

# Modèles de décompression en plongée



# Sommaire

- Pourquoi ce cours ?
- Rappels et compléments : Loi de Henry
- Les définitions à connaître (savoir répondre au quizz !)
- Savoir retrouver et expliquer les facteurs de dissolution
- Savoir expliquer la dissolution en plongée (exple d'outils à utiliser)
- Savoir expliquer ce qu'est un modèle
- Un modèle Haldanien: les tables MN90
  - Rappel: Charge d'un compartiment
  - Critère de remontée : 2 formes de présentation et Décharge d'un compartiment
  - Palier, plongée successive...

## Pause

- Quelques questions (auxquelles vous devrez apporter une réponse)
- Autres modèles Haldanien: concept des M-values
  - Comparaison critères de remontée Bühlmann / MN90
  - Comment diminuer le risque
  - Concept des « Gradient Factor »
  - Synthèse
- Modèles non Haldanien (VPM, RGBM & autres)
- Considérations sur la vitesse de remontée et les paliers profonds

# Pourquoi ce cours ?

Un MF1 qui a la responsabilité de former des plongeurs est une « référence » et doit avoir suffisamment de connaissances pour pouvoir enseigner à **tout niveau de plongeur et au GP** les **procédures de décompression** en plongée. À ce titre, il doit :

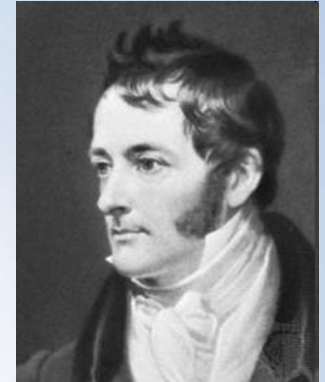
- **Maitriser les définitions des mots clés utilisés**
- **Être capable d'expliquer**
  - les principes qui ont amenés à l'élaboration et à la validation des procédures de décompression, la notion de modèle
  - les principes de différents outils de décompression
  - leurs conditions d'utilisation et leurs limites
  - leurs avantages et inconvénients
- **Être capable d'expliquer à l'aide de calculs simples** la charge et la décharge d'un compartiment, la notion de compartiment directeur, la profondeur d'un palier, le taux d'azote résiduel
- **Être capable de mettre en évidence** la différence entre une procédure dictée par un ordinateur de plongée et la réalité « physiologique » du plongeur



# Rappels et compléments : La loi de Henry

*William Henry (1775 - 1836) physicien et chimiste britannique.*

*En 1803, il énonce la loi sur la dissolution des gaz dans les liquides, appelée Loi de Henry.*



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

$$C = s \times P$$

Le rapport  $C/s$  représente la pression de gaz dissous appelée **Tension**

$\underbrace{C/s}_{\text{Tension}} = P$

**C:** concentration du gaz dans le liquide  
**P:** pression du gaz  
**s:** constante de proportionnalité

## Remarques :

- ❖ Cette loi s'applique lorsque l'état de saturation est atteint
- ❖ Cette loi ne s'applique pas en phase de charge (dissolution) pour laquelle  $T < P$  et de décharge (désaturation) pour laquelle  $T > P$

# Et la plongée ?!

- Grace à son détendeur, le plongeur respire de l'air (en général !) à pression ambiante
- L'air est un **mélange gazeux** – Composition ?



## Composition de l'air

Azote	(N <sub>2</sub> )	78,084%
Oxygène	(O <sub>2</sub> )	20,946%
Argon		0,934%
Gaz carbonique	(CO <sub>2</sub> )	0,033%
<b>Gaz rares:</b>		0,003%
néon		
hélium		
krypton		
Hydrogène		
xénon		
Radon		
Oxyde de carbone		
méthane		

## Utilisation Simplifiée :

**N<sub>2</sub>** ⇔ **80%** ou **79%**

**O<sub>2</sub>** ⇔ **20%**      **21%**

## Dissolution du mélange Air :

**N<sub>2</sub>** ⇔ gaz inerte dissous dans l'organisme

**O<sub>2</sub>** ⇔ utilisé par l'organisme  
Très peu dissous (combiné) :  
**non pris en compte**

# Loi de Henry – compléments

## Solubilité & capacité d'absorption

### A SATURATION:

$$C = s \times P$$

Le rapport  $C/s$  représente la pression de gaz dissous appelée

$$\underbrace{C/s}_{\text{Tension}} = P \Rightarrow T = P$$

**C**: concentration du gaz dans le liquide:

**P**: pression du gaz sur le liquide:

**s**: ? Pour être homogène :

nbre de molécules de gaz /  $V_{\text{Liquide}}$

nbre de molécules de gaz /  $V_{\text{Gaz}}$

$V_{\text{Gaz dissous}} / V_{\text{Liquide}}$

**s**: **solubilité gaz / liquide** à température donnée et à  $P_{\text{atm}}$

Correspond à un volume maxi de gaz que l'on peut dissoudre par unité de volume de liquide -

S'exprime sous la forme: « **un litre de Liquide peut dissoudre x mL de gaz** »

= **capacité d'absorption**  $\Rightarrow$  volume contenant (verre)

La quantité absorbée **en gaz pur** par un liquide est liée à la **pression absolue** subie par le liquide:

À **saturation** ( $TN_2 = P_{\text{abs}}$ ) : le verre est plein !

Dans un **mélange gazeux**, la quantité réellement absorbée par le liquide est limitée par la **pression partielle** du gaz. À l'**équilibre** pour l'air ( $TN_2 = PpN_2$ ) : le verre est rempli à 80%


**La taille du verre dépend de la pression subie !**



# Quelques mots clés à l'usage du plongeur

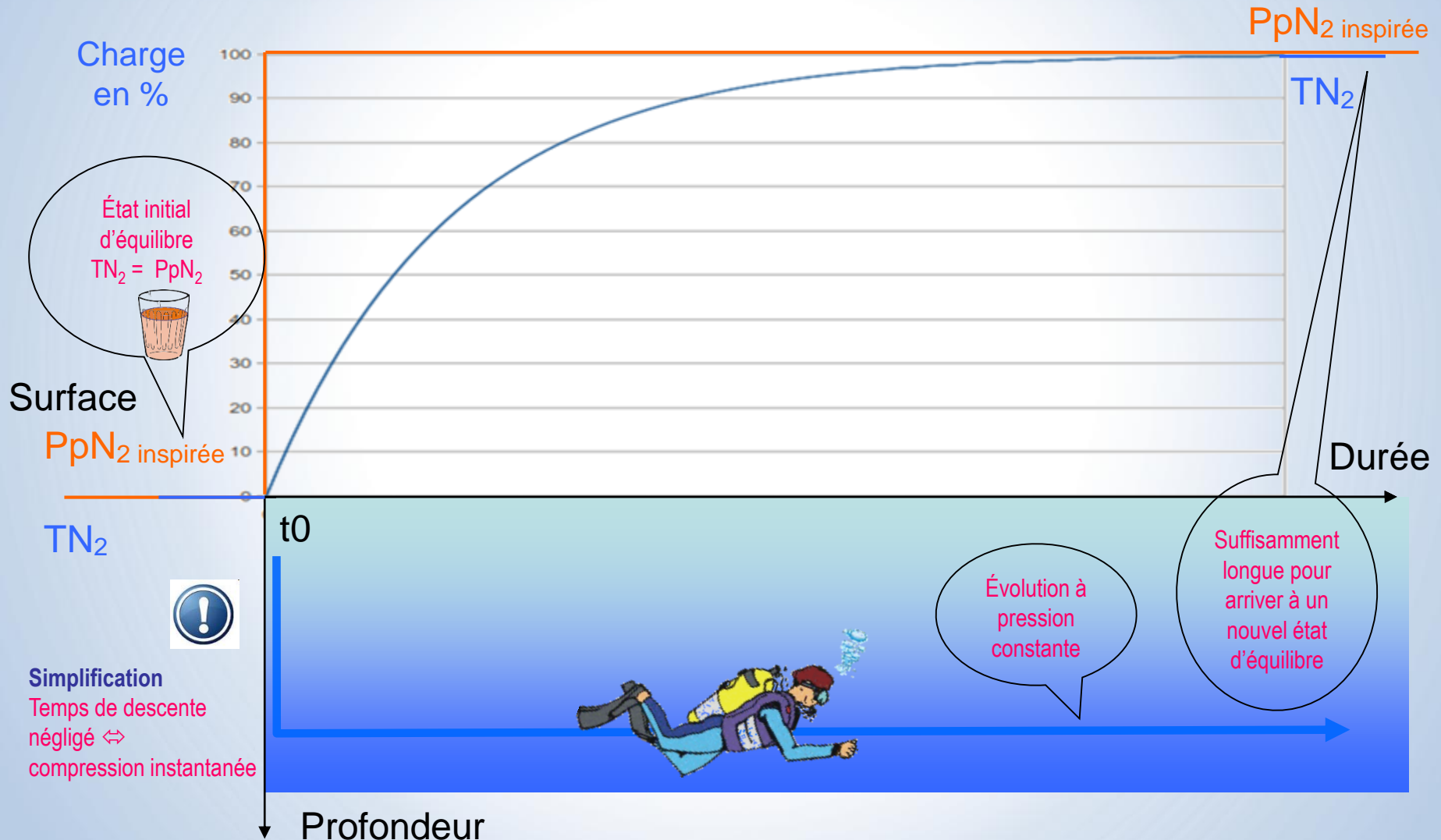
<b>Concentration</b> (d'un gaz dans un liquide)	Exprime la quantité de gaz (le nombre de molécules de gaz) par unité de volume du liquide.
<b>Pression (P)</b> (d'un gaz)	La pression qu'un gaz exerce sur une surface est due aux chocs de ses molécules sur cette surface. La pression est proportionnelle au nombre de molécules de gaz par unité de volume gazeux (exple du gonflage).
<b>Tension (T)</b>	Caractérise la « <b>pression d'un gaz dissous</b> ». Correspond à la pression qu'exercerait le gaz au-dessus du liquide  Nb de molécules de gaz dissous par Volume maxi de gaz qu'on peut dissoudre
<b>Saturation</b> (d'un liquide par un gaz)	État d'un liquide ayant dissout la <b>quantité maximale</b> de gaz possible dans des conditions déterminées de température et de pression. <b>À saturation: <math>TN_2 = P_{\text{ambiante}}</math> (loi de Henry) (verre plein)</b>
<b>Sous-saturation</b> (en gaz d'un liquide)	État obtenu par $\nearrow P_{\text{ambiante}}$ depuis la saturation $\Leftrightarrow$ phase de dissolution <b><math>TN_2 &lt; P_{\text{ambiante}}</math> (verre non plein)</b>
<b>Dissolution</b> (d'un gaz dans un liquide)	Processus par lequel un gaz mis au contact d'un liquide en sous-saturation passe à l'état de solution. $\Rightarrow$ Phase de <b>charge</b>
<b>Sur-saturation</b> (en gaz d'un liquide)	État obtenu par $\searrow P_{\text{ambiante}}$ depuis la saturation $\Leftrightarrow$ phase de désaturation <b><math>TN_2 &gt; P_{\text{ambiante}}</math> (verre déborde)</b>
<b>Désaturation</b> (en gaz d'un liquide)	Fait d'enlever des molécules de gaz à un liquide sursaturé. $\Rightarrow$ Phase de <b>décharge</b>

