Modèles de décompression et élaboration des procédures de désaturation

Questions sur la dissolution

- Quel est l'intérêt de la loi de Henry en plongée et pourquoi l'enseigner ?
- Que se passe-t-il au niveau des échanges gazeux ?
- Dissolution des gaz: Quelle différence faites-vous entre équilibre et saturation ?
- Pouvez-vous définir les différents états de saturation ?
- Quels liens faites-vous entre les facteurs de dissolution et la loi de Henry ?

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.

À <u>température</u> donnée, lorsqu'un <u>gaz</u> est en <u>équilibre</u> avec un <u>liquide</u> dans lequel il est soluble, la concentration de gaz dissous est proportionnelle à la <u>pression</u> qu'exerce ce gaz <u>sur</u> le liquide.

Équilibre = bilan des échanges nul après une <u>durée d'exposition suffisante</u>
Concentration = quantité de gaz dissous par litre de liquide.
Pression (P) = pression du gaz sous forme gazeuse
Tension (T) = pression du gaz dissous dans le liquide

Justification de la Tension

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

$$C = s \times P$$

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

C: concentration du gaz dans le liquide
s: solubilité gaz / liquide à température donnée

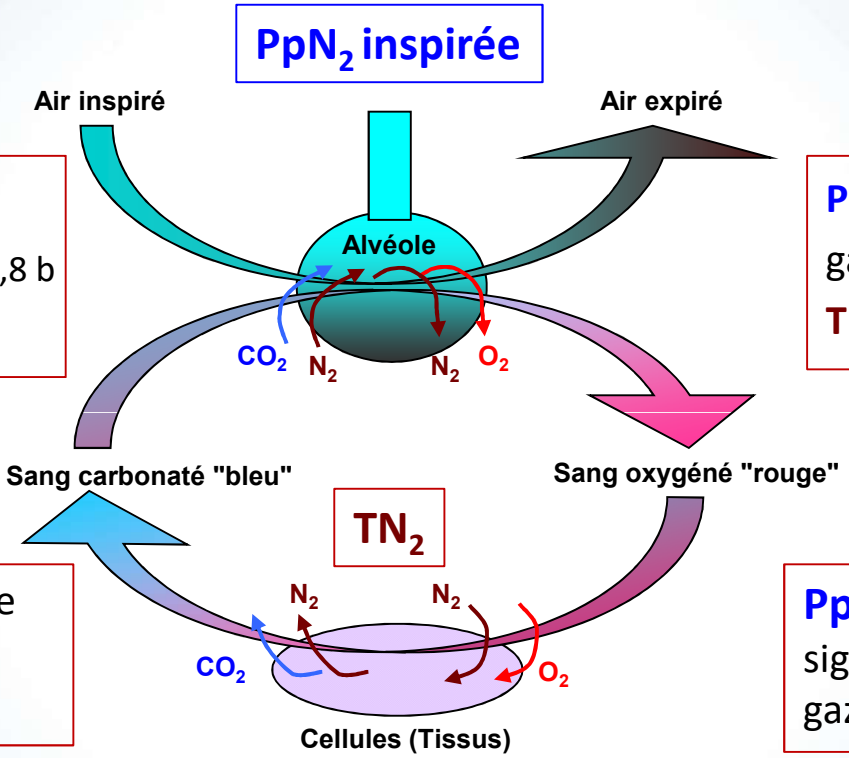
À l'équilibre et à température constante: $T_{ension} = P_{ression}$

Échanges gazeux: rappels & compléments

PpN_2 inspirée:

Surface: PpN_2 = 0,8 x 1 = 0,8 b

Fond: PpN_2 = 0,8 x Pabs



PpN_2 inspirée = Azote gazeux inspiré

TN_2 = Azote dissous

Différence de pression entre phase gazeuse et phase dissoute = **Gradient**

PpN_2 – TN_2 : **gradient (G)** significatif des échanges gazeux par **diffusion**

$PpN_2 > TN_2$:	**Diffusion N_2** dans le sang - Transport - Diffusion N_2 dans les cellules	G > 0	TN_2 ⇗: **Charge**
$PpN_2 = TN_2$:	État d'équilibre obtenu après un temps d'exposition suffisant	G = 0	
$PpN_2 < TN_2$:	**Désaturation N_2** (Diffusion N_2 depuis cellule dans le sang – Transport - puis Diffusion N_2 dans l'air alvéolaire)	G < 0	TN_2 ↘ : **Décharge**

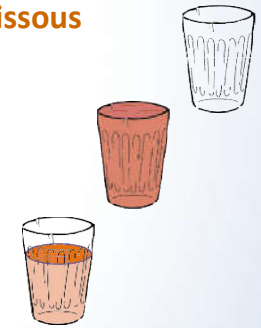
Loi de Henry – compléments

Solubilité & capacité d'absorption

Exemples: [3]

1 litre de plasma (à 37°C) peut dissoudre 13,4 ml d'Azote
1 litre de plasma (à 37°C) peut dissoudre 8,7 ml d'Hélium
1 litre d'huile (à 37°C) peut dissoudre 67 ml d'Azote (5 x plus que le plasma)

Capacité d'absorption = volume maxi de gaz que l'on peut dissoudre par litre de liquide **à température donnée et à $P_{ambiante}$** ⇨ symbolisé par verre – **contenu = N_2 dissous**



Azote seul au contact d'un liquide : Pression N_2 = Pabs
À l'**équilibre** : **TN_2 = Pabs** : N_2 dissous = verre plein ⇔ **saturation**

Air (mélange gazeux) au contact d'un liquide : Pression N_2 = PpN_2
À l'**équilibre** : **TN_2 = PpN_2** : N_2 dissous = verre rempli à 80%

Capacité d'absorption (taille du verre) proportionnelle à $P_{ambiante}$ subie !

Saturation (d'un liquide par un gaz) = état d'un liquide ayant dissous la quantité maximale de gaz possible dans des conditions déterminées de température et de pression.
À saturation: TN_2 = Pabs

TN_2 / Pabs : rapport (ou ratio) de sursaturation ou coefficient de saturation (S)

Courbes: Dissolution

Pabs

Exemple: à 40 m: $PpN_{2\ inspirée}$ = P abs x 0,8 = 5 x 0,8 = **4 b**

$PpN_{2\ inspirée}$

TN_2

Charge en %

100% 90% 80% 70% 60% 50% 40% 30% 20% 10% 0%

Comment évolue la TN_2 ?

Évolution TN_2 :
Charge, remplissage
abus de langage :
courbe de saturation

État initial d'équilibre
TN_2 initiale = PpN_2 = 1 x 0,8 = **0,8 b**

Suffisamment longue pour arriver à un nouvel état d'équilibre
TN_2 = PpN_2

Gradient $_{initial}$ = **$PpN_{2\ inspirée}$ - $TN_{2\ initiale}$**
$G_{initial}$ = 4 – 0,8 = 3,2 b

