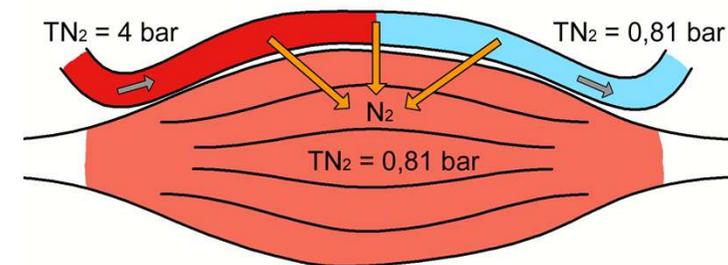
« A température donnée, la pression totale d'un mélange de gaz est égale à la somme des pressions qu'aurait chacun des gaz s'il occupait seul le volume total »

$$P_{p(\text{gaz})} = P_{\text{abs}(\text{mélange})} \times \% (\text{gaz})$$

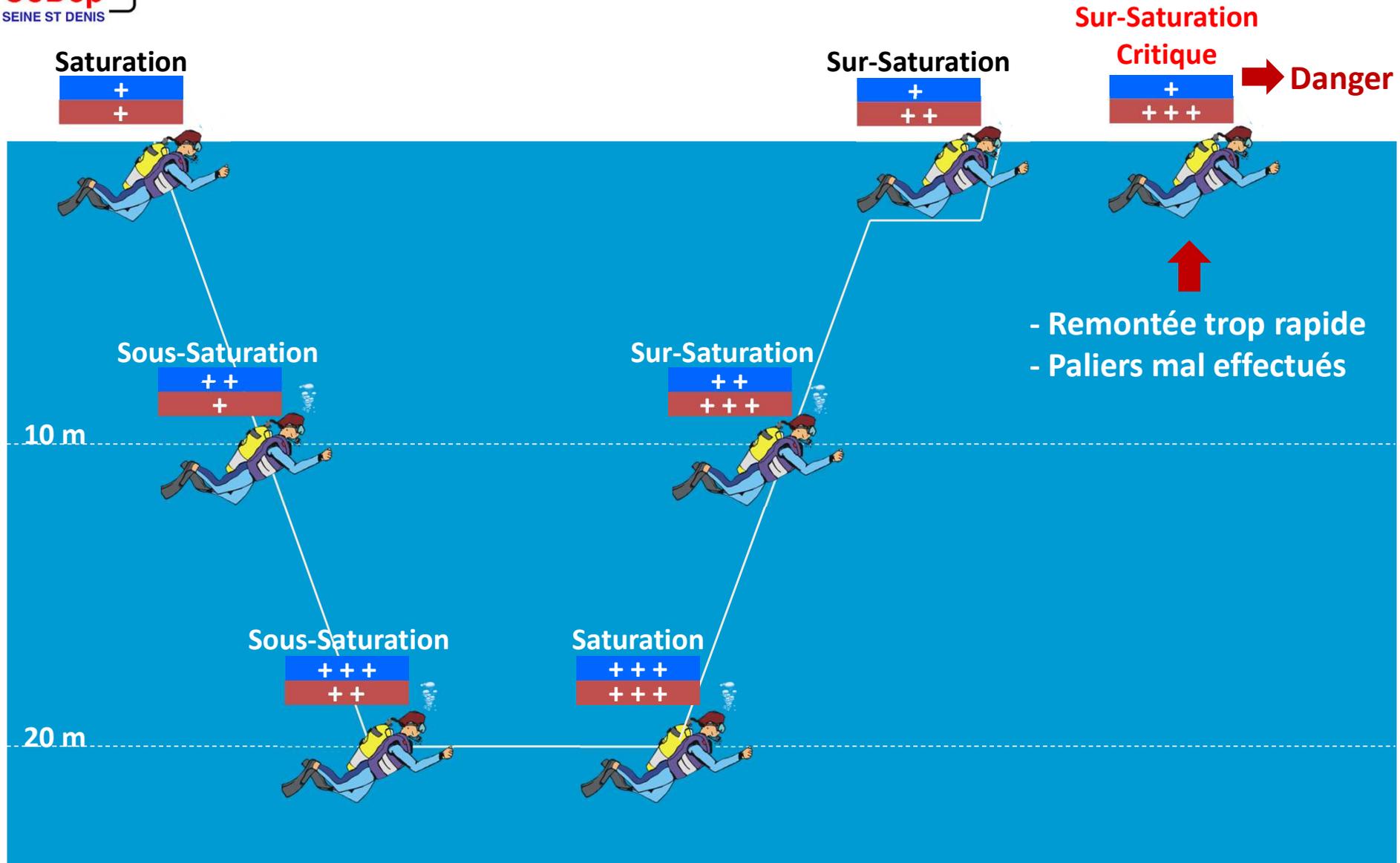
P_{pN_2} : Pression partielle de l'azote respiré.



TN_2 : Pression partielle de l'azote dissous dans les tissus.



LES ÉTATS DE SATURATION EN PLONGÉE





LES OUTILS DE DÉCOMPRESSION

Des outils de décompression proposent au plongeur un moyen de gérer sa désaturation en minimisant le risque d'accident :

- Les ordinateurs de plongée.
- Les tables de plongée (prochain cours).

Les tables et ordinateurs de plongée n'ont qu'un seul et même objectif : **ÉVITER LES ACCIDENTS DE DÉSATURATION**

 Ces outils s'appuient sur différents **MODÈLES.**



MODÈLE DE HALDANE

- **QU'EST CE QU'UN MODÈLE ?**
- **LE MODÈLE DE DÉCOMPRESSION**
- **LE MODÈLE DE HALDANE**
- **LES TABLES MN90 : UN MODÈLE HALDANIEN**
- **HALDANE : UN MODÈLE À SUCCÈS**



QU'EST CE QU'UN MODÈLE

C'est la construction « schématique » ou mathématique de la réalité.