# D'autres mots clés pour aller plus loin...

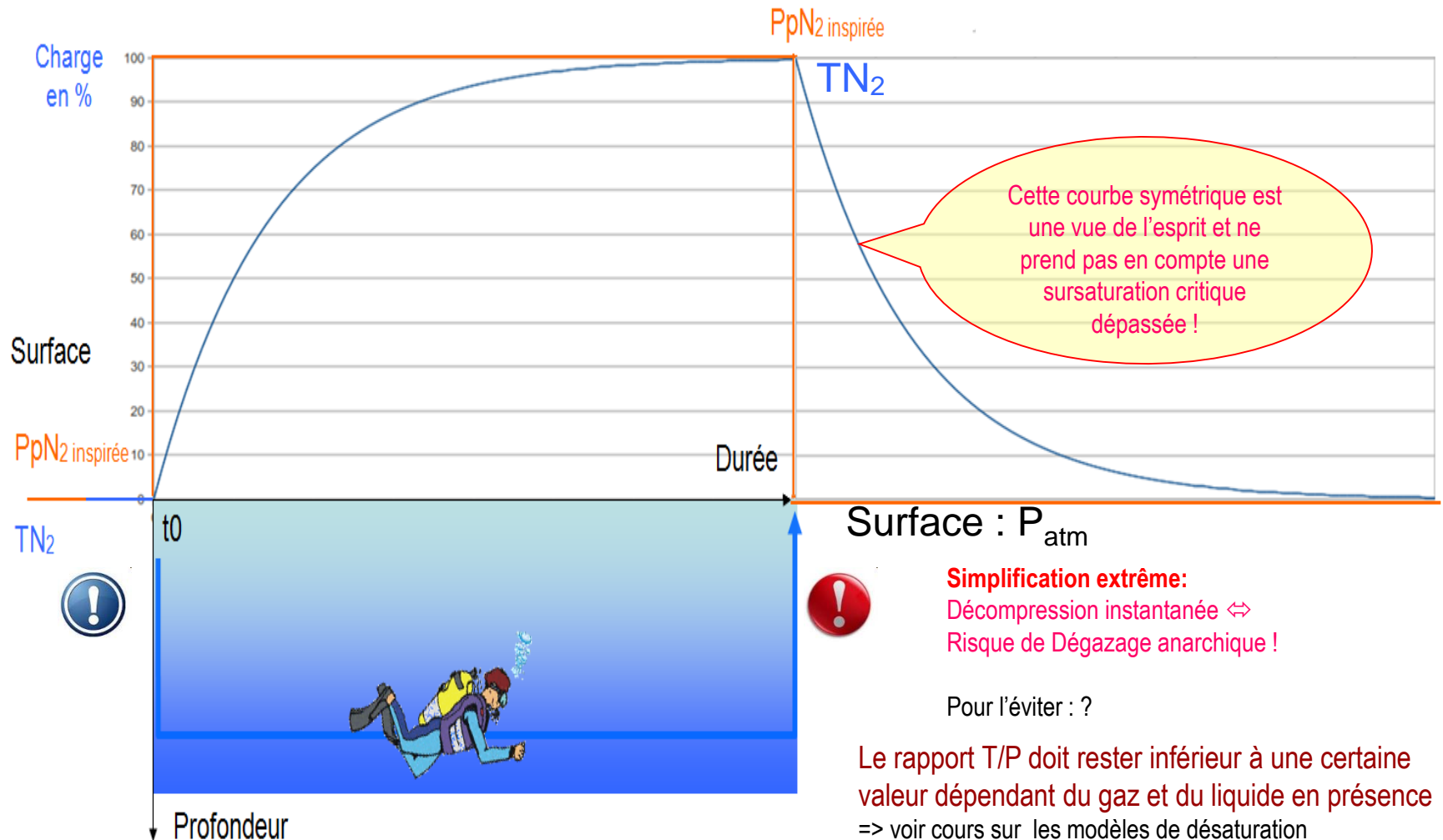
<b>Décompression</b>	Diminution de la pression $\Rightarrow$ phase de remontée d'une plongée
<b>Gradient</b> (de pression)	Défini par l'écart $P_{\text{gaz}} - T_{\text{gaz}}$ . Caractérise la « force motrice des échanges » Pour nous plongeur: <b><math>PpN_2</math> inspirée – <math>TN_2</math> actuelle</b>
<b>Diffusion</b> (d'un gaz)	Caractérise un échange par différence de pression (Gradient) jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint
<b>Vitesse de diffusion</b>	Pendant les phases de charge et de décharge, elle est <b>proportionnelle au gradient de pression</b> (importante au départ puis nulle à l'équilibre) et dépend du gaz, du liquide et des conditions du milieu.
<b>Solubilité</b> (d'un gaz dans un liquide) 	Désigne la quantité maximale de gaz qu'un liquide peut dissoudre à température & Pression données (qu'on peut appeler « <b>capacité d'absorption</b> »). Volume maxi de gaz qu'on peut dissoudre par unité de volume du liquide <b>exemples:</b> 1 litre de plasma (à 37°C, Patm) peut dissoudre 13,4 ml d'Azote 1 litre de plasma (à 37°C, Patm) peut dissoudre 8,7 ml d'Hélium 1 litre d'huile (à 37°C, Patm) peut dissoudre 67 ml d'Azote
<b>Rapport de sursaturation (S)</b>	Désigne le rapport $T_{\text{gaz}} / P_{\text{ambiante}}$ . Pour nous plongeur: $TN_2 / P_{\text{ambiante}}$ Doit être surveillé pendant la décompression <b>Doit être maintenu <math>\leq</math> valeur critique pour éviter le dégazage anarchique</b> (concerne les modèles Haldanien; les modèles à bulles n'utilisent pas ce critère)
<b>Sur-saturation critique (Sc)</b>	État correspondant à la <b>capacité limite de surstockage</b> d'un gaz dans un liquide au-delà de laquelle se produit un dégazage anarchique (selon Haldane) <b><math>TN_2 / P_{\text{ambiante}} = Sc</math></b>



# Courbe de Dissolution: mise en scène



# Courbes Dissolution + désaturation : mise en scène



# Les facteurs de dissolution appliqués au plongeur

Facteur (loi de Henry)	En plongée	La dissolution augmente si :
Température	Température corps humain (régulée à ~37°C)	La température diminue (hypothermie)
Nature du gaz	Gaz dissous = diluant = Azote (+ Hélium si trimix)	La solubilité ↗ : celle de l'azote est supérieure à celle de l'hélium (corrélation avec l'effet narcotique)
Nature du liquide	Le corps humain est composé à ~ 65% d'eau - la répartition diffère selon les organes & tissus	La solubilité ↗ : La solubilité de l'azote n'est pas identique dans tous les tissus
Pression du gaz	Profondeur	La profondeur ↗
Durée (jusqu'à saturation)	Durée d'immersion - en plongée sportive l'état de saturation totale n'est jamais atteint	Temps de plongée ↗
Surface de contact	Poumon - tissus physiologiques à travers la vascularisation	La vascularisation ↗ : La vitesse de diffusion ↗ pour les tissus mieux vascularisés
Agitation	effort : Palmage, courant...	Augmentation rythme respiratoire Débit sanguin, perfusion ↗
<i>Surligné jaune : les facteurs variables</i>		

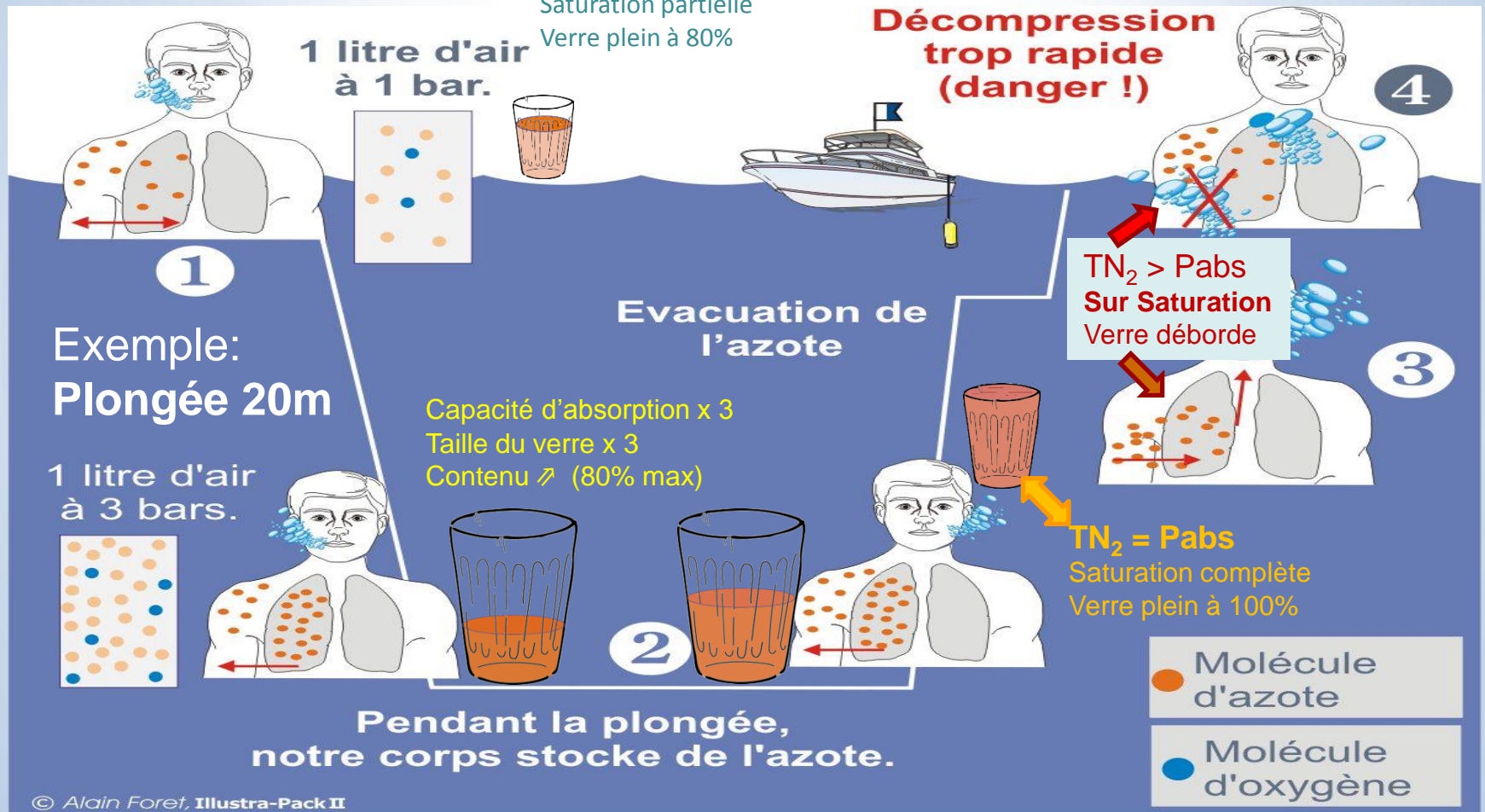
# Dissolution et plongée : 2 outils superposés

Taille verre = capacité d'absorption à  $P_{abs} = 1b$

Contenu : représente  $TN_2$  - En surface:  $TN_2 = PpN_2$

Saturation partielle

Verre plein à 80%



# Modélisation:

comment passer de la physiologie au calcul ?

Objectif: Décrire une procédure à appliquer pour éviter les accidents **MAIS** mécanismes physiologiques mal connus et trop complexes

Comment faire ?