Surface

$PpN_{2\ inspirée}$

TN_2

Durée

t0 **Gradient** $_{initial}$ ⇔ quantité maximale de N_2 pouvant être dissous

Évolution à pression constante: **Pabs**

Simplification
Temps de descente négligé ⇔ compression instantanée

Exemple : Profondeur = 40 m - Pabs = 5b

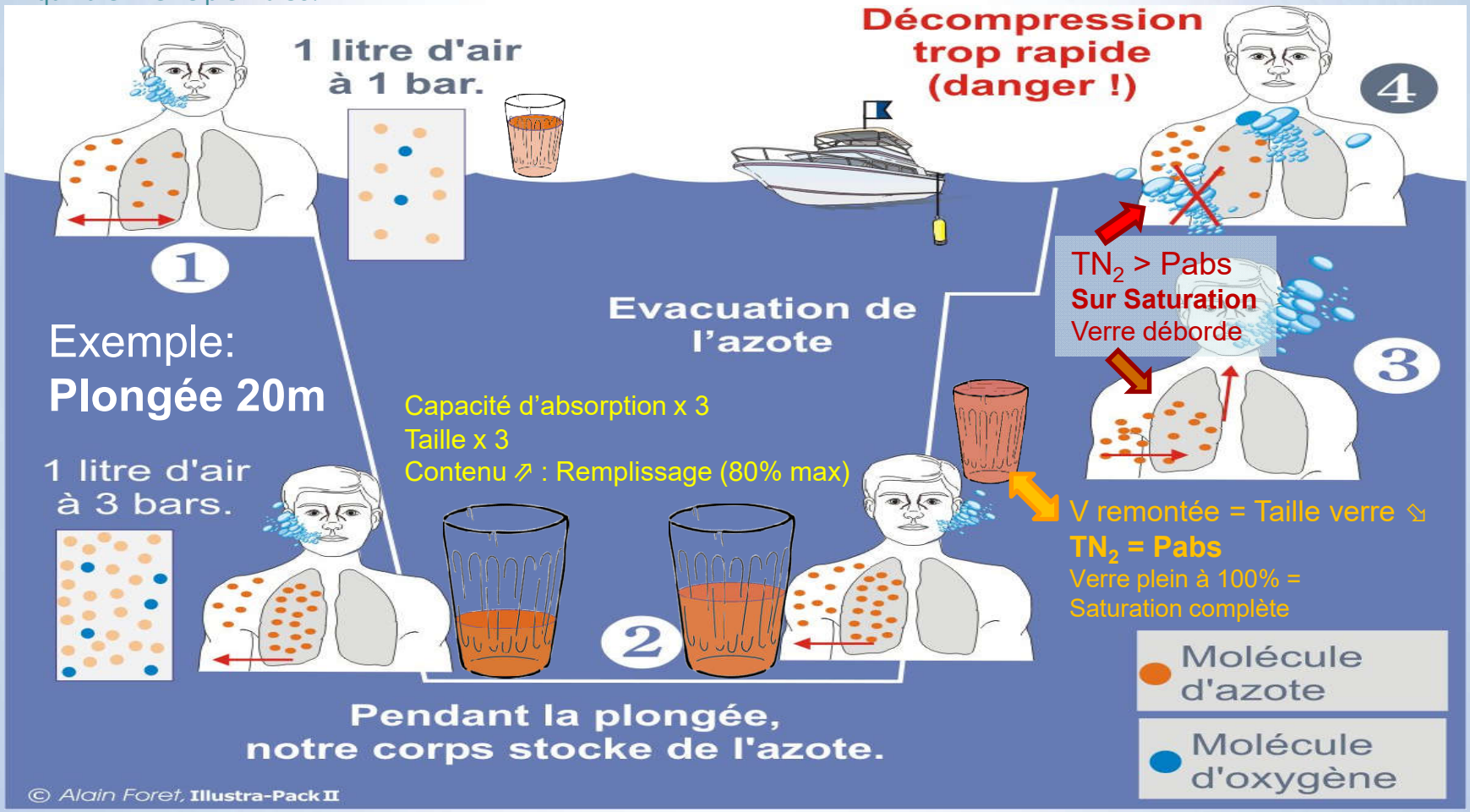
Profondeur

Dissolution et plongée

Taille verre = capacité d'absorption à Pabs = 1b

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

Équilibre - Verre plein à 80%



États de Saturation : rappels & définitions

- ***Saturation*** *: État d'un liquide (compartiment) ayant dissous la quantité maximale de gaz (N_2) possible dans des conditions déterminées de température et de pression.*
  À saturation: TN_2 = Pabs (loi de Henry)
  Remarque: l'air respiré étant un mélange gazeux, la saturation en N_2 n'est jamais atteinte en phase de charge puisque la quantité de N_2 dissoute est limitée par la PpN_2 inspirée: à l'équilibre $TN_2 = PpN_2$.
  La saturation ne sera atteinte transitoirement que pendant la phase de remontée puis pendant la désaturation en surface.

- ***Désaturation*** : $TN_2 > PpN_2$ - élimination de l'azote en excès - débute pendant la phase de remontée et se termine en surface lors du retour à l'équilibre – se déroule majoritairement en surface

- ***Sursaturation*** *: Correspond à la phase de désaturation pour laquelle:* TN_2 > Pabs ou ratio de sursaturation (TN_2 / Pabs) > 1
  En plongée: *État obtenu par diminution de la Pabs (phase de remontée) depuis l'état de saturation.*
  En surface*: diminution de la* TN_2 *(phase de désaturation) jusqu'à l'état de saturation*

- ***Sursaturation critique*****:** *État correspondant à la valeur maximale du ratio de sursaturation ou à la TN_2 maximale d'un liquide (compartiment) au-delà de laquelle se produit un dégazage anarchique (selon Haldane).*
  Pour ne pas franchir la limite il faut arrêter la diminution de Pabs *(phase de remontée)* donc faire un palier.

- ***Coefficient de sursaturation critique (Sc)*** *: valeur maximale du ratio de sursaturation.*
  Sa valeur est fixe (dans le cas des MN90) et déterminée empiriquement pour chaque compartiment.
  Il permet de calculer la profondeur des paliers (Pabs = TN_2 max / Sc).

- ***Sous saturation***: TN_2 < Pabs - En plongée: *phase de charge jusqu'à la saturation obtenue pendant la remontée.*

En surface: *État obtenu par diminution de la* TN_2 *(phase de désaturation) depuis l'état de saturation jusqu'à l'équilibre .*

Les facteurs de dissolution
appliqués au plongeur

Facteur (paramètres loi de Henry)	**Concernant le Plongeur**	**La dissolution** (charge en gaz inerte) **augmente si :**
Pression du gaz		
Durée d'exposition **(jusqu'à l'équilibre)**		
Agitation		
Température		
Nature du gaz		
Nature du liquide		
Surface de contact		

Surligné jaune : les facteurs variables pendant la plongée

Les facteurs de dissolution
appliqués au plongeur

Facteur (paramètres loi de Henry)	**Concernant le Plongeur**	**La dissolution** (charge en gaz inerte) **augmente si :**
Pressure du gaz	Profondeur d'évolution ⇨ PpN_2 inspirée Facteur le plus important en plongée	Profondeur ⇗ : ⇗ **gradient & capacité d'absorption** ⇨ ⇗ échanges gazeux par diffusion
Durée d'exposition (jusqu'à l'équilibre)	Durée d'immersion – en plongée sportive l'état d'équilibre complet n'est jamais atteint	⇗Temps de plongée = ⇗ **Remplissage** ⇗ échanges gazeux par diffusion jusqu'à l'équilibre
Agitation	Efforts, Froid, Stress : ⇨ ⇗consommation - Efforts importants non prévus par la procédure de déco !	⇗ rythme respiratoire ⇗ Débit sanguin ⇨ perfusion ⇗ & ⇗ échanges gazeux par diffusion : **Remplissage accéléré**
Température	Température corps humain (régulée à ~37°C)	La température diminue (hypothermie)
Nature du gaz	Gaz dissous = diluant = Azote (+ Hélium si trimix) N2: Air = 80% – Nitrox < 80%	La solubilité ⇗ : celle de l'azote est supérieure à celle de l'hélium (corrélation avec l'effet narcotique ?)
Nature du liquide	Le corps humain : ~ 65% d'eau – la répartition diffère selon les tissus Attention surcharge pondérale	La solubilité ⇗ : La solubilité de l'azote n'est pas identique dans tous les tissus (plasma, graisse…)
Surface de contact	Poumons – tissus physiologiques plus ou moins bien vascularisés	La vascularisation ⇗ : La vitesse de diffusion ⇗ pour les tissus mieux perfusés

Surligné jaune : les facteurs variables pendant la plongée

Questions sur les procédures de désaturation

Les Modèles

- À quoi servent-ils ?
- Quels sont les modèles utilisés dans les ordinateurs de plongée ?
- Connaissez- vous le modèle de désaturation de votre ordinateur ?
- Quels paramètres humain et environnementaux ne sont pas intégrés dans l'algorithme de votre ordinateur ?

Les Modèles Haldanien

- Qu'est-ce qu'un modèle Haldanien ?
- À quoi correspond le graphe de pression et quelle est son utilité ?
- À quoi correspondent les « M-Values » ?
- Quelle différence entre MN90 et Bühlmann ? - Que veut dire « ZHL16 C » ?
- Quelle est la différence entre M-Values et Sc ?

Les ordinateurs

- Quelle différence entre RGBM et Bühlmann ?
- Quelles possibilités de personnalisation vous offre votre ordinateur ?
- A quoi correspond la personnalisation ? Et à quoi sert-elle ?
- À quoi servent les facteurs de gradient ?
- À quoi correspond un « deep stop » ?

La problématique:

passer de la physiologie au calcul

⇨ 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

Modèle = Algorithme de calcul validé

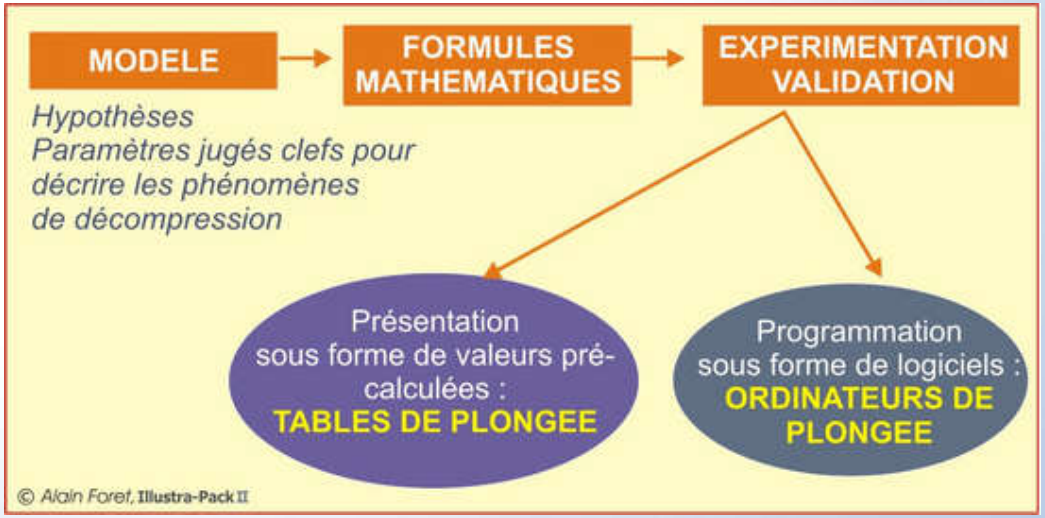
Comment valider le modèle ?