Objectif : expliquer et représenter un phénomène physique ou physiologique complexe.

Le modèle s'appuie sur :

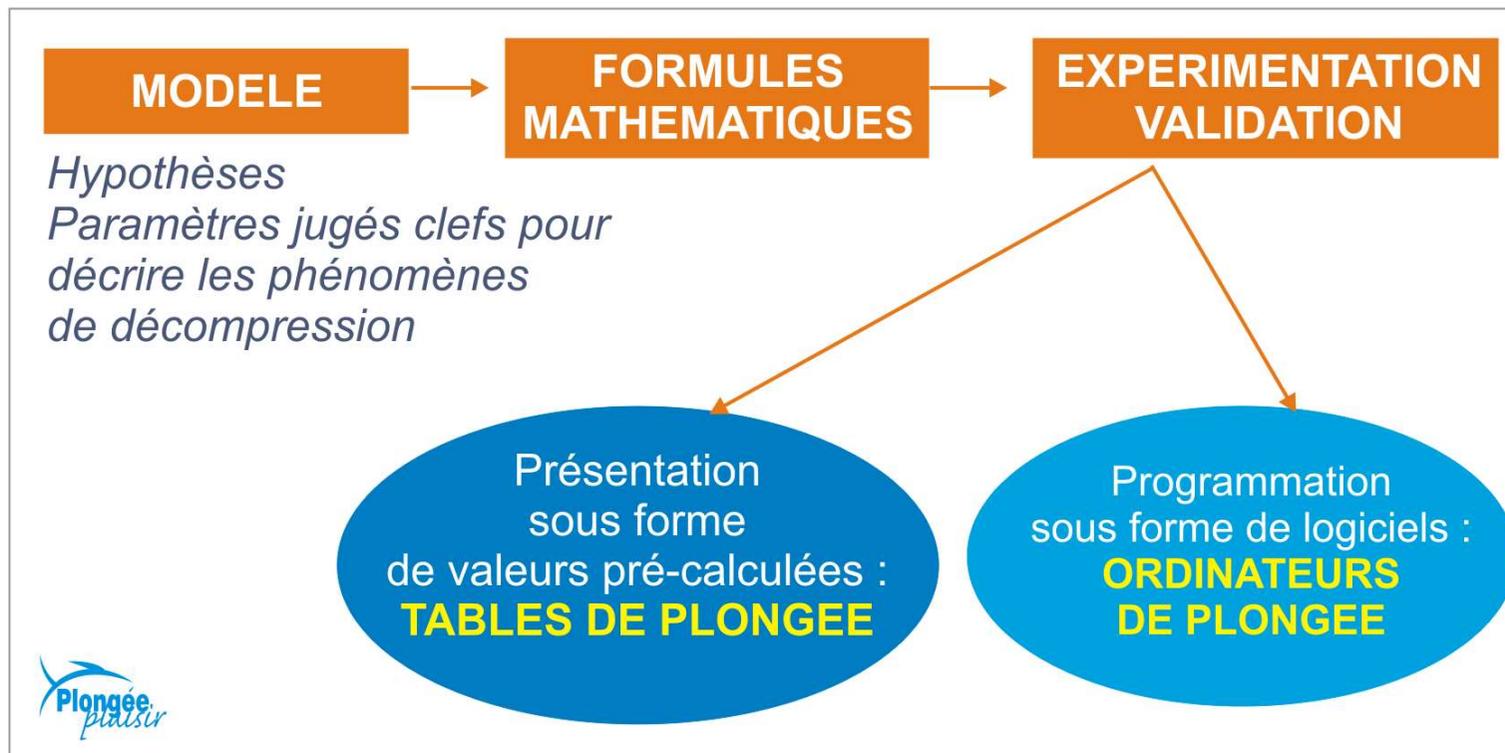
- Les connaissances passées.
- Des hypothèses.
- Des règles et des limites d'utilisation.
- Des expérimentations et correctifs.

Pourquoi des limites ?

- Connaissances limitées (science).
- Ne prévoit pas tous les cas de figure.

LE MODÈLE DE DÉCOMPRESSION

Un modèle de décompression est une représentation simplifiée (et incomplète) de phénomènes physiologiques liés à la dissolution de gaz dans l'organisme d'un plongeur en immersion, et notamment à la désaturation de ces gaz lors de la phase de remontée.



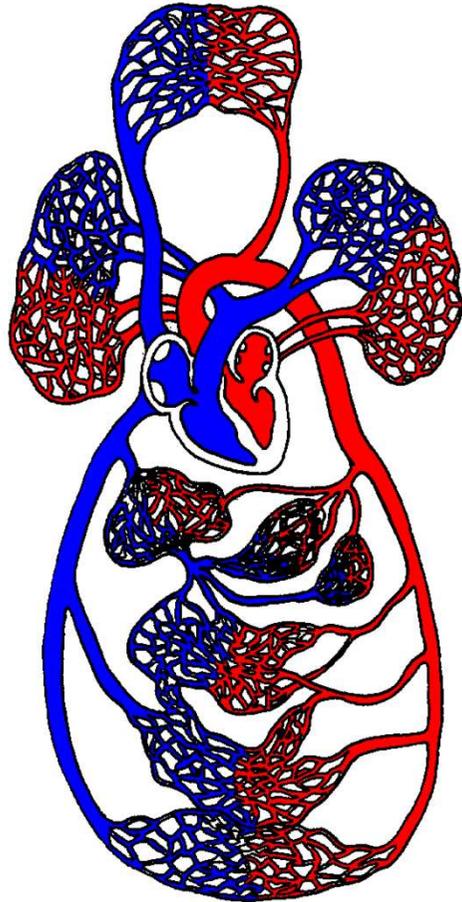


LES MODÈLES DE DÉCOMPRESSION

3 grands types de modèle :

- Modèle à **Perfusion** : Le temps d'acheminement des gaz est considéré comme plus important que le temps de diffusion.
- Modèle à **Diffusion** : Le temps pris pour diffuser dans le tissu est considéré comme prépondérant par rapport au temps de perfusion.
- Modèle à **Microbulles** : est construit autour de la quantité de gaz dissous que peut tolérer l'organisme.