⇒ Établir un **modèle**

- Modèle = outil simplificateur d'une réalité complexe
- Outil « mathématique » permettant la représentation et l'approche de phénomènes physiques et physiologique.
- Traduction **imparfaite** de la réalité physiologique
- Repose sur la loi de Henry

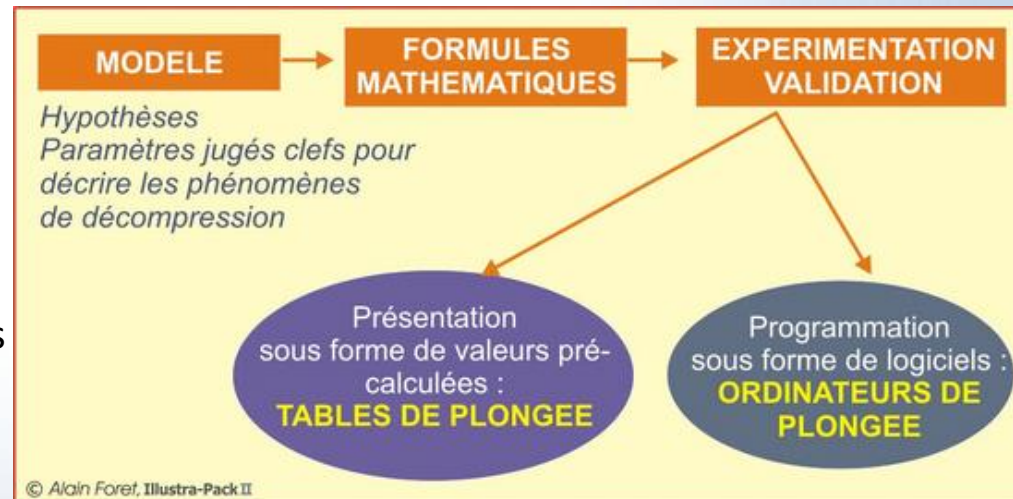
Comment valider le modèle ?

⇒ **Expérimentation !**

**risque statistique** évalué à: (A. Foret)

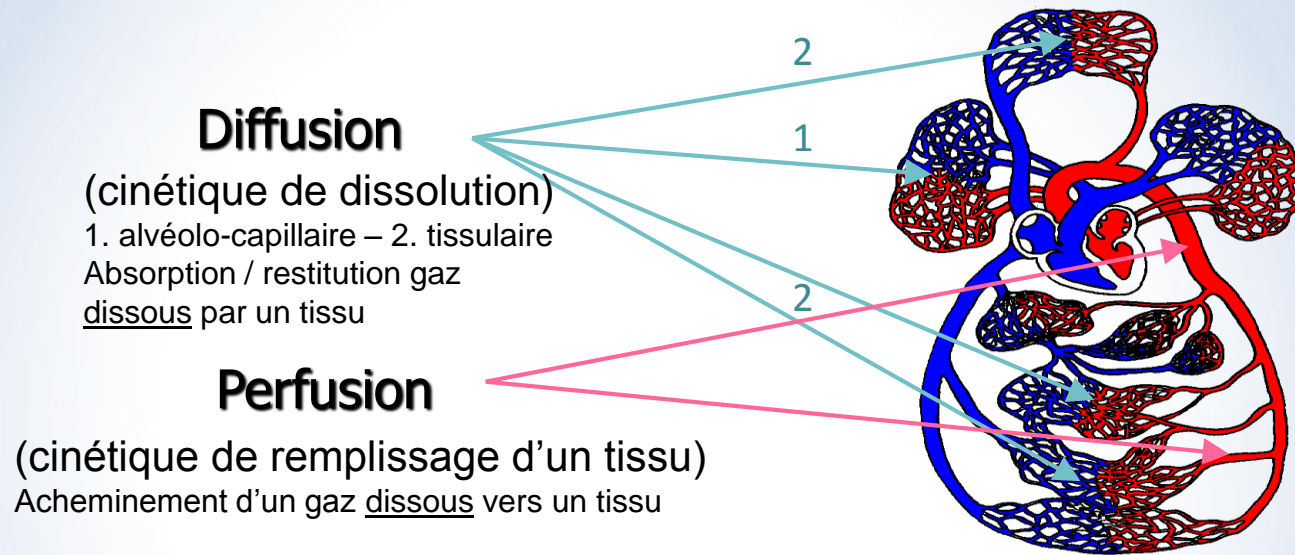
GERs 65: 3 accidents pour 10000 plongées

MN90: 1 accident pour 10000 plongées





# Les modèles de décompression



## 3 grandes familles:

- Modèle à Perfusion: durée d'acheminement prépondérante  $\Rightarrow$  modèles Haldanien
- Modèle à Diffusion: durée de diffusion prépondérante  
(aucune bulle n'est prise en compte dans la modélisation)
- Modèle à Microbulles: prise en compte des microbulles

# L'évolution vers les tables MN90

Tables Haldane (1908)  $\Rightarrow$  tables US Navy (1930):

- ajout C120 pour plongée successive
- 1 Sc par compartiment

**France** (Marine Nationale): tables US Navy traduites en système métrique: tables GRS (1948)  $\Rightarrow$  tables GERS 1959 (3 compartiments – 15 m/mn) puis GERS 1965 (4 compartiments – 20 m/mn)  $\Rightarrow$

**Tables actuelles MN90** : La FFESSM impose leur utilisation pour les examens théoriques

Compartiment	C5	C7	C10	C15	C20	C30	C40	C50	C60	C80	C100	C120
Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
Sc	2,72	2,54	2,38	2,2	2,04	1,82	1,68	1,61	1,58	1,56	1,55	1,54

- 12 compartiments (+ C240 pour inhalation O<sub>2</sub>)
- Chaque compartiment possède un Sc propre
- **Chaque Sc est fixe** (quelle que soit la profondeur)

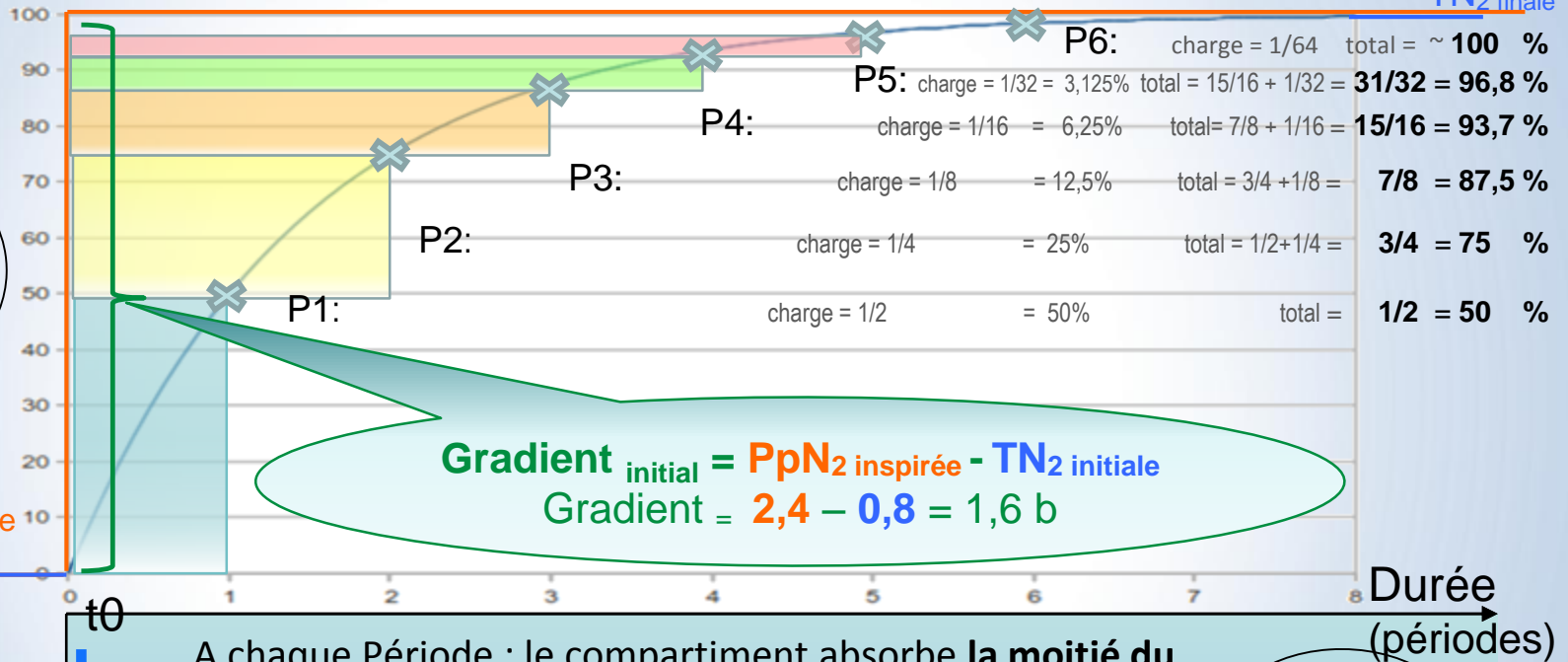


# Charge d'un compartiment

Charge  
en %

Exemple: à 20 m:  $PpN_2 \text{ inspirée} = P_{\text{abs}} \times 0,8 = 3 \times 0,8 = 2,4 \text{ b}$

$TN_2 \text{ finale}$



État initial  
d'équilibre  
 $TN_2 \text{ initiale} =$   
 $PpN_2 = 1 \times 0,8$   
 $= 0,8 \text{ b}$

Surface (1bar)

$PpN_2 \text{ inspirée}$

$TN_2 \text{ initiale}$

Gradient initial =  $PpN_2 \text{ inspirée} - TN_2 \text{ initiale}$   
Gradient =  $2,4 - 0,8 = 1,6 \text{ b}$

A chaque Période : le compartiment absorbe la moitié du gaz qui lui manque pour atteindre l'équilibre

Évolution à  
pression  
constante

Simplification

Temps de descente  
négligé  $\Leftrightarrow$   
compression instantanée

Exemple : Profondeur = 20 m



# Calcul de la charge

## Méthode à Gradient constant

1. Calcul du gradient initial:
2. Détermination du taux de saturation en fonction du nombre de période:

$$G_{\text{initial}} = \text{PpN}_2 \text{ inspirée} - \text{TN}_2 \text{ initiale}$$

La durée sera toujours un nombre entier de période

Durée (en nombre de période)	Taux de saturation <b>Ts</b>		
	en nombre	En fraction	(en %)
1	0,5	1/2	50%
2	0,75	3/4	75%
3	0,875	7/8	87,50%
4	0,9375	15/16	93,75%
5	0,96875	31/32	96,875%
6	1		100%

Il faut savoir retrouver les valeurs de ce tableau!