⇨ **Expérimentation** !

et /ou **Étude statistique**

banques de données (Marines – Comex) – Notion de **risque accepté**

Risque global actuel évalué à 5 accidents pour 10 000 plongées selon [3]



Les modèles de décompression

Diffusion

(vitesse de dissolution)

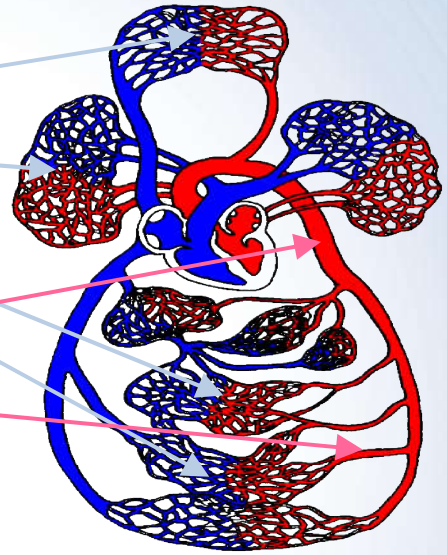
1. alvéolo-capillaire – 2. tissulaire

Absorption / restitution gaz dissous par un tissu

Perfusion

(vitesse de remplissage d'un tissu)

Acheminement d'un gaz dissous vers un tissu



3 grandes familles:

Type Modèle		Facteur limitant	Famille	Algorithmes
Monophasique	Perfusion	Gaz dissous & durée d'acheminement	Haldane et dérivés	Bühlmann (MN90)
	Diffusion	Gaz dissous & durée de diffusion	Concept de Hempleman	
Diphasique	Microbulles + perfusion	Gaz dissous + noyaux gazeux	Prise en compte MicroBulles	VPM – RGBM Bühlmann MB

Le modèle et ses limites:

facteurs de risque

Modèle ⇨ Protocole de désaturation « **standardisé** » basé sur:

mesures:	Temps de plongée – Profondeur	**Quantité N_2 dissous <u>prévue</u> par le modèle**
hypothèse:	Consommation air	
hypothèse:	efficacité élimination N_2 par filtre pulmonaire (N2 dissous + gazeux)	
autres hypothèses:	Physiologie , modélisation mathématique	

facteur de risque théorique qui augmente avec la profondeur et la durée de la plongée

⇗ Quantité N_2 dissous ⇔ ⇗ Risque !

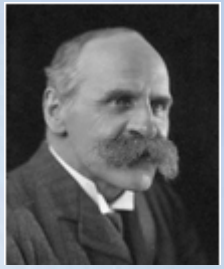
Hors Modèle:

Variabilité des facteurs physiologiques d'un individu à l'autre et pour un même individu d'un jour sur l'autre ⇨
« jouer » avec les limites du modèle = DANGER !

<u>Nota</u>: efforts, début essoufflement, stress, froid ⇨ **⇗ Consommation air** ⇨ **⇗ N2 dissous**

- Facteurs personnels: méforme, hygiène de vie, âge > 40 ans, surcharge pondérale, antécédent médicaux, sédentarité, déshydratation, stress , froid …
- Comportements à risque : efforts en plongée, hyperpression thoracique en fin de plongée (Valsalva, effort à glotte fermée), efforts ou apnée ou altitude ou avion après plongée, > 2 plongées / jour, pratique irrégulière…
- Profils à risque : yoyos, dents de scie, remontées rapides, consécutive/successive rapprochée, profils inversés…

Les Hypothèses de Haldane



Hypothèses physiologiques:

- L'équilibre des pressions au niveau alvéolaire (poumons / sang) est instantané
- L'équilibre des pressions au niveau tissulaire (sang / tissus) est instantané
- PpN2 air Alvéolaire = PpN2 inspirée

} **Diffusion Instantanée (= non prise en compte)**

Hypothèses liées à la modélisation mathématique:

- Le corps humain est représenté par des « compartiments » (*)
- Chaque compartiment est isolé. Il n'échange de gaz qu'avec la circulation sanguine et elle seule
  ⇨ **Modèle à perfusion** (transport N2 par le sang vers l'ensemble du corps)
- Chaque compartiment a un comportement homogène vis à vis de la charge et de la décharge en gaz inerte. La tension de gaz dissous est uniforme à l'intérieur d'un compartiment. Charge & décharge sont symétriques
- Chaque compartiment est défini par sa période (*) qui caractérise sa vitesse d'absorption
  Les compartiments les mieux « perfusés » ont les périodes les plus courtes (saturent plus rapidement).

(*) **Compartiment** = découpage artificiel du corps humain - région anatomique factice qui regroupe un ensemble de tissus physiologiques ayant le même comportement vis-à-vis de la charge & décharge en gaz dissous (possédant un **taux de perfusion homogène**)

(*) **Période** = temps constant (exprimé en mn) mis par un compartiment :

- En phase de charge: pour qu'il absorbe la moitié du gaz qui lui manque pour atteindre l'équilibre
- En phase de décharge: pour qu'il restitue la moitié du gaz qu'il a en trop pour atteindre l'équilibre

Charge d'un compartiment

Exemple: à 20 m: $PpN_{2\ inspirée}$ = P abs x 0,8 = 3 x 0,8 = **2,4 b** $TN_{2\ finale}$

Charge en %

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

P6: 1,56% total ~ 100 %

P5: = 6,25% x ½ = 3,125% total = 96,875%

P4: charge = 12,5% x ½ = 6,25% total = 93,75 %

P3: charge = 25% x ½ = 12,5% total = 87,5 %

P2: charge = 50% x ½ = 25% total = 75 %

P1: charge = 100% x ½ = 50% total = 50 %

État initial d'équilibre
TN_2 initiale = PpN_2 = 1 x 0,8 = **0,8 b**

Surface (1bar)

$PpN_{2\ inspirée}$

$TN_{2\ initiale}$

$G_{\ initial}$ = $PpN_{2\ inspirée}$ - $TN_{2\ initiale}$

G = **2,4** – **0,8** = 1,6 b

Durée (périodes)

t_0

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

Évolution à pression constante

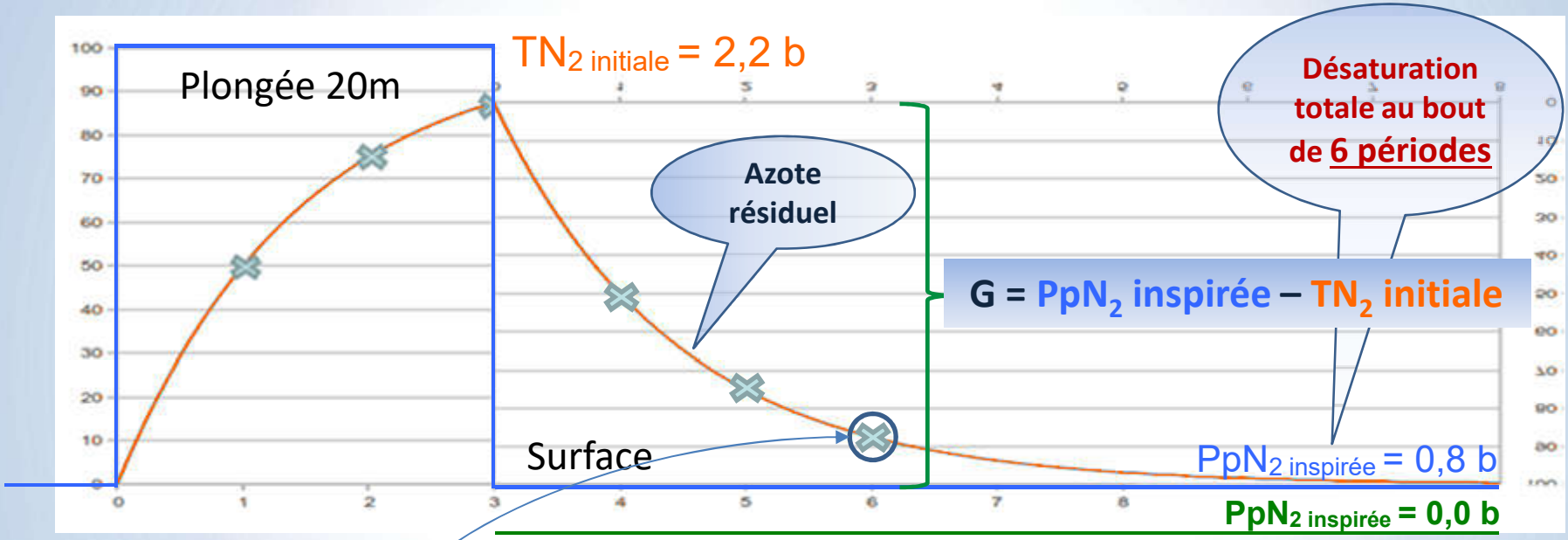
Simplification
Temps de descente négligé ⇔ compression instantanée