APARTÉ : PERFUSION / DIFFUSION



Diffusion (cinétique de dissolution) :

Quand le gaz (dissous dans le sang) est « en contact » avec l'organe ou le tissu, il le colonise petit à petit. On parle de « Diffusion » :

- Chaque gaz a sa propre caractéristique de diffusion.
- L'absorption et la restitution ne sont pas des phénomènes instantanés.

Perfusion (cinétique de remplissage d'un tissu) :

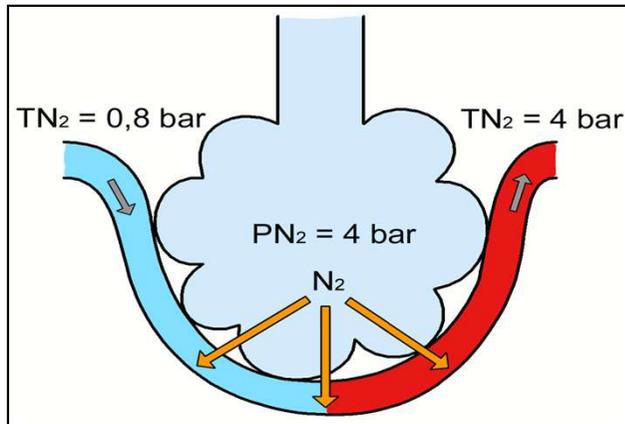
Pour qu'un gaz (dissous dans le sang) puisse atteindre un organe ou un tissu, il faut qu'il soit acheminé jusqu'à celui-ci, c'est le rôle du sang. On parle de « **Perfusion** ».

Perfusion et diffusion sont deux phénomènes différents qui se combinent dans l'organisme pour saturer et désaturer les tissus.

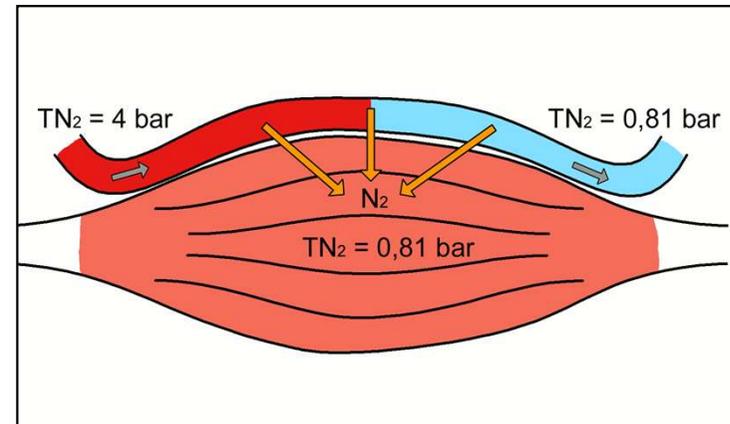
LE MODÈLE DE HALDANE

Les hypothèses de Haldane (John Scott Haldane est un physiologiste écossais) :

1. Modèle à **perfusion**.
2. Diffusion alvéolaire (**poumon/sang**) & tissulaire (**sang/tissus**) **instantanées**.



**Diffusion alvéolaire
instantanée**



**Diffusion tissulaire
instantanée**



LE MODÈLE DE HALDANE

3. Décomposition de l'organisme en compartiments indépendants.
4. Chaque **compartiment** se sature avec sa propre **cinétique de perfusion** (5', 10', ...).
5. Saturation et désaturation sont symétriques.
6. Chaque compartiment possède **un seuil** de saturation constant :
 - Quand la saturation est inférieure au seuil → pas de palier
 - Quand la saturation est égale au seuil → palier obligatoire
 - Quand la saturation est supérieure au seuil → apparition de bulles



Tout le gaz est dissous, les bulles sont pathogènes.