3. 
$$\text{TN}_2 \text{ cherchée} = \text{TN}_2 \text{ initiale} + G \times \text{Ts}$$

**Exemple : Calculez la  $\text{TN}_2$  d'un compartiment immergé qui « respire » de l'air à 20 m pendant 3 périodes**

$$\begin{aligned}
 \text{PpN}_2 \text{ inspirée} &= 3 \times 0,8 = 2,4 \text{ b} \\
 \text{TN}_2 \text{ initiale} &= 1 \times 0,8 = 0,8 \text{ b} \\
 \text{Gradient initial} &= 2,4 - 0,8 = 1,6 \text{ b} \\
 \text{TN}_2 \text{ cherchée} &= 0,8 + 1,6 \times 0,875 = 2,2 \text{ b}
 \end{aligned}$$

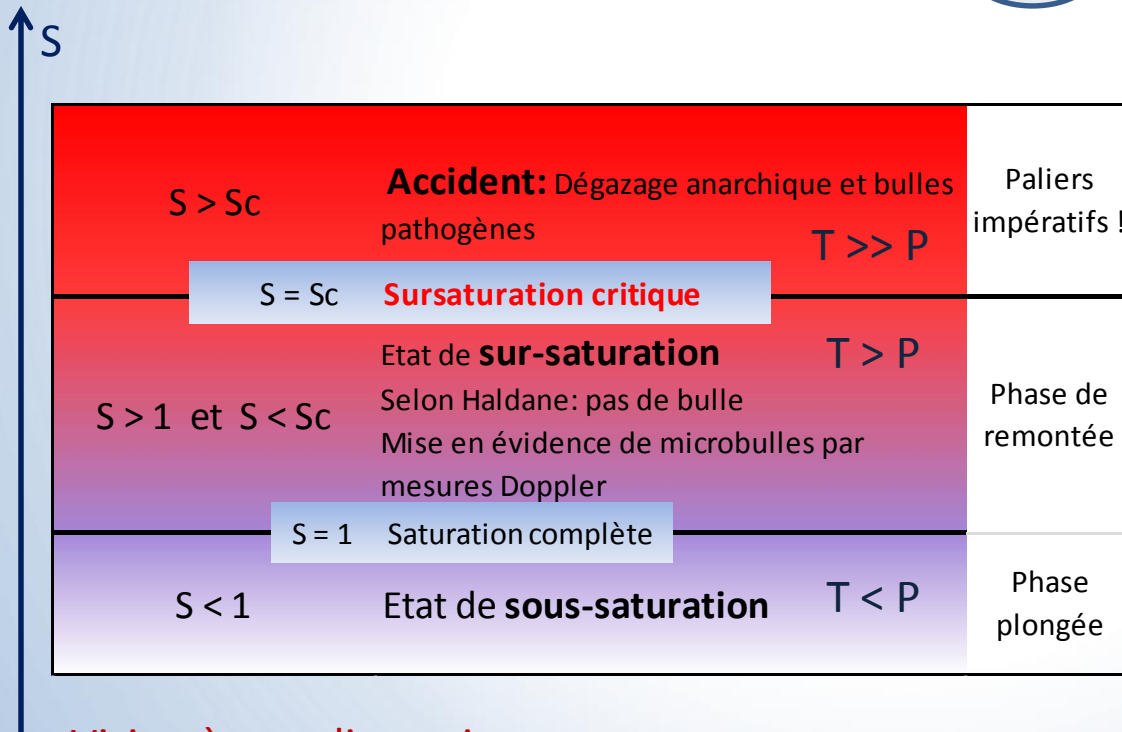
(la valeur trouvée est bien comprise entre 0,8 et 2,4 b)

# Critère de remontée

MN90 coefficient de sursaturation critique

## Le compartiment peut-il remonter en surface?

Examen du rapport de sursaturation  $S = TN_2 / P_{abs}$



Vision à une dimension

Suite de l'exemple :

Après 3 périodes à 20 m,  $TN_2 = 2,2$  b

Calcul de la sursaturation:

$$S = TN_2 / P_{abs} = ?$$

$$S = 2,2 / 1 = 2,2 \text{ b}$$

Pour pouvoir remonter en surface il faut

$$S \leq S_c$$

$$TN_2 / P_{abs} \leq S_c$$

Selon [tableau](#) quels sont les compartiments qui peuvent remonter directement en surface?

C5, C7, C10, C15

Pour les autres : Palier impératif car

$$S > S_c$$

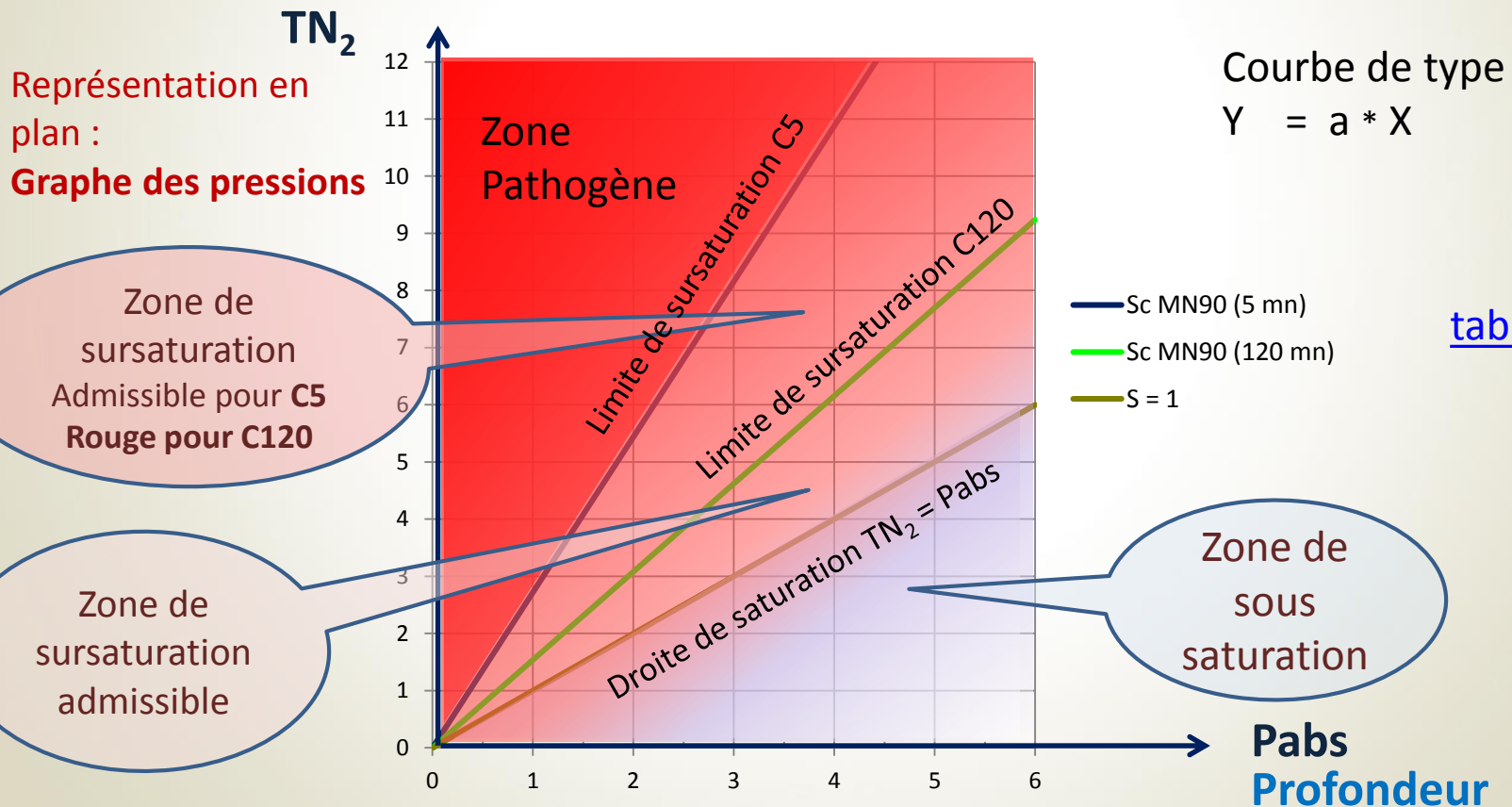


# Critère de remontée

MN90 coefficient de sursaturation critique

Le compartiment peut-il remonter en surface?

Examen du rapport de sursaturation  $S = TN_2 / Pabs \Rightarrow TN_2 = S * Pabs$

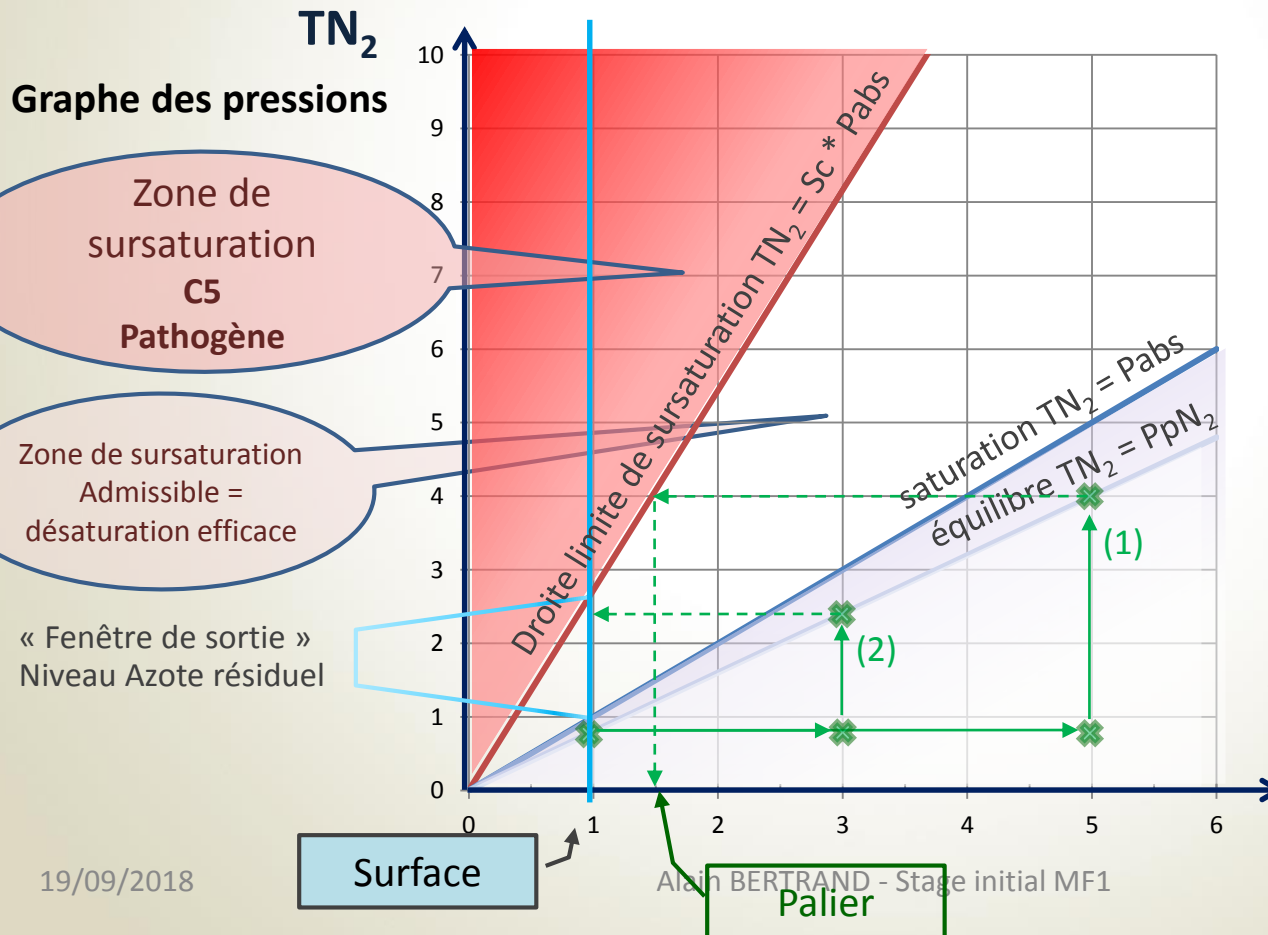


# Critère de remontée

MN90 coefficient de sursaturation critique

Le compartiment peut-il remonter en surface?