Exemple : Profondeur = 20 m

Profondeur

Décharge d'un compartiment

loi de désaturation (TN_2 =< Sc)



TN_2 résiduelle = TN_2 initiale + G x Ts

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

PpN_2 inspirée (en surface) =	1 x 0,8 =	0,8 b
TN_2 initiale =		2,2 b
Gradient =	0,8 – 2,2 =	-1,4 b

TN2 cherchée = 2,2 - 1,4 x 0,875 = 0,975 b

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

PpN_2 inspirée (en surface) =	1 x 0,0 =	**0,0 b**
TN_2 initiale =		2,2 b
Gradient =	0,0 – 2,2 =	-2,2 b

TN2 cherchée = 2,2 - 2,2 x 0,875 = 0,275 b

Dénitrogénation améliorée !!

Décharge d'un compartiment

Le compartiment peut-il remonter en surface?

Examen du rapport de sursaturation **S = TN_2 / Pabs**

S > Sc	**Risque important d'accident** **Dégazage anarchique - bulles pathogènes** TN_2 >> Pabs	**Paliers impératifs !**
S = Sc	**Sursaturation critique**	
S < Sc et S > 1	TN_2 > Pabs État de **Sursaturation** Selon Haldane: pas de bulle Mise en évidence de microbulles par mesures Doppler	Phase de remontée
S = 1	Saturation complète	
S < 1	TN_2 < Pabs État de **sous-saturation**	Phase plongée

exemple :

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

Calcul de la sursaturation:

S = TN_2 / Pabs = ?

S = 2,2 / 1 = **2,2 b**

Pour pouvoir remonter en surface il faut

S =< Sc ⇔ TN_2 =< Sc

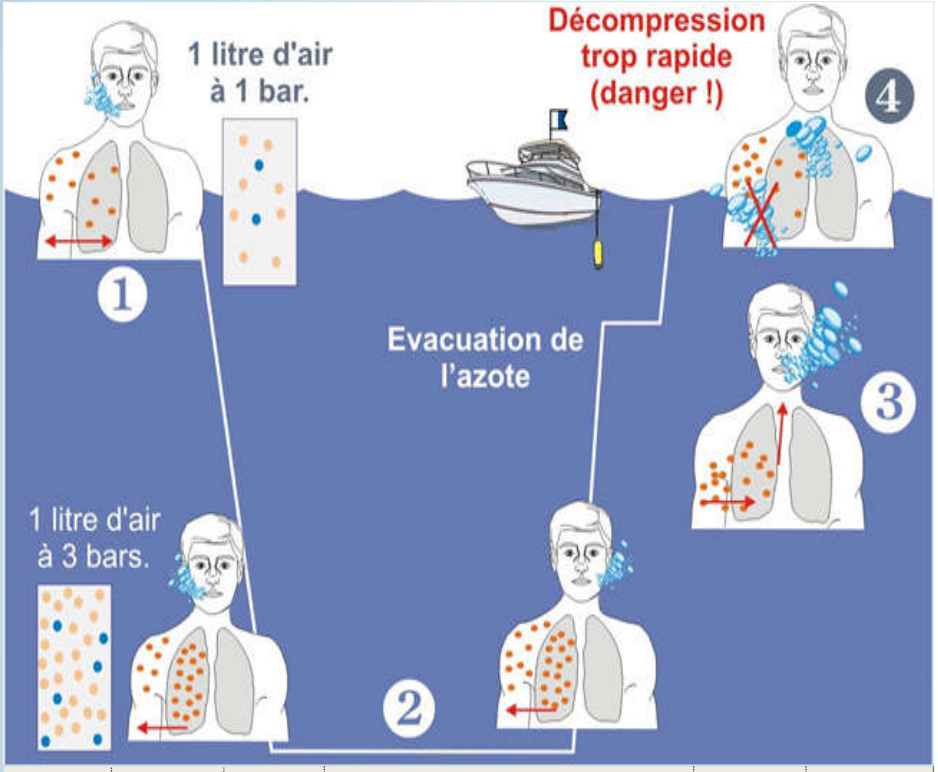
Selon tableau quels sont les compartiments qui peuvent remonter directement en surface?

C5, C7, C10, C15

Pour les autres : Palier impératif car

S > Sc ⇔ TN_2 > Sc

Dissolution et plongée



Phase	Evolution Pabs	Evolution PpN_2	état				action	Evolution TN_2
1-Surface	Pabs stable longtemps	PpN_2 stable longtemps	$TN_2 = PpN_2$	$TN_2 < Pabs$	$S < 1$	Sous-saturation	équilibre stable	TN_2 stable
2-Descente	Pabs augmente	PpN_2 augmente	$TN_2 < PpN_2$	$TN_2 < Pabs$	$S < 1$	Sous-saturation	Charge	TN_2 augmente vers un nouvel équilibre
2-Fond	Pabs stable	PpN_2 stable						
2-Fond	Pabs stable longtemps	PpN_2 stable longtemps	$TN_2 = PpN_2$	$TN_2 < Pabs$	$S < 1$	Sous-saturation	équilibre stable	TN_2 stable

Phase	Evolution Pabs	Evolution PpN_2	état				action	Evolution TN_2
4-Surface	Pabs stable	PpN_2 stable	$TN_2 > PpN_2$	$TN_2 >> Pabs$	$S > Sc$	Sursaturation critique dépassée	Désaturation anarchique	TN2 diminue avec bulles pathogènes
4-Remontée	Pabs diminue	PpN_2 diminue						
4-Remontée	Pabs diminue	PpN_2 diminue	$TN_2 > PpN_2$	$TN_2 > Pabs$	$S = Sc$	Sursaturation critique	Désaturation	TN_2 diminue fortement

Phase	Evolution Pabs	Evolution PpN_2	état				action	Evolution TN_2
3-Surface	Pabs stable	PpN_2 stable	$TN_2 = PpN_2$	$TN_2 < Pabs$	$S < 1$	Sous-saturation	équilibre stable	TN_2 stable
3-Surface	Pabs stable	PpN_2 stable	$TN_2 > PpN_2$	$TN_2 < Pabs$	$S < 1$	Sous-saturation	Désaturation	TN_2 diminue
				$TN_2 = Pabs$	$S = 1$	Saturation transitoire		
				$TN_2 > Pabs$	$S < Sc$	Sursaturation		
3-Remontée	Pabs diminue	PpN_2 diminue	$TN_2 > PpN_2$	$TN_2 > Pabs$	$S < Sc$	Sursaturation	Désaturation	TN_2 diminue fortement
3-Palier	Pabs stable	PpN_2 stable			$S = Sc$	Sursaturation critique		
3-Remontée	Pabs diminue	PpN_2 diminue	$TN_2 > PpN_2$	$TN_2 > Pabs$	$S > 1$	Sursaturation	Désaturation	TN_2 diminue
				$TN_2 = Pabs$	$S = 1$	Saturation transitoire		TN_2 diminue doucement
				$TN_2 < Pabs$	$S < 1$	Sous-saturation		TN_2 commence doucement à diminuer
			$TN_2 = PpN_2$				équilibre transitoire	TN_2 stable transitoire
			$TN_2 < PpN_2$				Charge	TN_2 augmente vers un nouvel équilibre

Décharge d'un compartiment

Le compartiment peut-il remonter en surface?