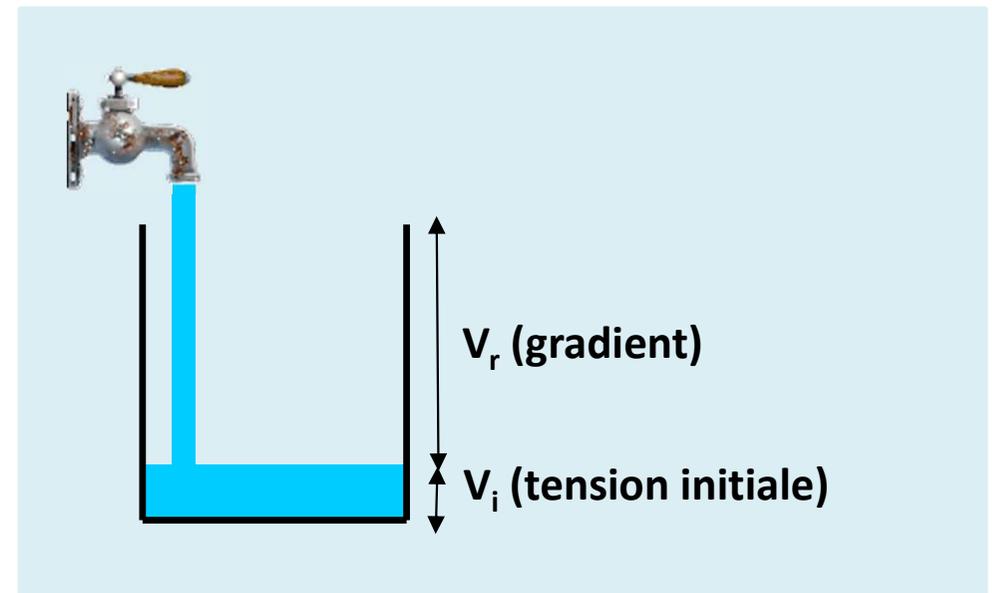
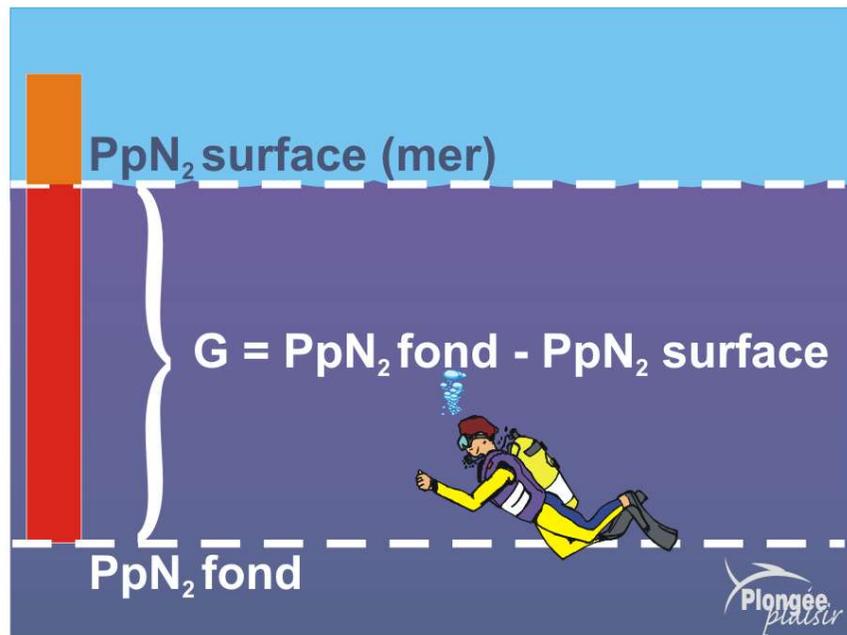
Mise en application :

- ✓ Modèle initial composé avec 5 compartiments.
- ✓ Tables MN90 composée de 12 compartiments.

LES TABLES MN90 : UN MODÈLE HALDANIEN

Modèle avec 12 compartiments :

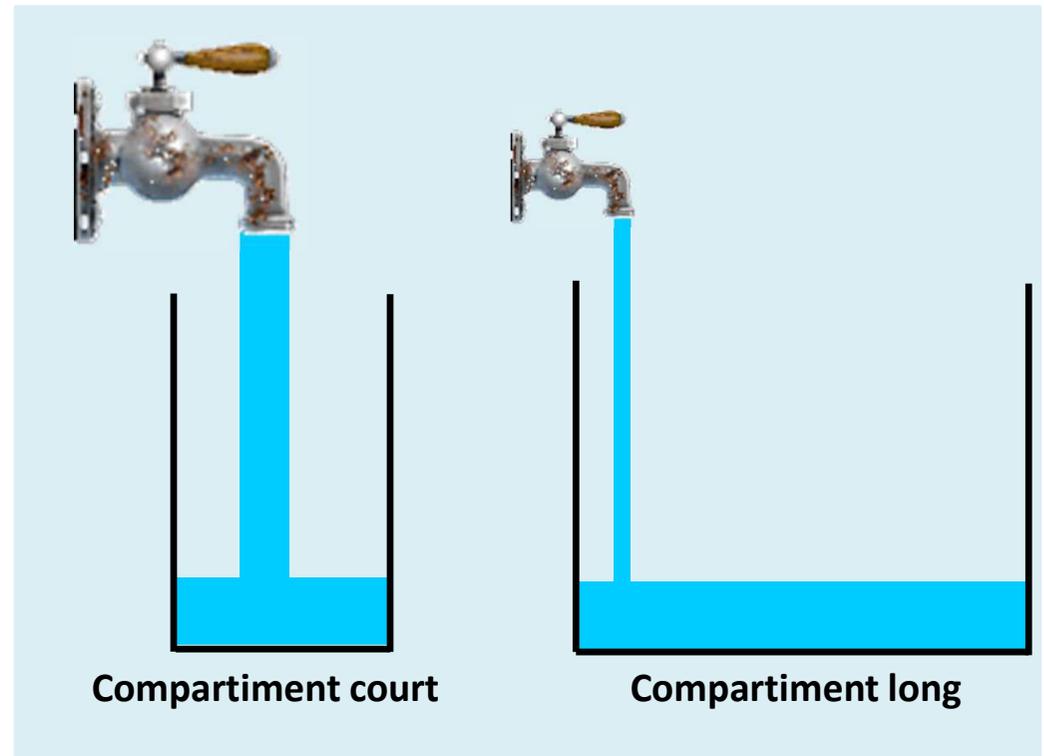
1. Chaque compartiment à une capacité maximale à stocker de l'azote. C'est la différence entre la PpN_2 à la profondeur max de la plongée et celle en surface. Cette différence est appelée **Gradient**.