Sursaturation maximale :  $Sc = TN_2 / P_{abs} \Rightarrow TN_2 = Sc * P_{abs}$



Exemple :

Compartiment	C5
Période	5
Sc	2,72

— Sc MN90 (5 mn)

— S = 1 TN2=Pabs

— TN2=PpN2



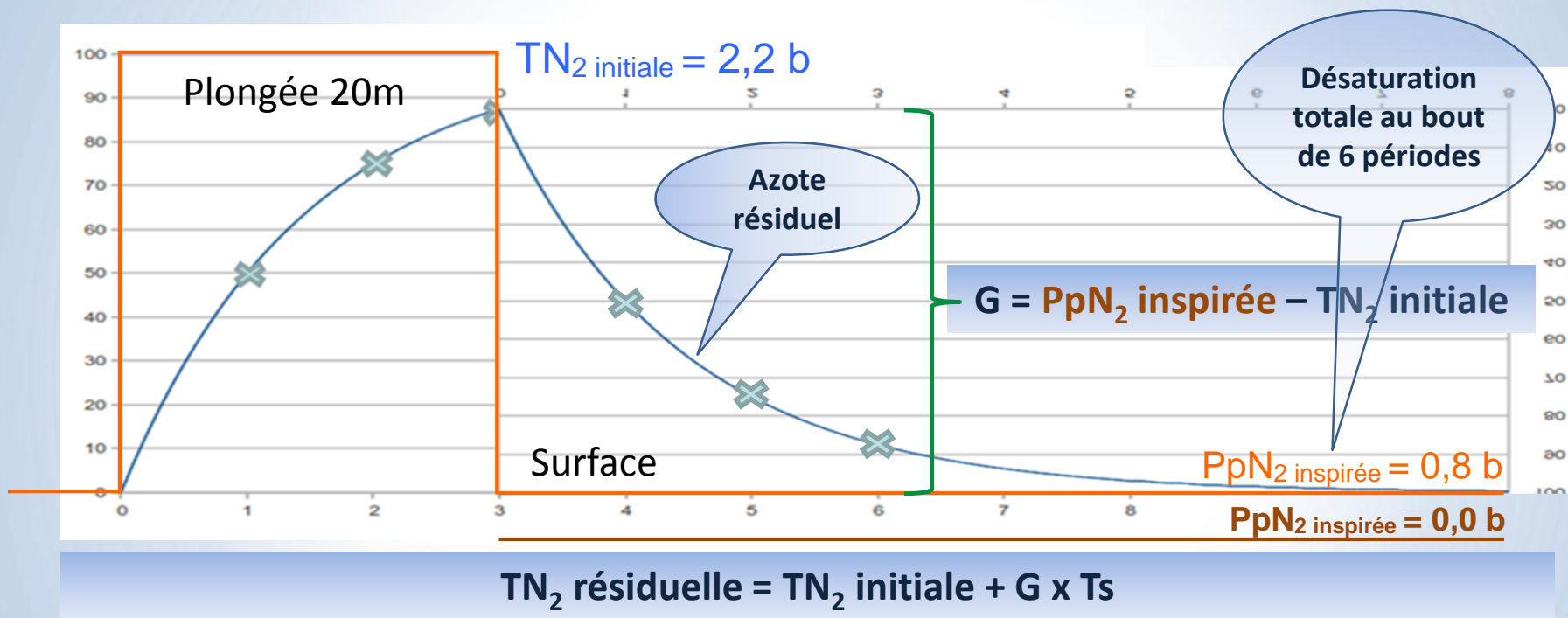
Exples: C5 immergé à l'air pendant 30 mn

1. À 40 m
2. À 20 m

**Pabs**  
**Profondeur**

# Décharge d'un compartiment

## loi de désaturation



**Exemple suite : calculer la  $TN_2$  résiduelle d'un compartiment 3 périodes après sa remontée**

$PpN_2 \text{ inspirée (en surface)} = 1 \times 0,8 = 0,8 \text{ b}$   
 $TN_2 \text{ initiale} = 2,2 \text{ b}$   
 $\text{Gradient} = 0,8 - 2,2 = -1,4 \text{ b}$   
 **$TN_2 \text{ cherchée} = 2,2 - 1,4 \times 0,875 = 0,975 \text{ b}$**

**Exemple suite : et si le compartiment « respire » de l' $O_2$  pur ?**

$PpN_2 \text{ inspirée (en surface)} = 1 \times 0,0 = 0,0 \text{ b}$   
 $TN_2 \text{ initiale} = 2,2 \text{ b}$   
 $\text{Gradient} = 0,0 - 2,2 = -2,2 \text{ b}$   
 **$TN_2 \text{ cherchée} = 2,2 - 2,2 \times 0,875 = 0,275 \text{ b}$**   
**Dénitrogénéation améliorée !!**

# Palier de décompression

- **Palier obligatoire si  $S > S_c$**

Exemple suite :

le compartiment **C20** est immergé et « respire » de l'air à 20 m pendant 3 périodes (60 mn)

Résultat précédemment trouvé : **TN2 cherchée = 2,2 b**

$$S = TN_2 / P_{abs} = 2,2 / 1 = 2,2$$

Selon [tableau](#) ,  $S_c$  pour C20 ?

**$S_c = 2,04$**  donc palier obligatoire pour C20 car  $S > S_c$

- **Profondeur du Palier** : quelle est la pression qui permet de respecter le  $S_c$  ?  
(remontée le + haut possible)

$TN_2 / P_{abs} = S_c$  donc

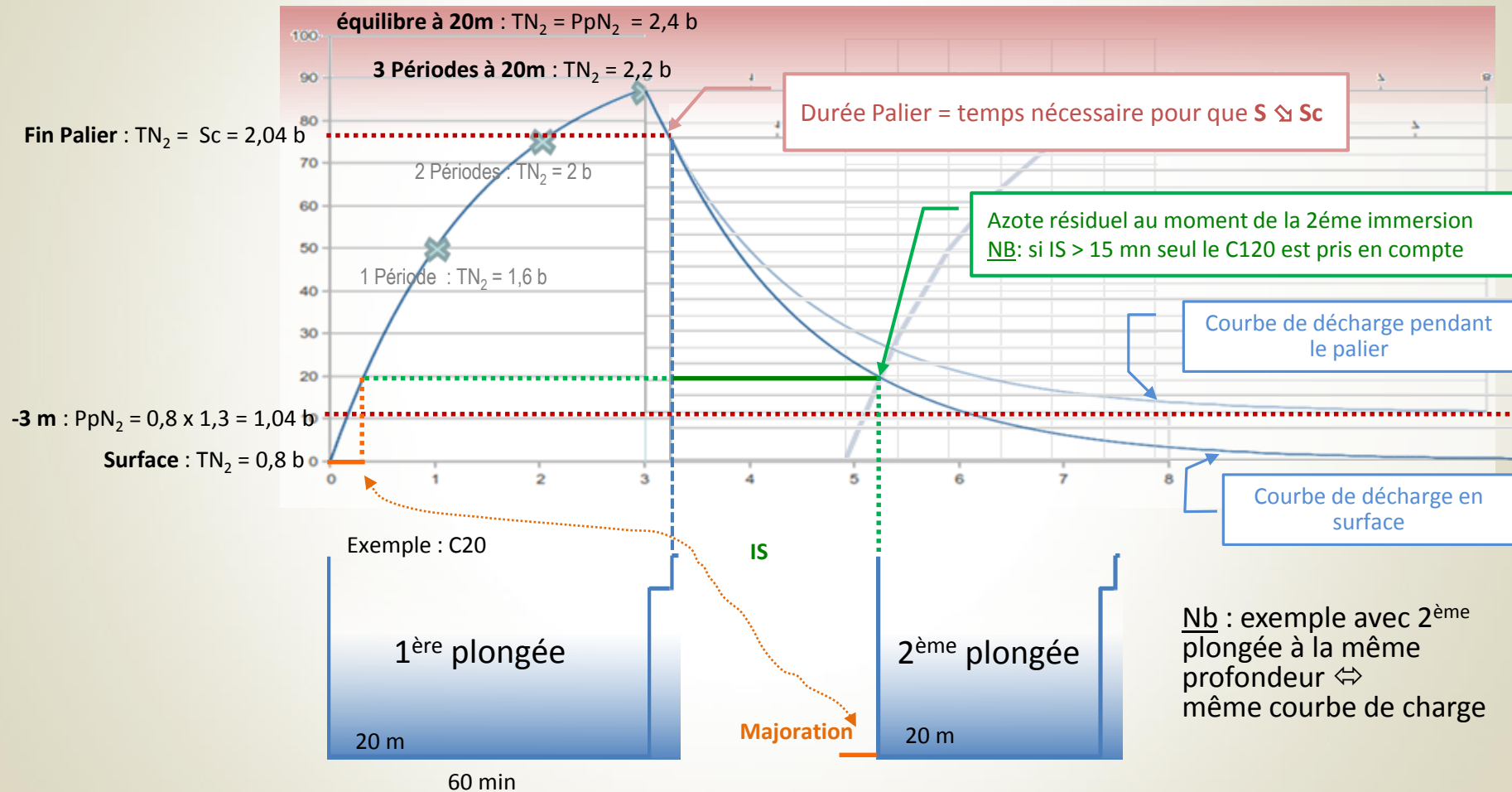
$$P_{abs} = TN_2 / S_c$$

$$P_{abs} = 2,2 / 2,04 = \mathbf{1,078 \text{ b}}$$
 soit ~ 0,8 m donc palier à 3 m

- **Et la durée du palier ?** Voir principe ci-dessous  
(calcul de la durée: voir Pour aller + loin)

# Principe: palier & plongée successive

## suite exemple C20 (palier -3m)





# Questions appelant vos réponses

- Quels sont les modèles utilisés dans les ordinateurs de plongée ?
- À quoi correspondent les « M Values » ?
- Que veut dire « ZHL16 C » ?
- À quoi correspond la fenêtre oxygène ?
- À quoi correspond un facteur personnel de prudence ou un facteur de sécurité ?
- Quelle différence entre RGBM et Bühlmann ?
- À quoi servent les facteurs de gradient ?
- Qu'est-ce qu'un palier profond ?
- ...

# Autres modèles Haldanien: concept des M-values

- **M-value** = limite de sursaturation tolérée par un compartiment

Développé d'abord par **Workman** (~1965):

- relation linéaire entre  $P_{\text{ambiante}}$  et Tension gaz inerte ( $N_2$  et Hélium) tolérée dans chaque compartiment
- fonction des périodes des compartiments **ET de la profondeur**
- **M-values** = Paire de coefficient (a, b) définissant une droite limite de sursaturation  
 $TN_2 = a * P_{\text{abs}} + b$  pour chaque compartiment (a = pente, b = décalage à l'origine)

Améliorations **Bühlmann** (ZH-L12 en 1983 puis ZH-L16 en 1990...):

- adaptation pour les plongées en altitude: prise en compte du **gaz alvéolaire** (vapeur d'eau et  $CO_2$ )

=> Utilisé par ~ 50% des ordinateurs du marché  
16 compartiments dont le plus long est 635 mn !