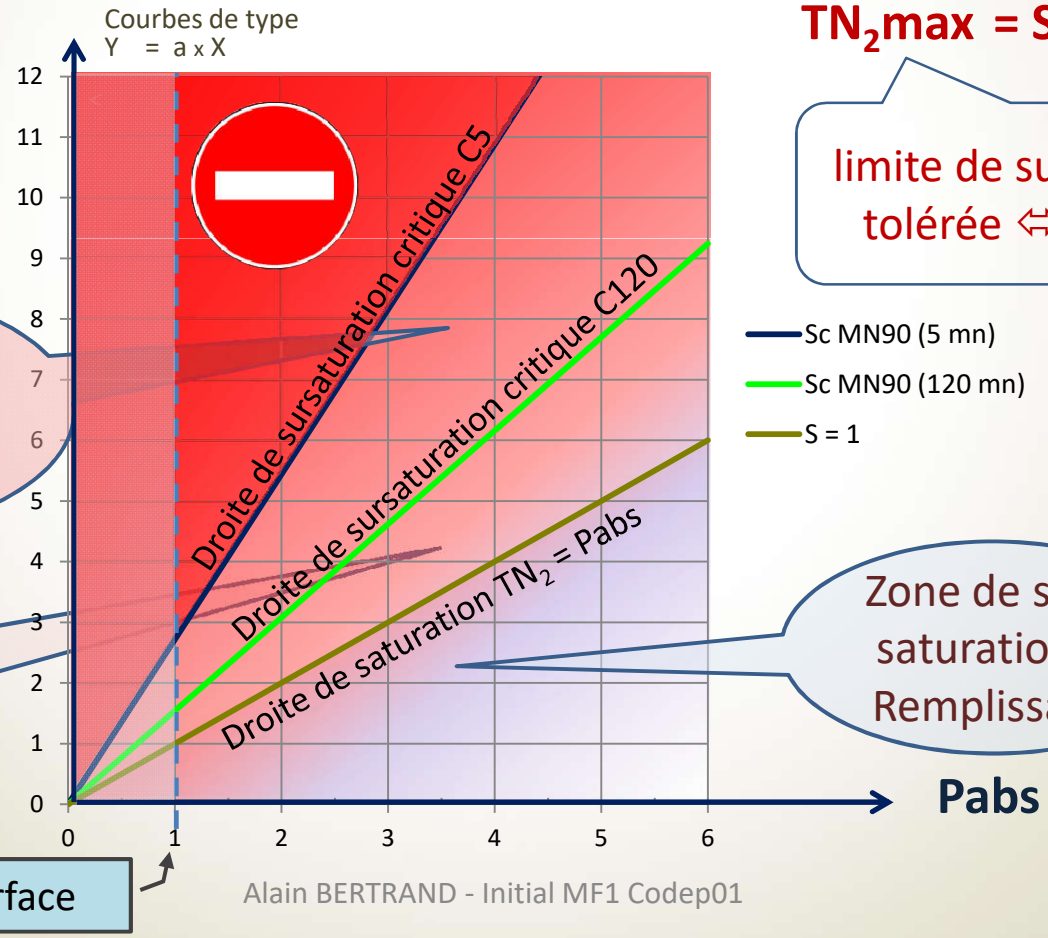
Examen du rapport de saturation **$S = TN_2 / Pabs$** ⇨ **$TN_2 = S \times Pabs$**

$TN_2max = Sc \times Pabs$

limite de sursaturation tolérée ⇔ **M-Value**

Autre Représentation :

Graphe des pressions



Zone de sursaturation Admissible pour **C5** **Interdite pour C120**

Zone de sursaturation admissible = **désaturation**

Zone de sous saturation = Remplissage

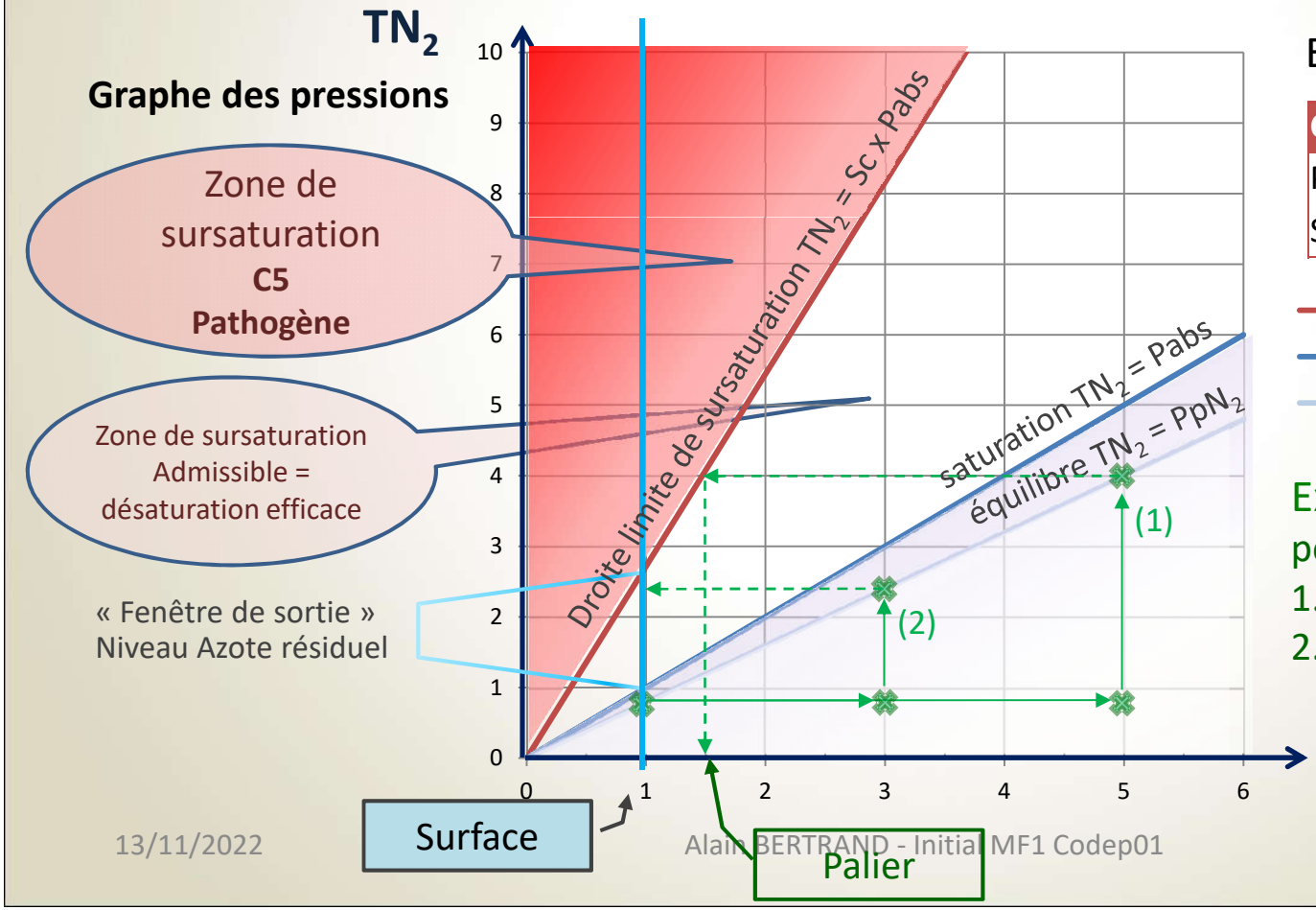
tableau

Critère de remontée

MN90 coefficient de sursaturation critique

Le compartiment peut-il remonter en surface?

Sursaturation maximale : **$Sc = TN_2$ max / Pabs =>** **TN_2max = Sc x Pabs**



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

Autres modèles Haldanien
& concept des M-values

M-value = valeur maximum (de la TN_2) : limite de sursaturation tolérée par un compartiment

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

Problématique **plongées longues et profondes** : modèle US-Navy de l'époque non satisfaisant

pour chaque compartiment :

- Série de Sc fonction **de la Profondeur** (si Prof ⇗ : Sc ⇘)
- relation linéaire entre Profondeur et Tension gaz inerte (N_2 et Hélium) tolérée
- M-value = droite limite de sursaturation définie par coefficients (M_0, ΔM) :
  TN_2 max = $M_0 + \Delta M \times$ Prof

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) et de la **Pression absolue** – M-Values définies par TN_2 max = Coeff A+ (1/coeff B) x Pabs

Publications de son modèle:

=> Utilisé par de nombreux ordinateurs du marché

16 compartiments dont le plus long est 635 mn !

Autres modèles:

Spencer (années 70): adapte les tables US-Navy après détection de bulles silencieuses par effet Doppler

En France: **COMEX** développe ses modèles pour travailleurs Hyperbare. Tables MT74 puis MT92

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 ?