LES TABLES MN90 : UN MODÈLE HALDANIEN

Modèle avec 12 compartiments :

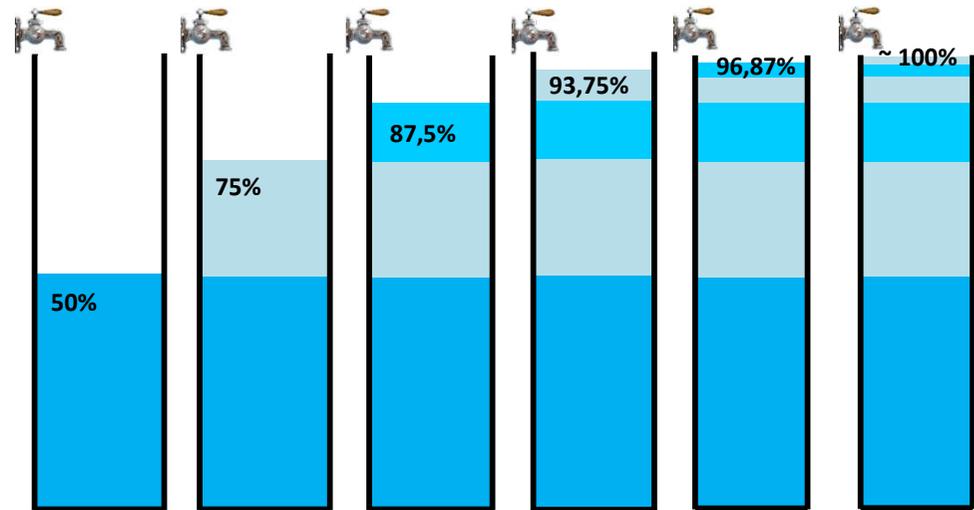
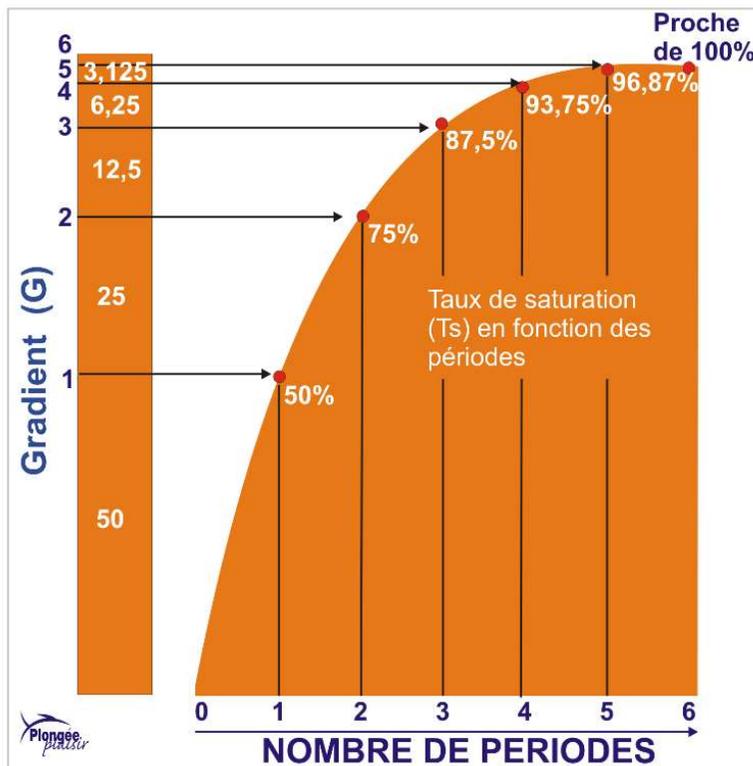
- Chaque compartiment caractérisé par sa **Période** représentative de sa perfusion (5', 10', 20', 40', 75') → Vitesse de charge et de décharge.



LES TABLES MN90 : UN MODÈLE HALDANIEN

Modèle avec 12 compartiments :

3. A la fin de chaque **Période**, la moitié (50%) du **Gradient** est dissoute.



Nb P	1	2	3	4	5	6
% Sat	50%	75%	87,5%	93,75%	96,87%	~ 100%

$$TN_2 \text{ finale} = TN_2 \text{ initiale} + (G \times \% \text{ Sat})$$

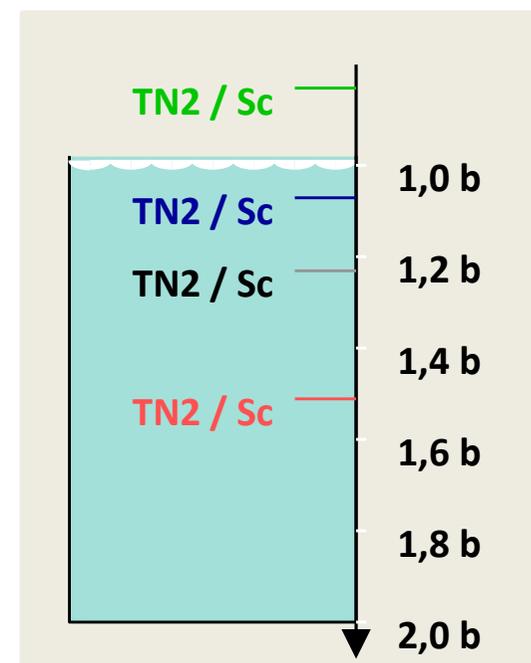
LES TABLES MN90 : UN MODÈLE HALDANIEN

Modèle avec 12 compartiments :

4. Chaque compartiment à un seuil de sursaturation critique Sc . Le rapport entre la TN_2 et la P_{abs} doit être inférieur à ce seuil.

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

- $Sc = TN_2 / P_{abs} \rightarrow P_{abs} = TN_2 / Sc$
- Pour chaque compartiment on calcule TN_2 / Sc qui représente la P_{abs} minimum autorisée.
- Le **compartiment directeur** est celui qui impose le premier stop \rightarrow valeur P_{abs} la plus grande.
- Pour pouvoir rejoindre la surface il faut que pour chaque compartiment, $TN_2 / Sc < 1$.