# Échanges gazeux: rappels & compléments

Composition de l'air (sec) :		mm Hg	bar
O <sub>2</sub>	20,93%	159	0,21
CO <sub>2</sub>	0,03%	0	0,00
N <sub>2</sub>	79,03%	601	0,79
Vapeur d'eau	0,00%	0	0

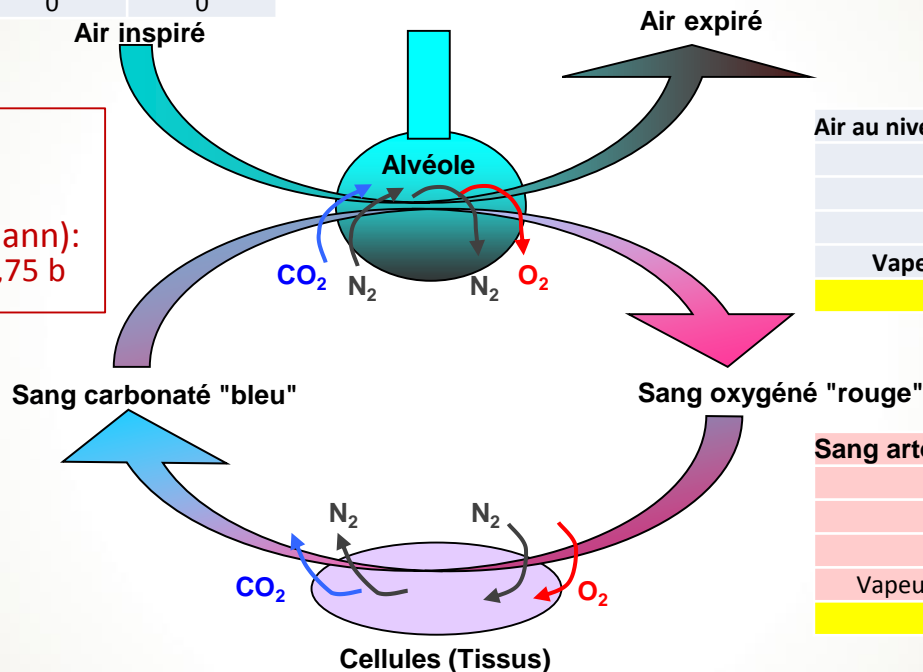
Calcul  $P_{pN_2}$  classique:

$$P_{pN_2} = 0,8 \times 1 = 0,8 \text{ b}$$

**$P_{pN_2}$  alvéolaire (Bühlmann):**

$$(1,013 - 0,063) \times 0,79 = 0,75 \text{ b}$$

Sang veineux	mm Hg
O <sub>2</sub>	44
CO <sub>2</sub>	45
N <sub>2</sub>	570
Vapeur d'eau	47
<b>Total</b>	<b>706</b>



Air au niveau Alvéolaire :		mm Hg	bar
O <sub>2</sub>	13,55%	103	0,14
CO <sub>2</sub>	5,26%	40	0,05
N <sub>2</sub>	75,00%	570	<b>0,75</b>
Vapeur d'eau	6,18%	47	0,063
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>760</b>	<b>1</b>

Sang artériel	mm Hg
O <sub>2</sub>	95
CO <sub>2</sub>	40
N <sub>2</sub>	570
Vapeur d'eau	47
<b>Total</b>	<b>752</b>

La sous saturation du sang veineux de 54 mmHg (760 – 706) représente la pression partielle vacante appelée « **fenêtre oxygène** »

La respiration d'O<sub>2</sub> pur en surface, à -3m, à -6m augmente significativement la fenêtre oxygène et favorise la désaturation

# Critères de remontée

## MN90 - Bühlmann

Table Bühlmann : ZH L 16 C  
M Values = Coeff a & Coeff b

ZH = Zurich L = limite  
16 = 16 couples de M Values  
C = variante C prise en compte (Coeff a) pour ordi

Cpt N°	1	1b	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Période mn	4	5	8	12,5	18,5	27	38,3	54,3	77	109	146	187	239	305	390	498	635
B Coeff a	1,26	1,17	1	0,862	0,756	0,667	0,593	0,528	0,471	0,419	0,38	0,35	0,322	0,297	0,274	0,252	0,233
C Coeff a	1,26	1,17	1	0,862	0,756	0,667	0,56	0,495	0,45	0,419	0,38	0,35	0,322	0,285	0,274	0,252	0,233
Coeff b	0,505	0,558	0,651	0,722	0,783	0,813	0,843	0,869	0,891	0,909	0,922	0,932	0,94	0,948	0,954	0,96	0,965

Cpt N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Période mn	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
Sc	2,72	2,54	2,38	2,2	2,04	1,82	1,68	1,61	1,58	1,56	1,55	1,54

Table MN90 : Sc

1 point commun: le C5 !

Pour **Pabs = 1 bar**: Limite de sursaturation admissible ?

$$Y = a * X + b$$

$$TN_2 = a * Pabs + b$$

**Bühlmann:**

$$a = 1/\text{Coeff b} = 1/0,558 = 1,79$$

$$b = \text{Coeff a} = 1,17$$

$$TN_2 = 1,79 * 1 + 1,17 \quad \mathbf{TN_2 = 2,96 \text{ bar}}$$

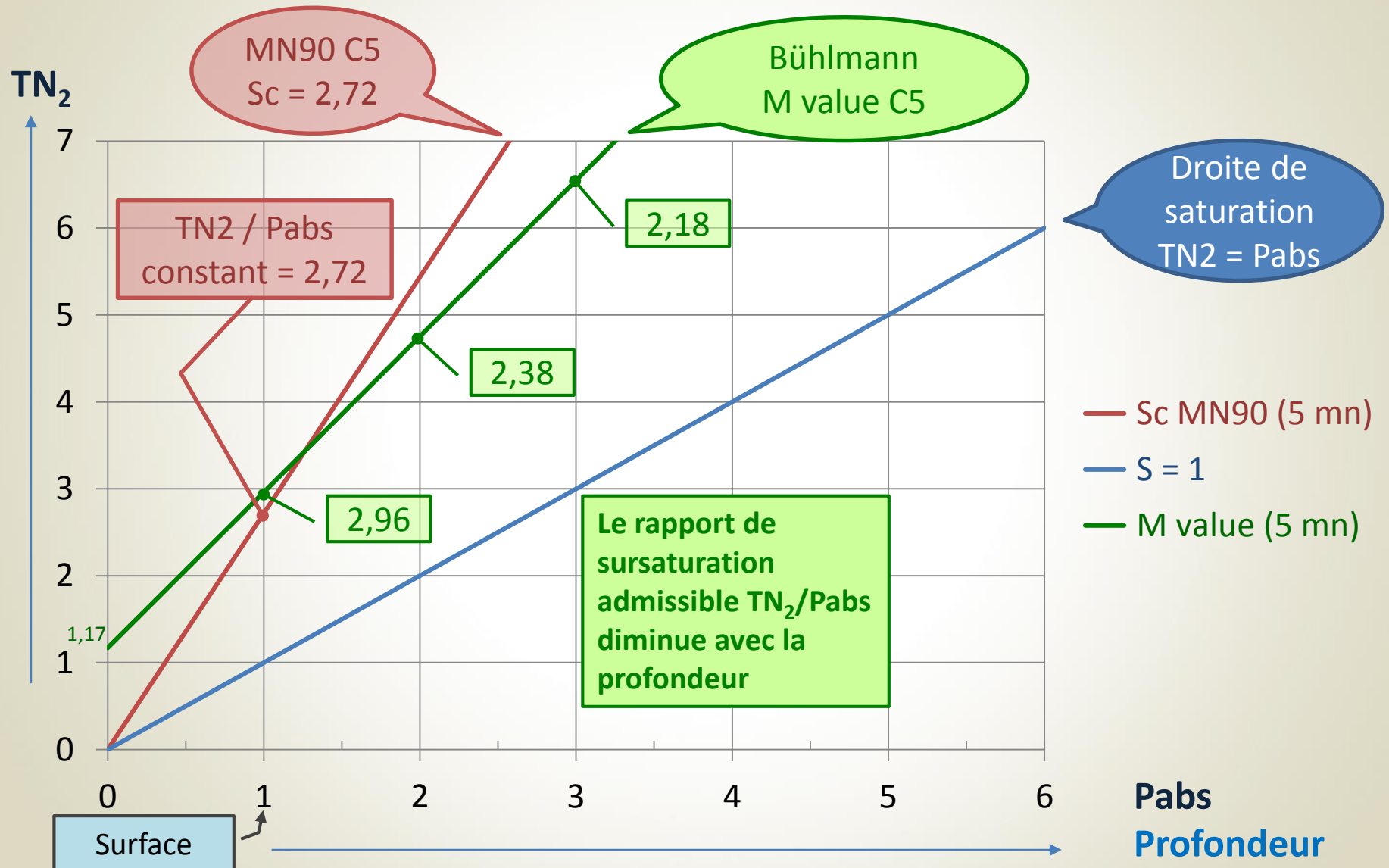
**MN90:**

$$a = Sc = 2,72$$

$$b = 0$$

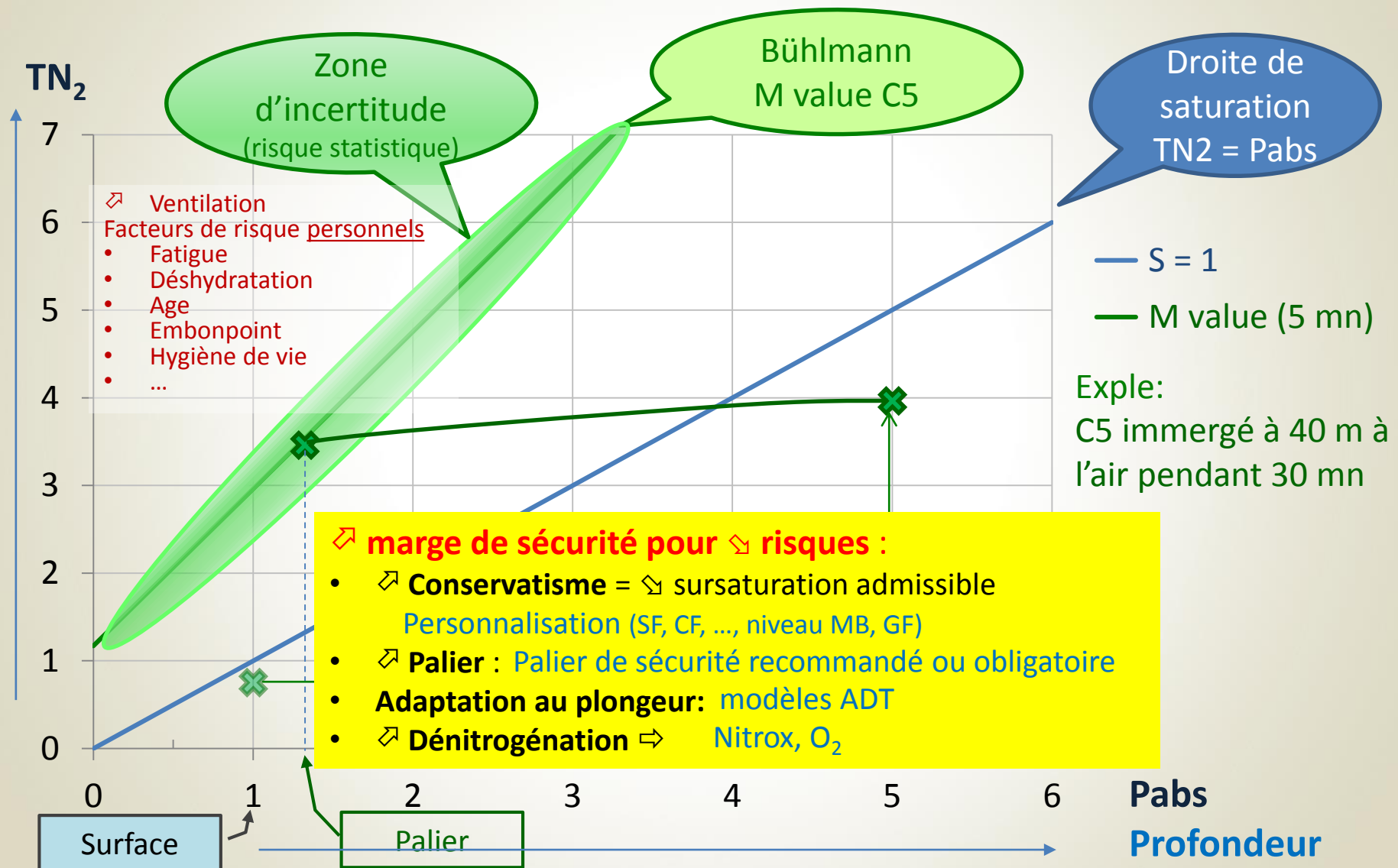
$$TN_2 = 2,72 * 1 + 0 \quad \mathbf{TN_2 = 2,72 \text{ bar}}$$