$Y = a \times X + b$

$TN_2 = a \times Pabs + b$

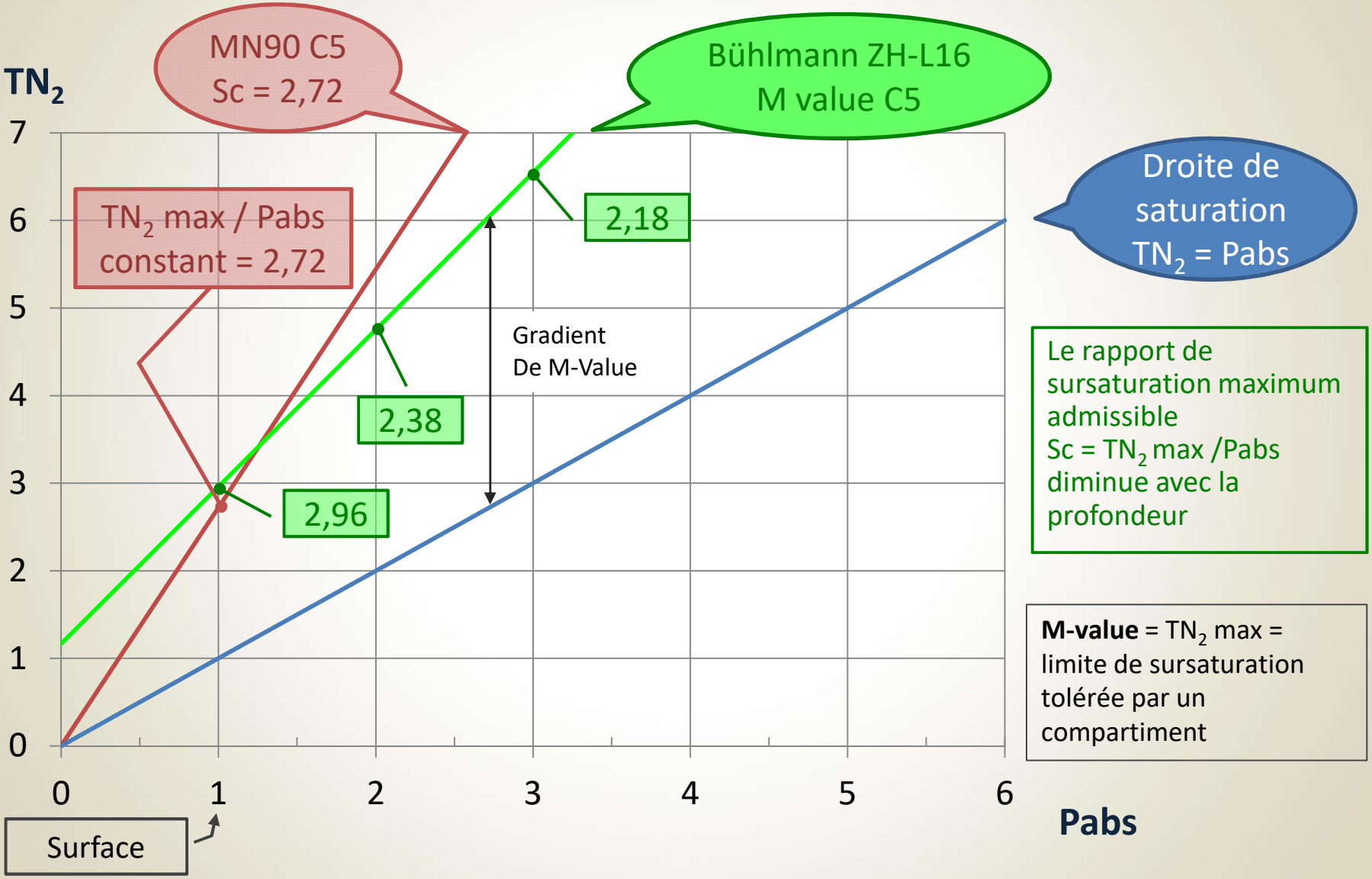
Bühlmann:
a = 1/Coeff b = 1/0,558 = 1,79
b = Coeff a = 1,17

$TN_2 = 1{,}79 \times 1 + 1{,}17$ **TN_2 = 2,96 bar**

MN90:
a = Sc = 2,72
b = 0

$TN_2 = 2{,}72 \times 1 + 0$ **TN_2 = 2,72 bar**

M-values MN90 - Bühlmann



Le rapport de sursaturation maximum admissible
Sc = TN_2 max /Pabs
diminue avec la profondeur

M-value = TN_2 max = limite de sursaturation tolérée par un compartiment

Caractéristiques des modèles (néo) Haldanien

- Air respiré sous pression ⇨ dissolution N_2 dans nombre fini de compartiments qui représentent le plongeur (12 pour MN90, 16 pour Bühlmann)

- Échanges alvéole/sang et sang/compartiment considérés 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 – période longue = tissus peu vascularisés)
  - Un **Critère de remontée :** coefficient Sc ou **limite de sursaturation admissible** (M-value) – 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** ⇨ **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
  Repris par Hennessy en 1988 => tables BSAC (GB)

- Modèle canadien du DCIEM (1983): compartiments en série
  Approche alliant l'effet de perfusion (Haldane) avec le concept de diffusion décrit par Hempleman

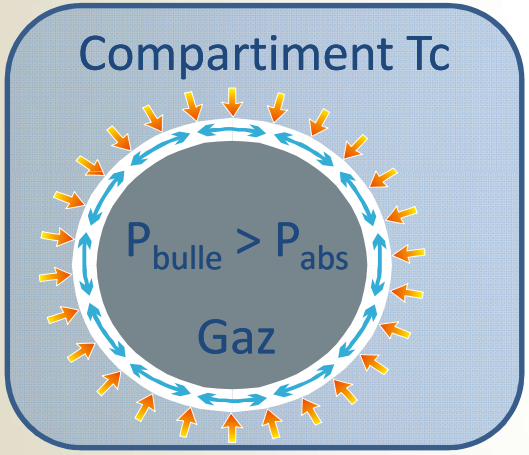
- **Modèles à prise en compte des noyaux gazeux**: modèles DIPHASIQUE
  - **VPM** (Varying Permeability Model): modèle à perméabilité variable développé par David **Yount** (~1980 Hawaï) puis Éric Baker (2002 – 2005)
    modèle libre d'accès

  - **RGBM** (modèle à faible gradient de bulle) travaux découlant de VPM (~1991 - Bruce **Wienke**) modèle exploité commercialement, protégé par secret industriel

  - Modèle adaptatif de **Bühlmann** (ZH-L8ADT MB ou ZH-L16ADT MB) utilisé dans certains ordinateur Uwatec: (MB: microbulles, + cardiofréquencemètre)

Principes du modèle VPM

- Dissolution identique au modèle Haldanien de Bühlmann ZH-L16
- Prise en compte de noyaux gazeux <u>préexistant</u>:
  les 16 compartiments Bühlmann sont « équipés » d'une micro bulle
- **Critère de remontée: la bulle ne doit pas dépasser un volume critique**

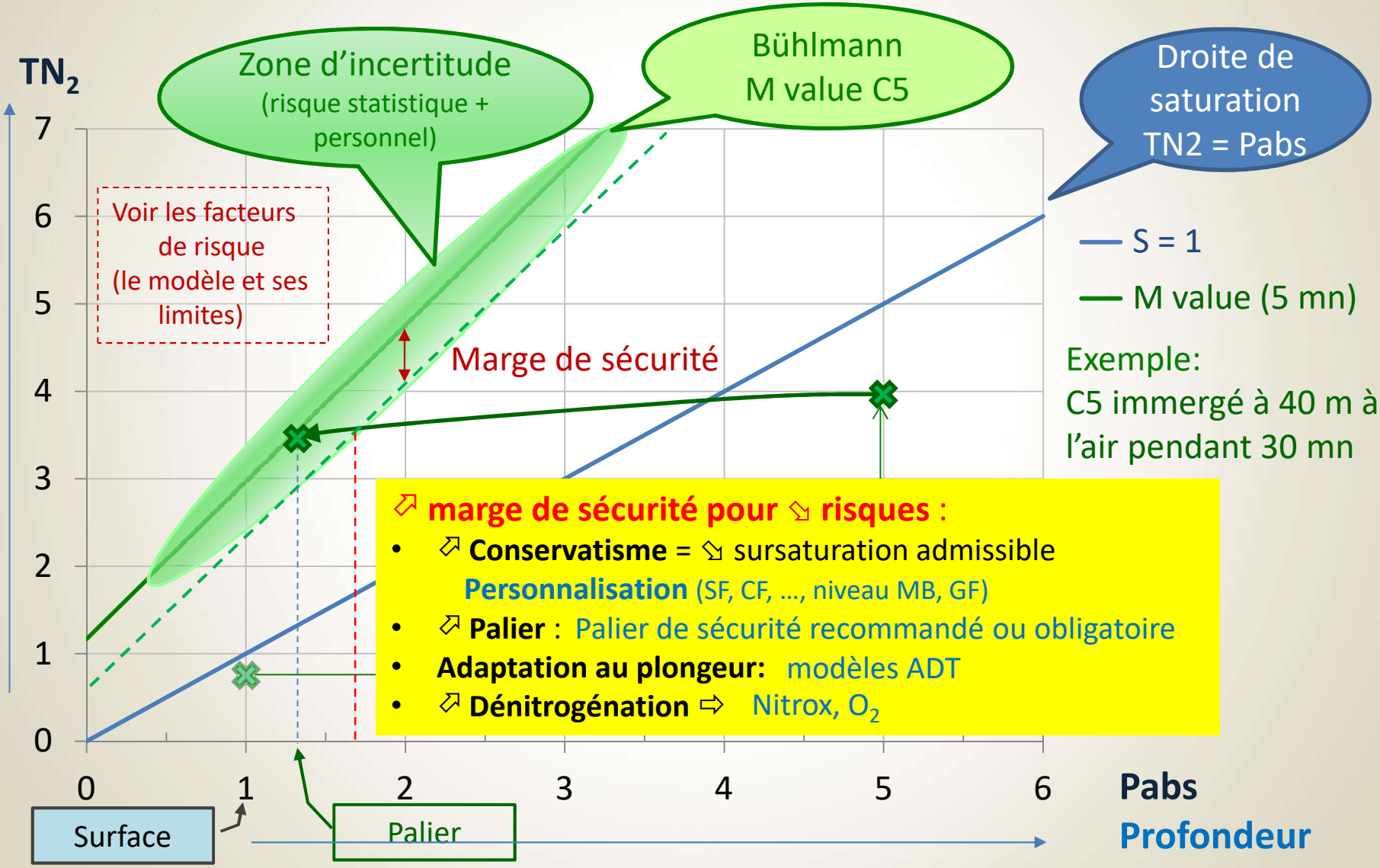


A la descente la bulle diminue par diffusion mais ne disparait pas car l'enveloppe devient imperméable