LES TABLES MN90 : UN MODÈLE HALDANIEN

Méthodologie de calcul (à titre d'information) : Plongée de 40' à 30m

A- Période	5	10	20	40	50	60	80	100	120
B - Sc	2,72	2,38	2,04	1,68	1,61	1,58	1,56	1,55	1,54
C- Pabs	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D - PpN2 = Pabs x 0,8	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
E - PpN2 en surface	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
F - Gradient = D-E	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
G - Temps au fonds	40	40	40	40	40	40	40	40	40
H - Nb Périodes = G/A	8,00	4,00	2,00	1,00	0,80	0,67	0,50	0,40	0,33
I - % Saturation	100%	93,75%	75%	50%	40%	33%	25%	20%	17%
J - T finale = E + (F x I)	3,2	3,05	2,6	2	1,76	1,6	1,4	1,28	1,2
K - Pabs = J/B	1,18	1,28	1,27	1,19	1,09	1,01	0,90	0,83	0,78
L - Prof arrêt (m) = (K-1)x10	1,76	2,82	2,75	1,90	0,93	0,13	-1,03	-1,74	-2,21
M - Palier		à 3 m							

 **C10 est le compartiment directeur**



HALDANE : UN MODÈLE À SUCCÈS

Flexibilité :

- Nombre de compartiments (6 à 16)
- Périodes choisies (3min à 700min)
- Sc ou M-values (Robert Workman)
- Paramétrable

Simplicité : un seul paramètre, facile à mesurer = pression

 Facilité de mise en œuvre : ordinateurs



HALDANE : MAIS AUSSI DES LIMITES !

- Le modèle Haldanien part du principe qu'il n'y a pas de bulles tant que l'on ne s'approche pas du Sc d'un compartiment.
- L'analyse des plongeurs au Doppler montre que cela est faux : **présence de microbulles circulantes dans tous les cas, et surtout lors des plongées successives, profondes et inversées ...**
- Composition du gaz alvéolaire différente de celle du gaz respiré (H_2O et CO_2 indépendants de la pression) → $PpN_2 = (Pabs - 0,063 \text{ bar}) \times \% N_2$

Conséquences :

- Approfondissement de la recherche (militaires, plongée tek).
- Utilisation d'He (plus diffusible que l' N_2 , 2 gaz neutres).
- Evolution du modèle Haldanien.
- Apparition de nouveaux modèles.



LES AUTRES MODÈLES DE DÉCOMPRESSION

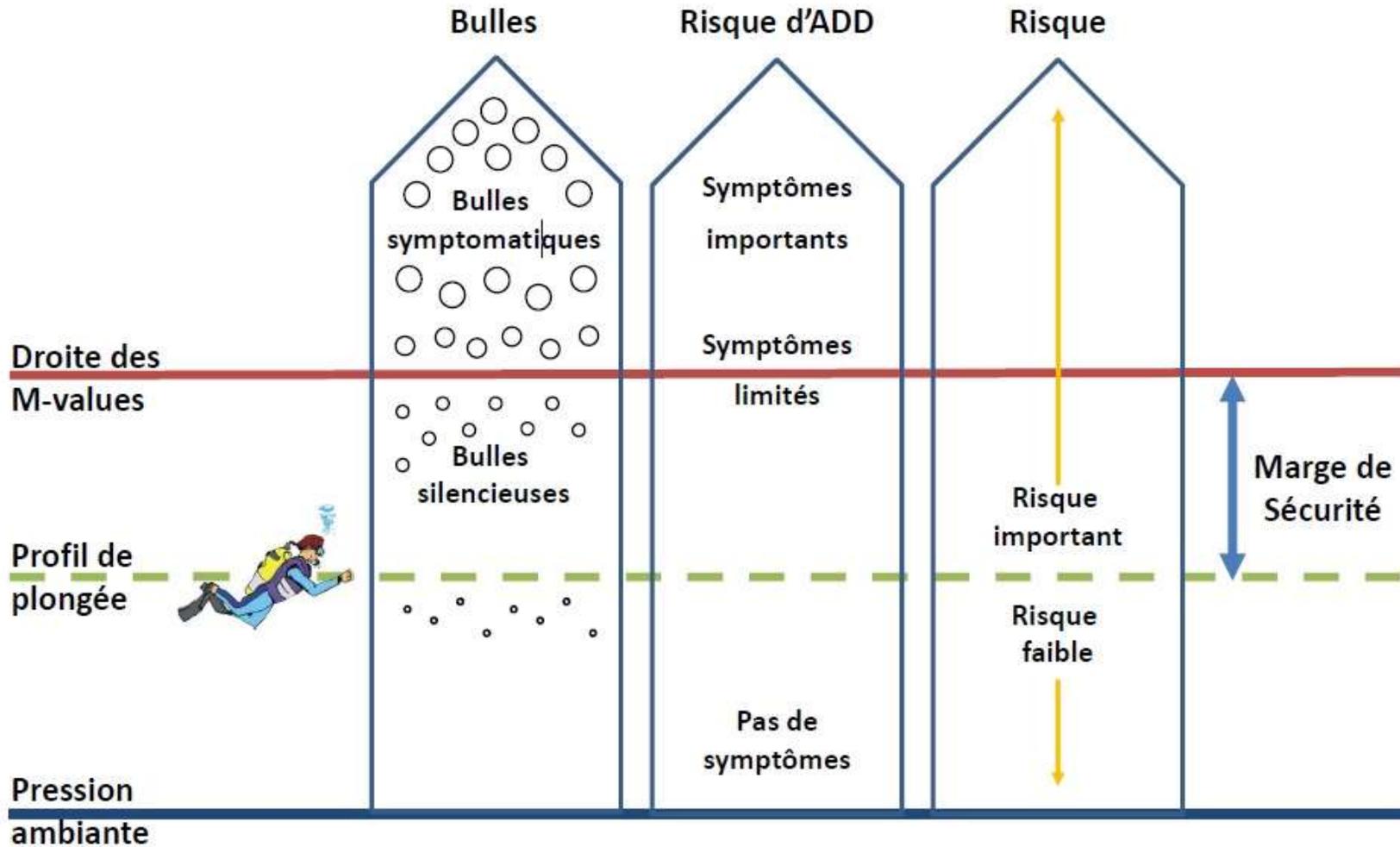
- **MODÈLE BÜHLMANN**
- **MODÈLE VPM**
- **MODÈLE RGBM**