# Concept des M-values (suite)

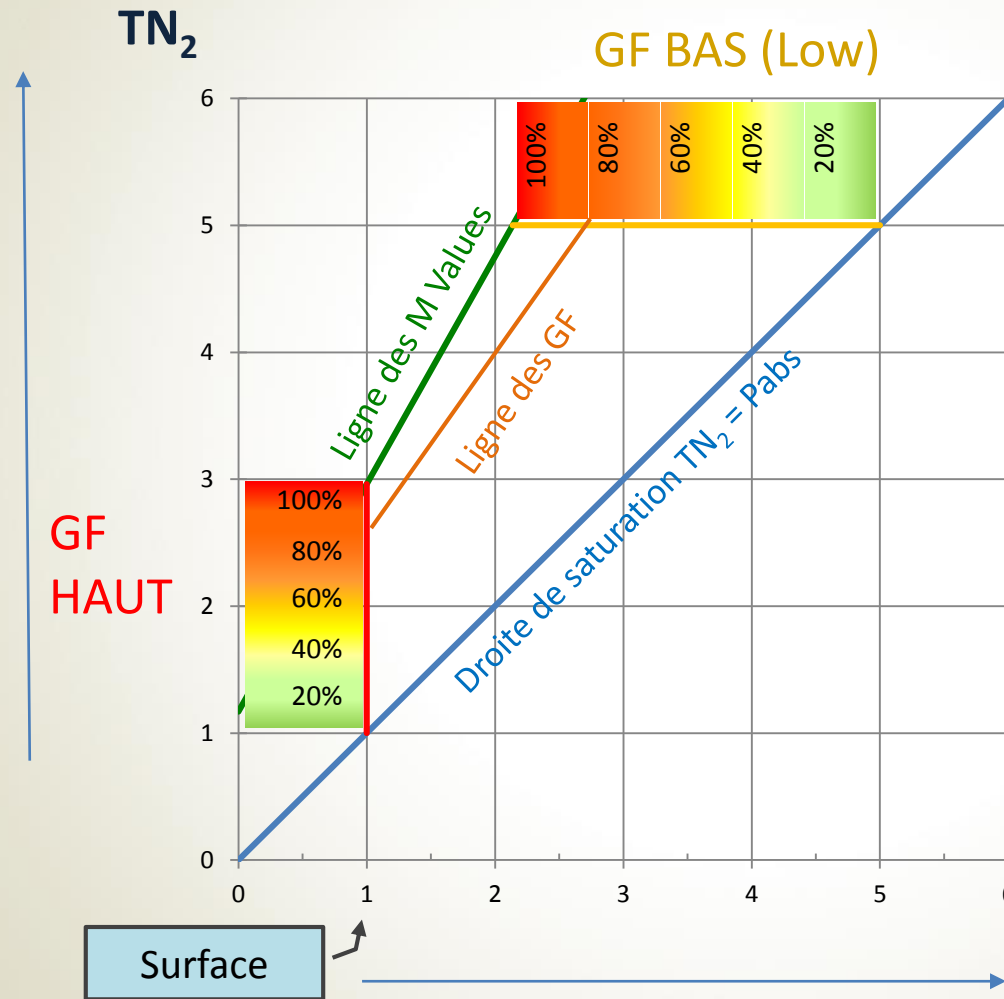




# Diminution du risque : principe



# Concept des « Gradient Factor »



Réglage 1  
GFL = 80%  
GFH = 80%

/ modèle Bühlmann initial :

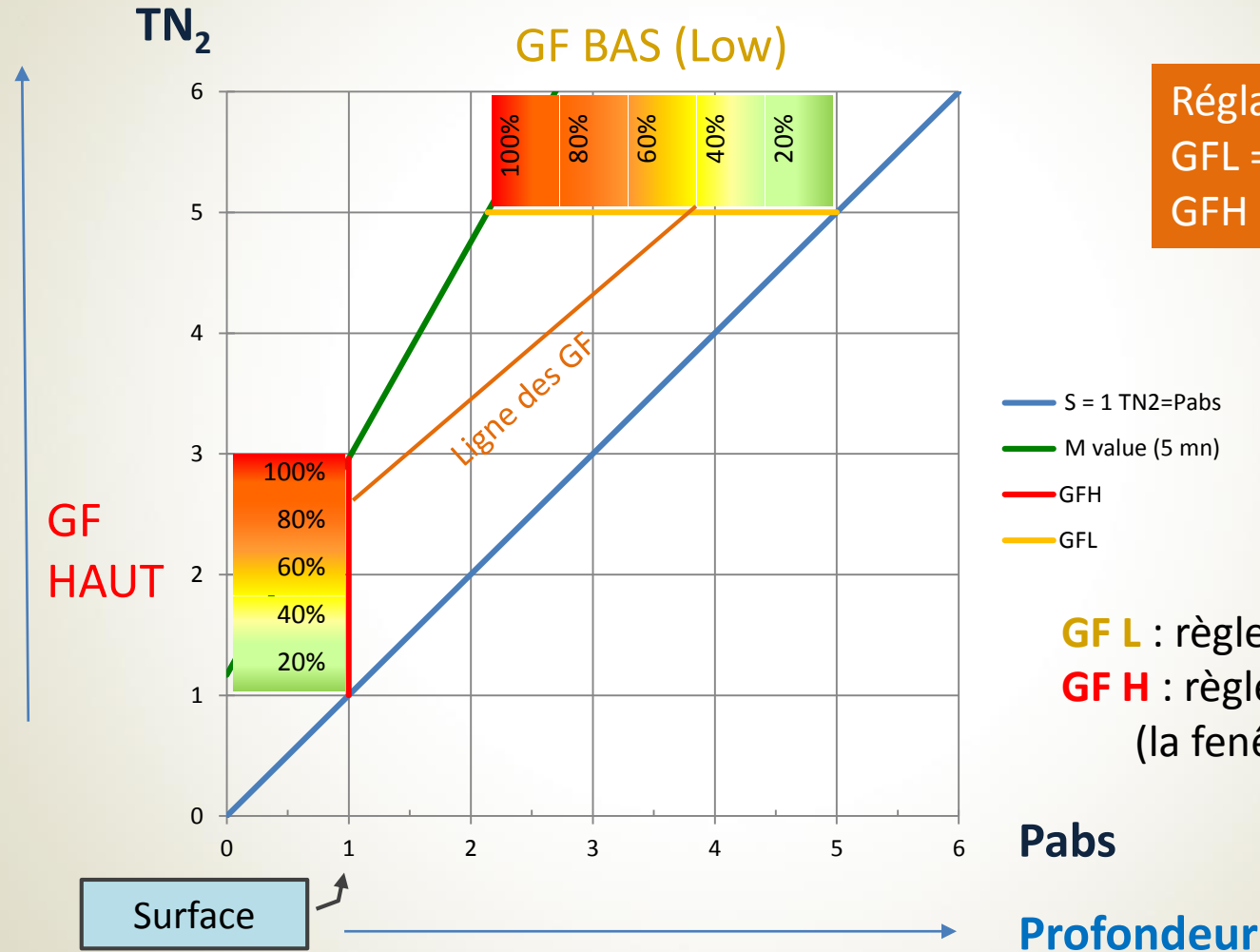
Durée Palier ↗

Profondeur Palier ↗

**Pabs**

**Profondeur**

# Concept des « Gradient Factor »



# Caractéristiques des modèles (néo) Haldanien

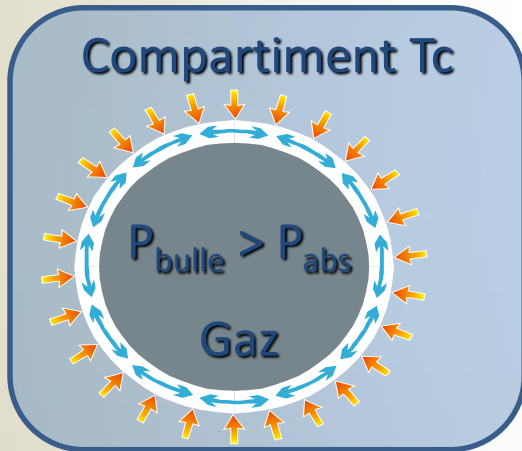
- Air respiré sous pression  $\Rightarrow$  dissolution  $N_2$  dans nombre fini de compartiments qui représentent le plongeur (12 pour MN90, 16 pour Bühlmann )
- Échanges alvéole/sang et sang/compartiment instantanés
- Compartiment défini par:
  - Sa **période** définissant la vitesse de charge / décharge: Plus les compartiments sont irrigués (modèle à perfusion), plus l'équilibre des pressions est réalisé rapidement (période courte = taux de perfusion élevé)
  - Un **Critère de remontée** : coefficient ou **limite de sursaturation admissible** – on remonte tant que la limite n'est pas atteinte: les paliers lorsqu'ils sont nécessaires sont réalisés proches de la surface
- Pour chaque compartiment:
  - Répartition homogène du gaz dissous
  - Pas d'échanges entre les compartiments
  - Charge et décharge sont symétriques (même vitesse)
  - Bonne désaturation = désaturation **sans bulles**  $\Rightarrow$  **bulles = accident**

# Modèles non Haldanien

- **Concept de HEMPLEMAN (1952): modèle par Diffusion**  
Approche mono tissulaire (cartilages) - élimination du gaz une fois et demi plus lente que l'absorption
- **Modèle de Spencer (1970): présence de microbulles « silencieuses » détectées par Doppler en corrélation avec l'apparition des bends – résultats voisins à HEMPLEMAN**
- **Modèle « E-L » de Thalmann (1984): absorption de l'azote par les compartiments de façon exponentielle, par contre l'élimination de l'azote se fait lentement de façon linéaire**
- **Modèle canadien du DCIEM (1983-86): compartiments en série**  
Approche alliant l'effet de perfusion (Haldane) avec le concept de diffusion décrit par Hempleman
- **Modèles à prise en compte des noyaux gazeux:**
  - **VPM** (Varying Permeability Model): modèle à perméabilité variable développé par David **Yount** (~1980 Hawaï)
  - **RGBM** (Reduced Gradient Bubble Model): travaux découlant de VPM (~1991 - Bruce **Wienke**)
  - Modèle adaptatif de **Bühlmann** (ZH-L8ADT MB)

# Principes du modèle VPM

- Dissolution identique au modèle Haldanien ZHL16
- Prise en compte de noyaux gazeux préexistant: les 16 compartiments Bühlmann sont « équipés » d'une micro bulle
- Critère de remontée: **la bulle ne doit pas dépasser un volume critique**



A la descente la bulle diminue par diffusion mais ne disparaît pas car l'enveloppe devient imperméable

À la remontée: l'enveloppe redevient perméable  
Tant que  $T_c < P_b$  : diffusion vers l'extérieur, la bulle ne grossit pas  
Si  $T_c > P_b$ : diffusion vers l'intérieur, la bulle grossit