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

- Modèle adapté à la plongée profonde multi gaz (logiciel V-planner)
- VdR lente, Paliers plus profonds ⇨ filtrage des bulles avant leur croissance

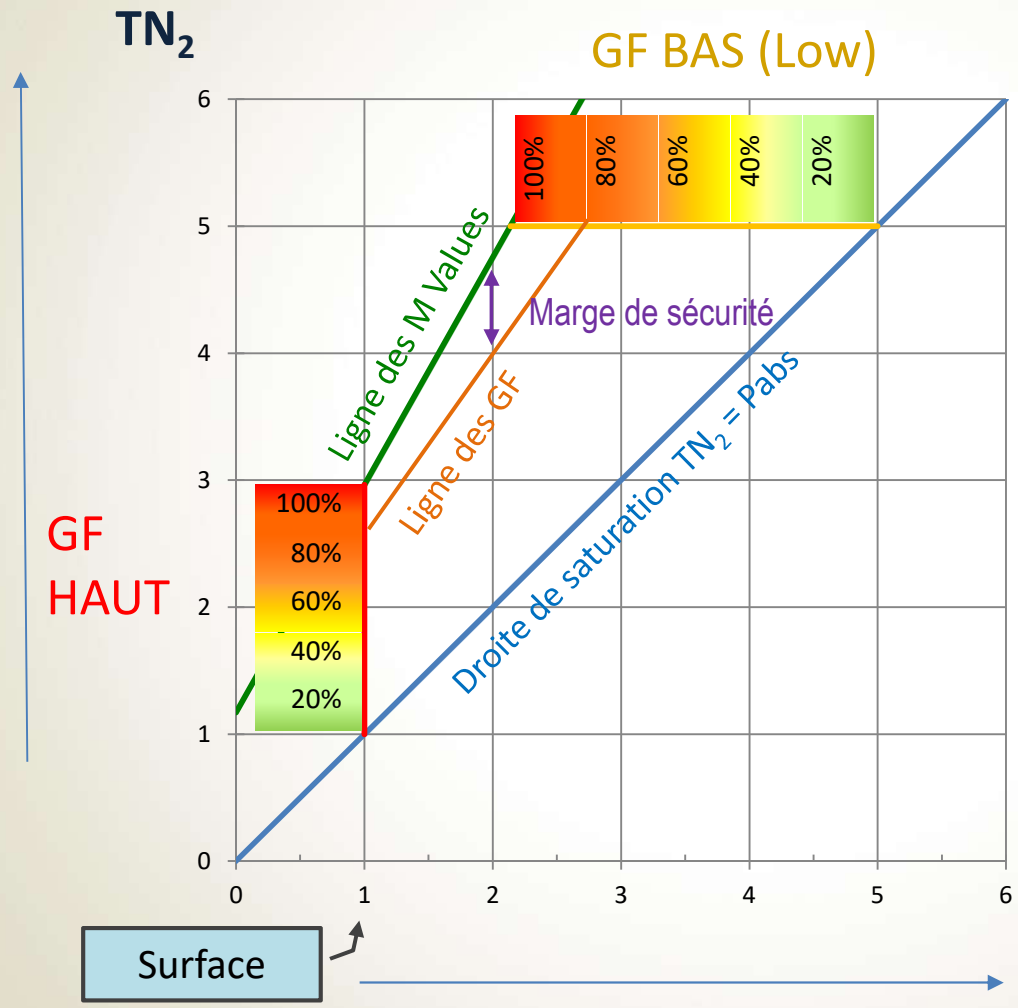
Diminution du risque : principe



⬀ **marge de sécurité pour ⬊ risques :**

- ⬀ **Conservatisme** = ⬊ sursaturation admissible
  Personnalisation (SF, CF, …, niveau MB, GF)
- ⬀ **Palier** : Palier de sécurité recommandé ou obligatoire
- **Adaptation au plongeur:** modèles ADT
- ⬀ **Dénitrogénation** ⇨ Nitrox, O_2

Concept des « Gradient Factor »



Réglage 1
GFL = 80%
GFH = 80%

GF = % Gradient de M-Value

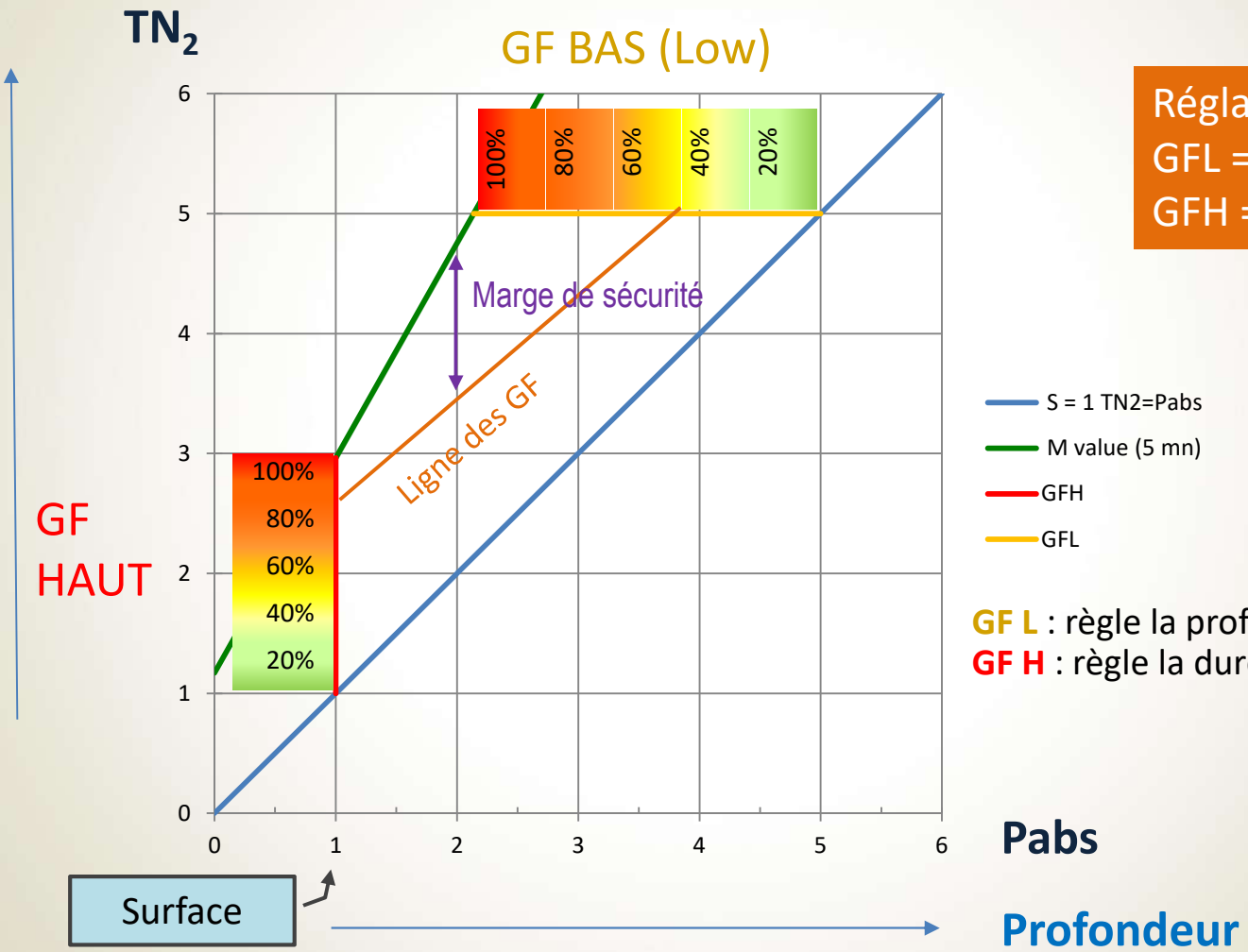
S = 1 TN2=Pabs
M value (5 mn)
GFH
GFL

/ modèle Bühlmann initial :
Durée Palier ⬀ et/ou
Profondeur Palier ⬀

Pabs

Profondeur

Concept des « Gradient Factor »