MODÈLE BÜHLMANN

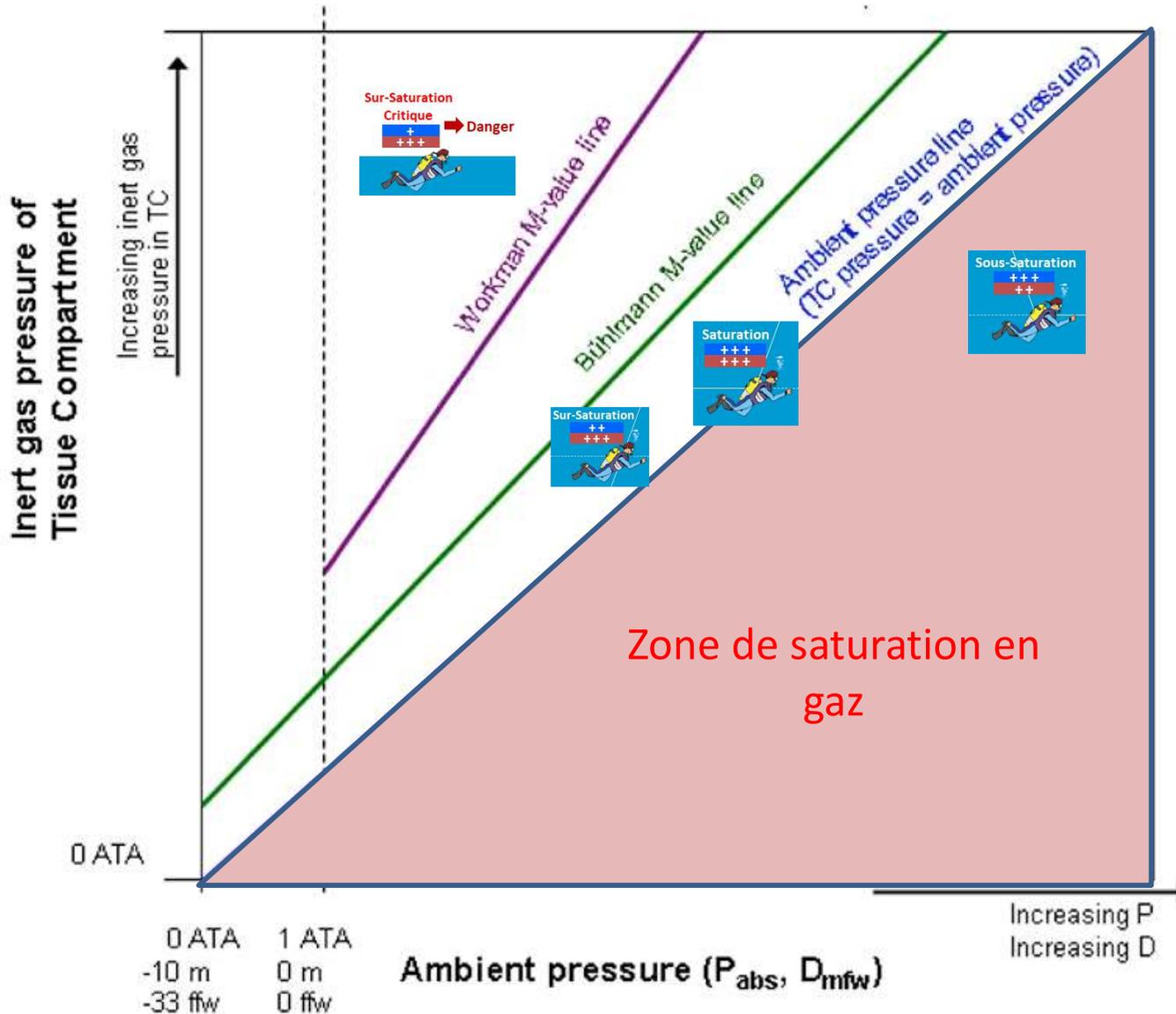
- Modèle Haldanien (évolution)
- Introduction de la notion de **M-Values** (travaux effectués par Workman menés en 1965) :
 - ✓ Le Sc dépend du compartiment et de la profondeur ($M = M_0 + \Delta M \cdot Prof$).
 - ✓ M : valeur **M**axi d'azote tolérable à la profondeur courante ($M_0 \equiv Sc$).
- Prise en compte de la notion de **Gradient Factor (GF)**
 - Notion permettant de sécuriser les M-Values et de faire varier les durées et profondeur des paliers (notamment pour les paliers profonds en cas d'utilisation d'hélium, déconseillés aujourd'hui en plongée loisir à l'air)
- Prise en compte de la composition de l'air alvéolaire (alors que le modèle de Haldane s'appuie sur l'air ambiant)
- Adoptée par les ordinateurs Tek