- Modèle adapté à la plongée profonde multi gaz
- **Paliers plus profonds, vitesse plus lente**  $\Rightarrow$  filtrage des bulles avant leur croissance
- VPM permet d'expliquer:
  - le point le plus profond de la plongée en premier
  - Le risque des profils atypiques
  - L'absence d'effort avant, pendant et après la plongée (↗ non prévue noyaux gazeux)



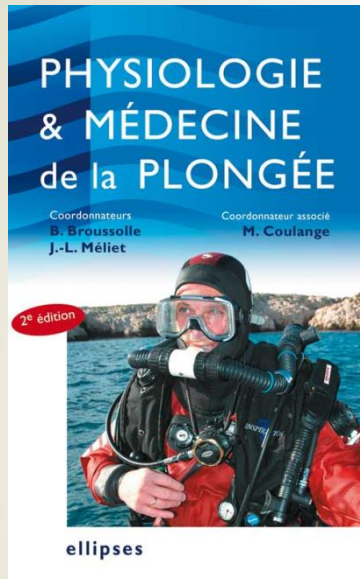
# Considérations sur la Vitesse de Remontée

- Fixée arbitrairement dans les tables de décompression par intuition et empirisme
- Les modèles Haldaniens n'ont jamais prédit la VdR
  - « Pour éviter les ADD , il semble judicieux de réduire la formation de bulles dans le système veineux ... A cette fin, on conseille de remonter plus lentement ... »
- Toute décompression est associée à la présence de bulles.
  - Constat:  $\searrow$  VdR  $\Rightarrow$  moins de bulles circulantes !
- Actualisation MN90 en 1996: Vitesse inter palier fixée à 6 m/mn
- $\searrow$  VdR :
  - $\searrow$  le gradient et la sursaturation
  - $\searrow$  risque lié à la désaturation (mais la durée de décompression  $\nearrow$ )
- Modèles à microbulles  $\Rightarrow$  VdR  $\sim$  10 m/mn
- Modèles Bühlmann: vitesses variables [20 - 7] m/mn voire [10 - 3] m/mn ou fixe
- Comment gérer une VdR trop rapide ? : pas de réponse claire à ce jour

# Considérations sur les paliers profonds

Paliers profonds	« <b>Deep Stop</b> » ou «paliers intermédiaires» ( <b>PDIS</b> – Profile-Dependent Intermediate Stop chez Scubapro)
C'est quoi ?	Palier à durée courte (1 à 2 min) - Profondeur > paliers « haldaniens » : $\frac{1}{2}$ profondeur et > à 12m.
Historique	L'origine des paliers dits « profonds » est attribuée à Richard Pyle, un biologiste marin qui collectait, au milieu des années 1990, des poissons par grande profondeur à Hawaï.
Intérêt	La pratique des « paliers profonds » trouve son origine dans <b>les plongées au trimix</b> . But: éliminer le plus possible de bulles en profondeur, avant de poursuivre sa remontée, afin de prévenir les risques d'accident de désaturation.
Paliers profonds et plongées à l'air	Voir article Alain Foret (bibliographie) <b>Pour les plongées à l'air, la pratique des paliers profonds semble contre productive</b> voire dangereuse en l'état actuel des recherches.
Commentaire	Pratique empirique ne reposant sur aucun modèle de désaturation. <b>Le bon sens recommande de ne pas les utiliser (ou de ne pas en tenir compte) en plongée à l'air.</b> Aucune pénalité de décompression ne s'applique si le palier profond DS est ignoré

# Bibliographie



## Les dessous de la décompression

Par Jean-Marie Bello, juin 2002  
[jbello@france.com](mailto:jbello@france.com)

mis à jour du 6 novembre 2002

Les rudiments de décompression enseignés pour la pratique de la plongée à l'air sont généralement suffisants pour la pratique de l'activité.

Mais lorsqu'on pratique la plongée aux machines, la plongée sous-marine ou lorsqu'on est tout simplement curieux, la recherche d'informations concernant la décompression n'est pas une tâche facile. L'information est très disséminée, les ouvrages de références ne sont plus édités et, lorsqu'on les trouve, ils sont principalement l'œuvre d'auteurs anglophones.

Il est vrai que dans ce domaine, la France vit sur des acquis récents mais le temps des pionniers comme Paul Bert est révolu et les travaux des participants sociaux industriels comme CC Dots ou Comex ne sont guère transposables à la plongée loisir. Il est d'ailleurs étonnant de voir que les progrès accomplis dans ce domaine sont dus à des individus hors du commun comme le plongeur Spélie Jacques Houssemeyer qui, avec deux plongées à -140m et à -200m à Formosa de Vaucluse au début des années 1980, accoutra à la communauté des plongeurs profonds la possibilité d'utiliser des machines tournées à l'hélium pour la plongée "loisir".

Actuellement, l'information la plus récente en terme de technique et d'expérience se trouve de l'autre côté du Channel ou de l'Atlantique.

Ce document débute avec des explications de base. Viennent ensuite des informations beaucoup plus détaillées s'appuyant sur une compilation de différents articles issus de traductions. Certains de ces articles éditoriaux ont d'ailleurs déjà été diffusés dans le passé. Les sources sont citées sur chaque traduction.

Il est évident qu'aucun document, aussi épais soit-il, ne peut prétendre à résumer toute la connaissance actuelle sur la décompression. Mais je pense que le lecteur trouvera ici l'essentiel de l'information pratique disponible actuellement.

Merci pour votre écoute et votre participation !

Liens:

- [Mémoire de Thierry Falzone \(IFR AURA\) sur la vitesse de remontée](#)
- [Analyse des caractéristiques des ordinateurs de plongée \(CTR AURA\)](#)
- [Le point sur les paliers profonds \(Alain FORET\)](#)
- [Fiche info sur la vitesse de remontée \(Alain FORET\)](#)

# Compartiment directeur

Les compartiments **C5**, **C10** & **C20** sont immergés à **35 m** pendant **40 mn**

<b>Pabs</b>	4,5 b	
<b>TN2 initiale</b>	0,8 b	
<b>PpN2 inspirée</b> = $4,5 \times 0,8$	3,6 b	
<b>Gradient</b> = $3,6 - 0,8$	2,8 b	

Rappels:

Durée (en nbre de période)	Taux de saturation <b>Ts</b>		
	en nbre	En fraction	(en %)
1	0,5	1/2	50%
2	0,75	3/4	75%
3	0,875	7/8	87,50%
4	0,9375	15/16	93,75%
5	0,96875	31/32	96,875%
6	1		100%

TN2 cherchée = TN2 initiale + G x Ts

Compartiment	C5	C10	C20
Nombre de période	8	4	2
Taux de saturation Ts	1	0,9375	0,75
TN <sub>2</sub> cherchée	= $0,8 + 1 \times 2,8$ 3,60 b	= $0,8 + 0,9375 \times 2,8$ 3,43 b	= $0,8 + 0,75 \times 2,8$ 2,90 b
<b>Sc</b>	<b>2,72</b>	<b>2,38</b>	<b>2,04</b>
Pabs Palier : TN <sub>2</sub> / Sc	1,32 b	1,44 b	1,42 b
Profondeur palier	6 m	6 m	6 m



Quel est le compartiment directeur ?

C10 est le compartiment directeur car le plus contraignant

# Pour aller plus loin...

- Et si je veux calculer la durée du palier?
- Et si je veux calculer TN<sub>2</sub> au bout d'un temps quelconque?

Il faut exploiter la formulation mathématique:

$$TN_2 = TN_2 \text{ initiale} + G \times (1 - 0,5^{t/P})$$

**Cette connaissance n'est pas exigée pour le GP !**

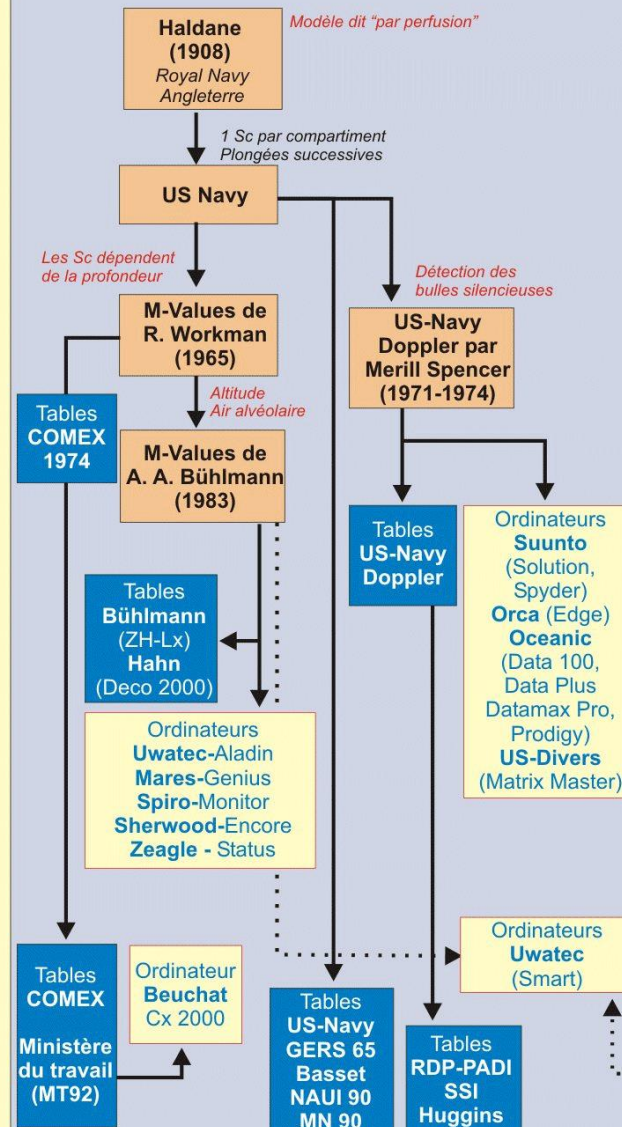
Tables MN90 :

- À partir d'un Intervalle de surface de 15 mn, seul le compartiment **C120** est pris en compte pour la désaturation (**Azote résiduel**)  
Les autres compartiments, plus rapides, ont tous désaturé en dessous du Sc du C120
- Jusqu'à quelle profondeur peut-on rester indéfiniment sans palier? (Selon MN90)

$$TN_2 = Sc \times P_{abs \text{ surface}} = P_{pN_2} = 0,8 \times P_{abs \text{ fond}}$$

# LES MODELES DE DECOMPRESSION

## MODELES HALDANIENS ET DERIVES



## AUTRES MODELES

Hempleman (dès les années 1950)  
et Hennessy (années 1970)  
*Disparition de la notion de compartiment*

**Modèle par diffusion (Slab model)**

**Tables BS-AC 88 (Grande Bretagne)**

Kidd, Stubb, puis Nishi au sein du DCIEM.

**Compartiments en série**

**Tables DCIEM (Canada)**

VPM (Yount, Hoffman)  
RGBM (B.R. Wienke, années 1990)  
*Prise en compte de l'azote gazeux.*

**Noyaux gazeux (gaz nuclei) micro-bulles**

**Ordinateurs Suunto (Stinger, Cobra, Mosquito, Vytec, Vyper)**

**Logiciels Abyss**

*Modèle Bühlmann modifié ZH-L8 ADT MB*



# MN90

Compartiment	C5	C7	C10	C15	C20	C30	C40	C50	C60	C80	C100	C120
Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
Sc	2,72	2,54	2,38	2,2	2,04	1,82	1,68	1,61	1,58	1,56	1,55	1,54