Réglage 2
GFL = 40%
GFH = 80%

GF L : règle la profondeur du 1er palier
GF H : règle la durée du dernier palier

Considérations sur la Vitesse de Remontée

- Fixée 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: ⬊ **VdR ⇨ moins de bulles circulantes !**
- Actualisation MN90 en 1996: Vitesse inter-palier & palier-surface fixée à 6 m/mn
- ⬊ VdR : ⬊ gradient et sursaturation

  ⬊ risque lié à la désaturation (mais la durée de décompression ⬀)

- Modèles à microbulles => VdR ~ 10 m/mn
- Modèles Bühlmann: VdR variables [20 - 7] m/mn - récemment: [10 - 3] m/mn ou fixe ~ 10 m/mn

- Remontée rapide - **à lire** : https://www.plongee-plaisir.com/fr/remontee-rapide-et-protocole-de-desaturation/

Considérations sur les paliers profonds

Paliers profonds	«**Deep Stop**» ou «paliers intermédiaires» (**PDIS** – Profile-Dependent Intermediate Stop chez Scubapro)
C'est quoi ?	Palier à durée courte (1 à 2 min) - Profondeur > paliers « haldaniens » : ½ 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 **les plongées au trimix**. 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	**Pour les plongées à l'air**, **la pratique des paliers profonds semble contre productive** voire dangereuse en l'état actuel des recherches. Voir article : https://www.plongee-plaisir.com/fr/paliers-profonds-point-question/
Conclusion	Pratique empirique ne reposant sur aucun modèle de désaturation. **Le bon sens recommande de ne pas les utiliser (ou de ne pas en tenir compte) en plongée à l'air.** Aucune pénalité de décompression ne s'applique si le palier profond DS est ignoré

Bibliographie

[1]

[2]

Les dessous de la décompression

Par jean-marc Belin, juin 2002
jmbelin@ifrance.com

mise 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 mélanges, la plongée souterraine ou lorsqu'on est tout simplement curieux, la recherche d'informations concernant la décompression n'est pas une quête 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.

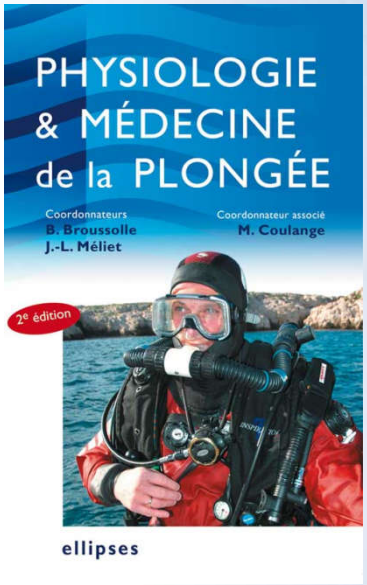
Il est vrai que dans ce domaine, la France vit sur des acquis rassurants mais le temps des pionniers comme Paul Bert est révolu et les travaux des prestigieuses sociétés industrielles comme Gz Doris ou Comex ne sont guère transposables à la plongée loisir. Il est d'ailleurs étonnant de voir que les progrès accomplis dans ce domaine sont dus à des individualités hors du commun comme le plongeur Spéléo Jochen Hassenmayer qui, avec deux plongées à –140m et à –202m à Fontaine de Vaucluse au début des années 1980, montrait à la communauté des plongeurs profonds la possibilité d'utiliser des mélanges ternaires 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 coté 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 élémentaires 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.

[3]

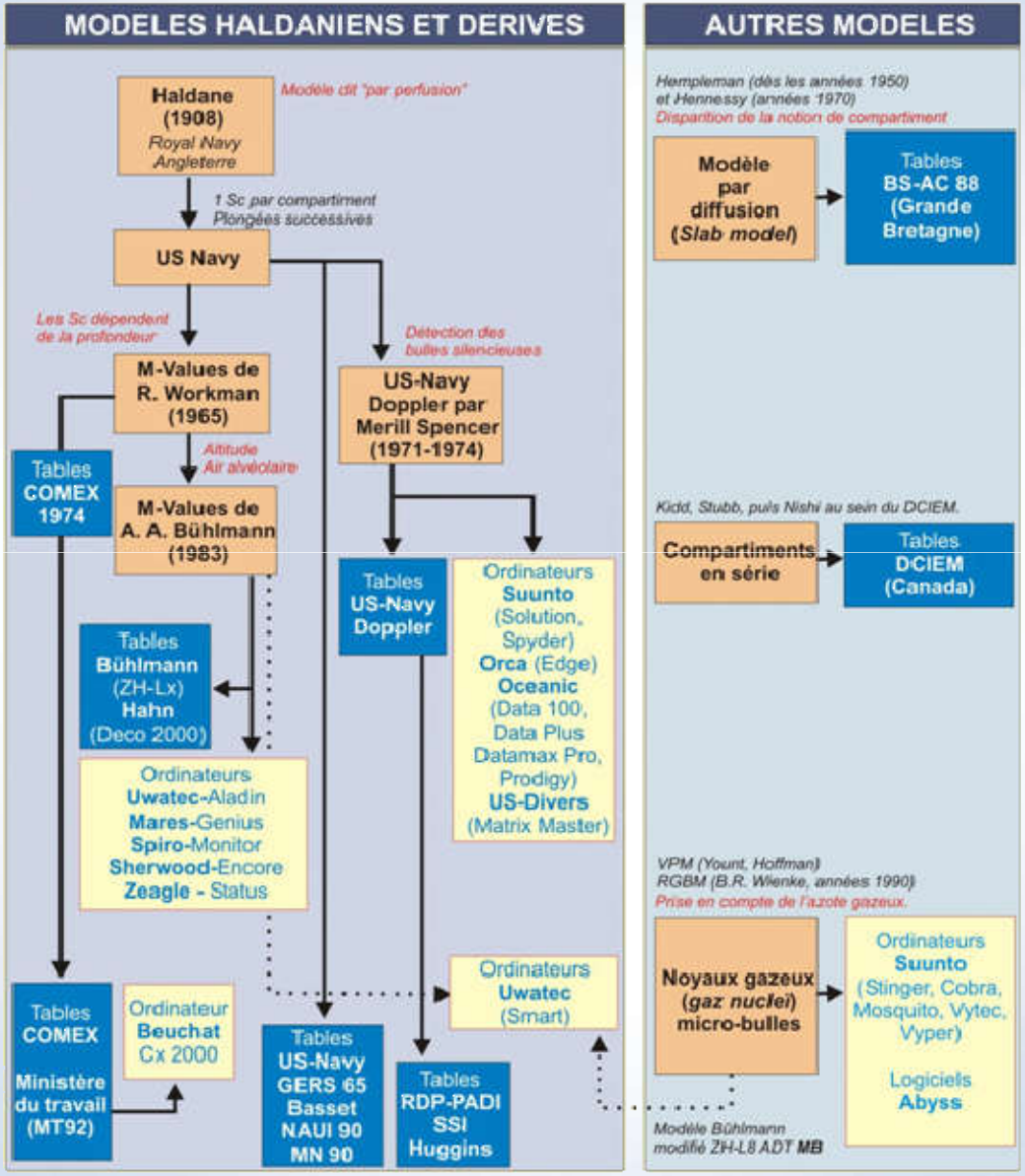


Merci pour votre écoute et votre participation !

Liens:

- Analyse des caractéristiques des ordinateurs de plongée (CTR AURA)
  http://ffessm-ctr-aura.fr/wp-content/uploads/2018/03/GTOrdinateurs-1.pdf
- Le point sur les paliers profonds (Plongée plaisir)
  https://www.plongee-plaisir.com/fr/paliers-profonds-point-question/
- Fiche info sur la vitesse de remontée (Plongée plaisir)
  https://www.plongee-plaisir.com/fr/vitesse-de-remontee/

LES MODELES DE DECOMPRESSION



Pour aller plus loin…

- Et si je veux calculer la durée du palier?
- Et si je veux calculer TN_2 au bout d'un temps quelconque?

Il faut exploiter la formulation mathématique:
$TN_2 = TN_2$ initiale + G x $(1-0,5^{t/P})$

Cette connaissance n'est pas exigée pour le GP !

Taux de saturation Ts

Calcul Durée quelconque (t en mn)

$Ts = 1 - 0,5^{t/Pér}$

Exemple: pour t = 3 Pér
$Ts = 1 – 0,5^3$
$Ts = 1 – 1/8 = 7/8$

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 - GPS**)
  Les autres compartiments, plus rapides, ont tous désaturé en dessous TN_2 du C120

- Jusqu'à quelle profondeur peut-on rester indéfiniment sans palier?
  TN_2 max = Sc x Pabs surface = PpN_2 = 0,8 x Pabs fond ⇨ Pabs fond = Sc /0,8 = 1,54 /0,8

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