BÜHLMANN - M-VALUES



MODÈLE BÜHLMANN

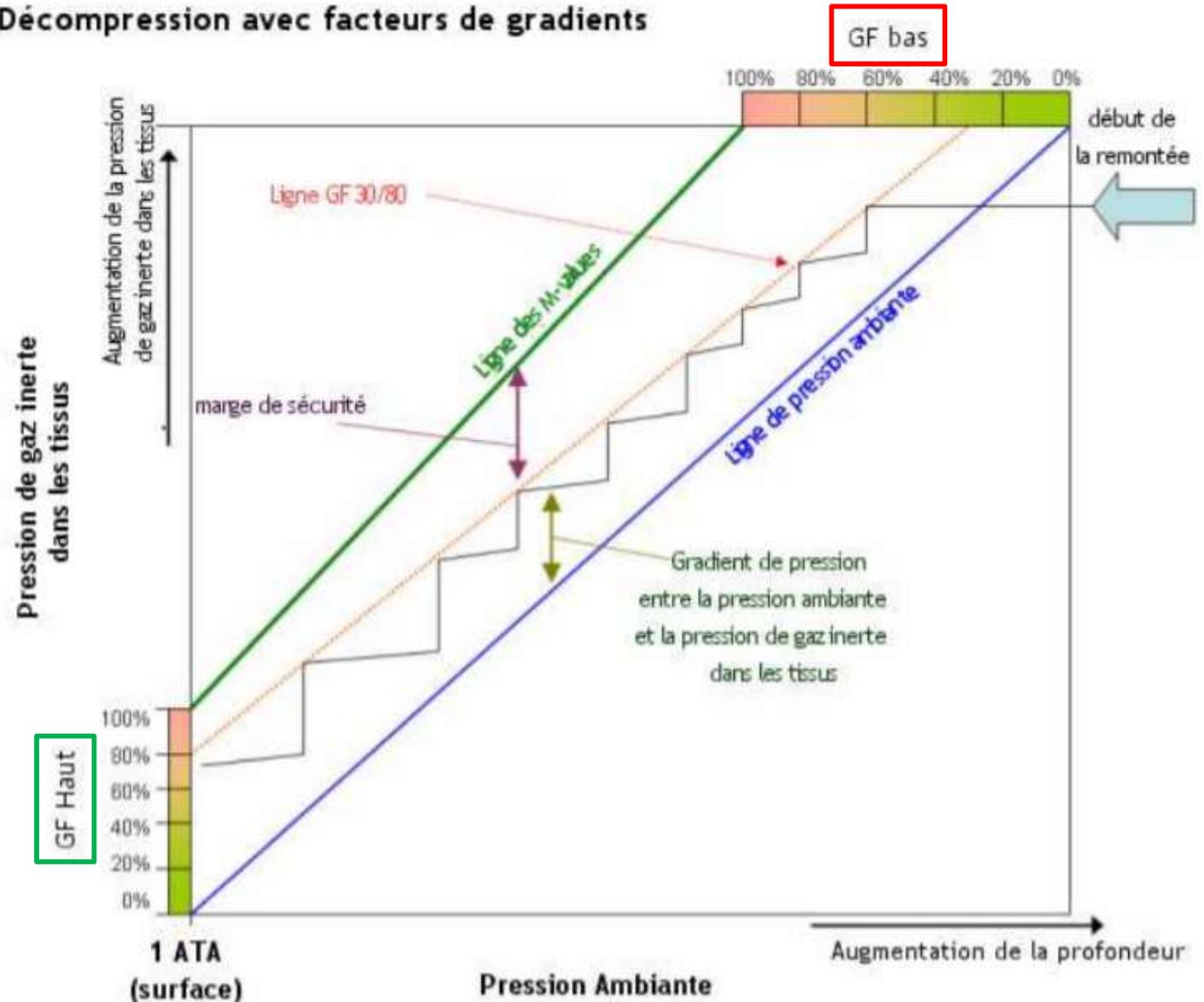
Comparison of Workman and Bühlmann M-values



BÜHLMANN : Gradient Factor (GF)

Décompression avec facteurs de gradients

- ✓ Application d'un pourcentage (%) permettant d'abaisser les M-values => Sécurisation.
- ✓ Ce pourcentage (%) varie au cours de la déco entre 2 valeurs (GF bas & GF haut).
- ✓ **GF_{bas}** fixe la profondeur du 1^{er} palier.
- ✓ **GF_{haut}** fixe la durée du dernier palier





BÜHLMANN : Gradient Factor (GF)

- **30m – 20' – CO (Circuit Ouvert) – AIR**

	100/100	90/90	80/80	50/50
DTR	4'	6'	8'	24'
Premier palier	3m 1'	3m 3'	6m 1'	9m 1'
Durée dernier palier (3m)	1'	3'	4'	14'

- **50m – 15' – CO (Circuit Ouvert) – AIR**

	100/100	90/90	85/85	80/80	70/70	50/50
DTR	16'	19'	20'	23'	31'	56'
PP	9m (1')	9m (1')	9m (1')	9m (2')	12m (1')	18m (1')
DDP 3m	7'	9'	9'	10'	14'	29'



MODÈLE VPM (MODÈLE À PERMÉABILITÉ VARIABLE)

Découlant d'un grand travail de David E. Yount, c'est une rupture avec le modèle Haldanien.

Ces critères limites de remontée ne s'appuient plus sur des ratios de sursaturation entre **la tension des compartiments et la pression ambiante**, mais sur **des volumes gazeux tolérables pour l'organisme**;

On ne nie plus l'existence des bulles, mais on les étudie, les quantifie, et on les qualifie pour prédire des profils de remontée plus proche de la physiologie humaine.

Le modèle VPM est utilisé dans quelques ordinateurs ainsi que dans le logiciel Vplanner.



MODÈLE RGBM (MODÈLE À RÉDUCTION DES BULLES)

En 1990, **Dr. Bruce Wienke** développe une adaptation du VPM qu'il nommera RGBM (Reduced Gradient Bubble Model).

On retrouve ces modèles dans les ordinateurs Suunto, Mares, Cressi, mais il semblerait qu'ils ne soient pas tout à fait affranchis des méthodes de décompression Haldanienne.

Les critères de remontée semblent être basés sur les limites traditionnelles auxquelles on a rajouté un contrôle limitatif sur le modèle à bulles.

Le RGBM n'a jamais été publié scientifiquement, et il est difficile de l'évaluer, car les bases de calculs sont brevetées.



GUIDE DE PALANQUÉE – NIVEAU 4

MERCI DE VOTRE ATTENTION