Modèles de décompression en plongée

Sommaire

- Pourquoi ce cours ?
- Rappels et compléments : Loi de Henry
- Les définitions à connaitre (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

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 ?
- À quoi correspond un « deep stop » ?
- …

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 $P_{ambiante}$ 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

  TN2 = a * Pabs + 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

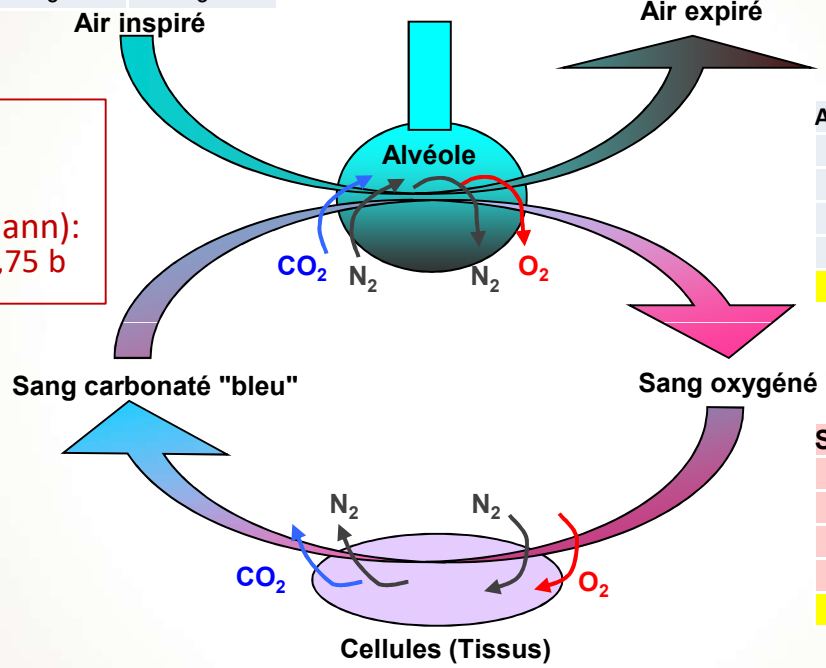
16 compartiments dont le plus long est 635 mn !

Échanges gazeux: rappels & compléments

Composition de l'air (sec) :		mm Hg	bar
O2	20,93%	159	0,21
CO2	0,03%	0	0,00
N2	79,03%	601	0,79
Vapeur d'eau	0,00%	0	0

Calcul PpN_2 classique:
$PpN_2 = 0,8 \times 1 = 0,8$ b

PpN_2 alvéolaire (Bühlmann):
$(1,013 - 0,063) \times 0,79 = 0,75$ b



Air au niveau Alvéolaire :		mm Hg	bar
O2	13,55%	103	0,14
CO2	5,26%	40	0,05
N2	75,00%	570	**0,75**
Vapeur d'eau	6,18%	47	0,063
Total	100%	**760**	1

Sang veineux	mm Hg
O2	44
CO2	45
N2	570
Vapeur d'eau	47
Total	**706**

Sang artériel	mm Hg
O2	95
CO2	40
N2	570
Vapeur d'eau	47
Total	**752**

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

La respiration d'O_2 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 ?

$Y = a * X + b$

$TN_2 = a * Pabs + b$

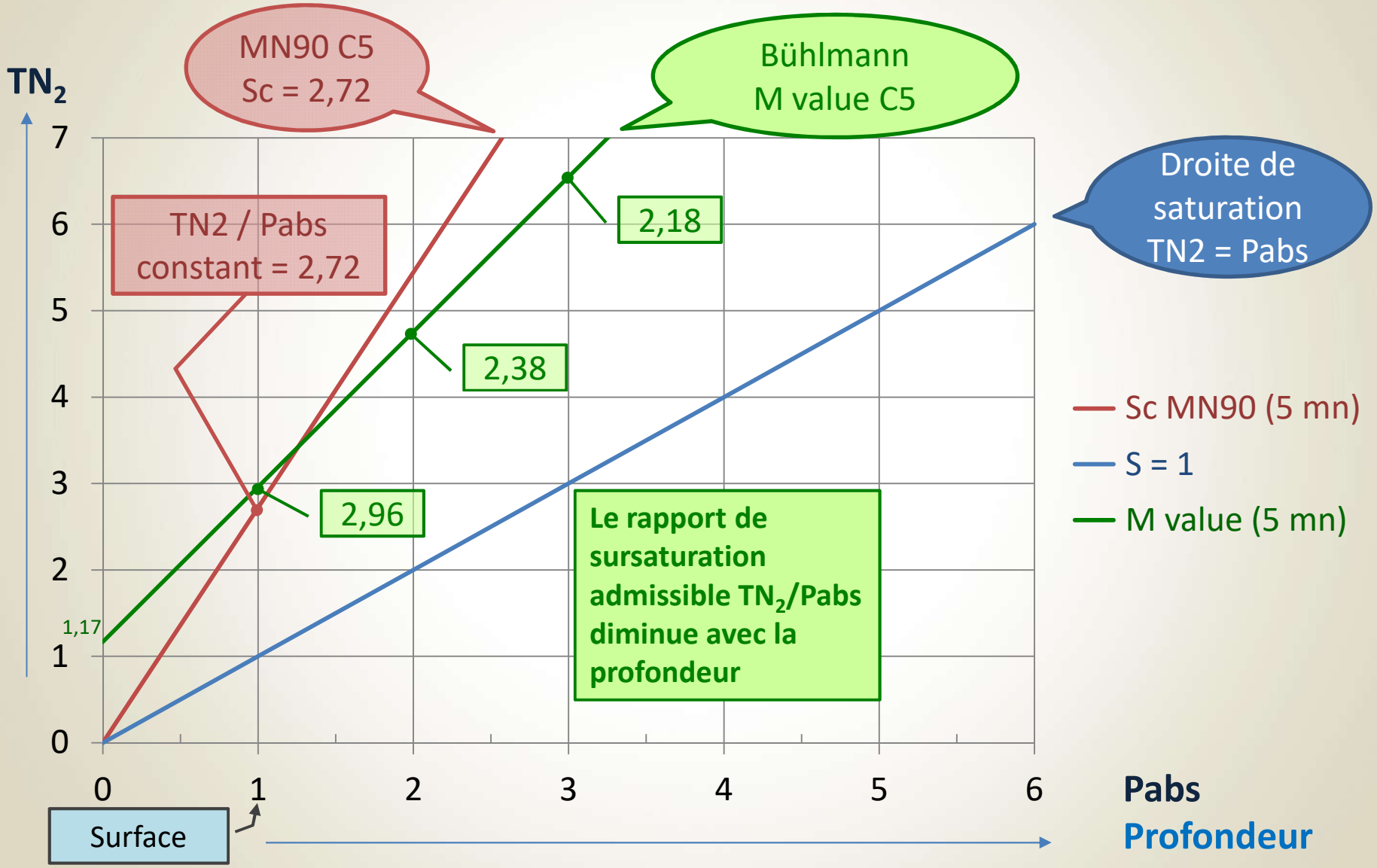
Bühlmann:
a = 1/Coeff b = 1/0,558 = 1,79
b = Coeff a = 1,17

$TN_2 = 1,79*1 + 1,17$ **TN_2 = 2,96 bar**

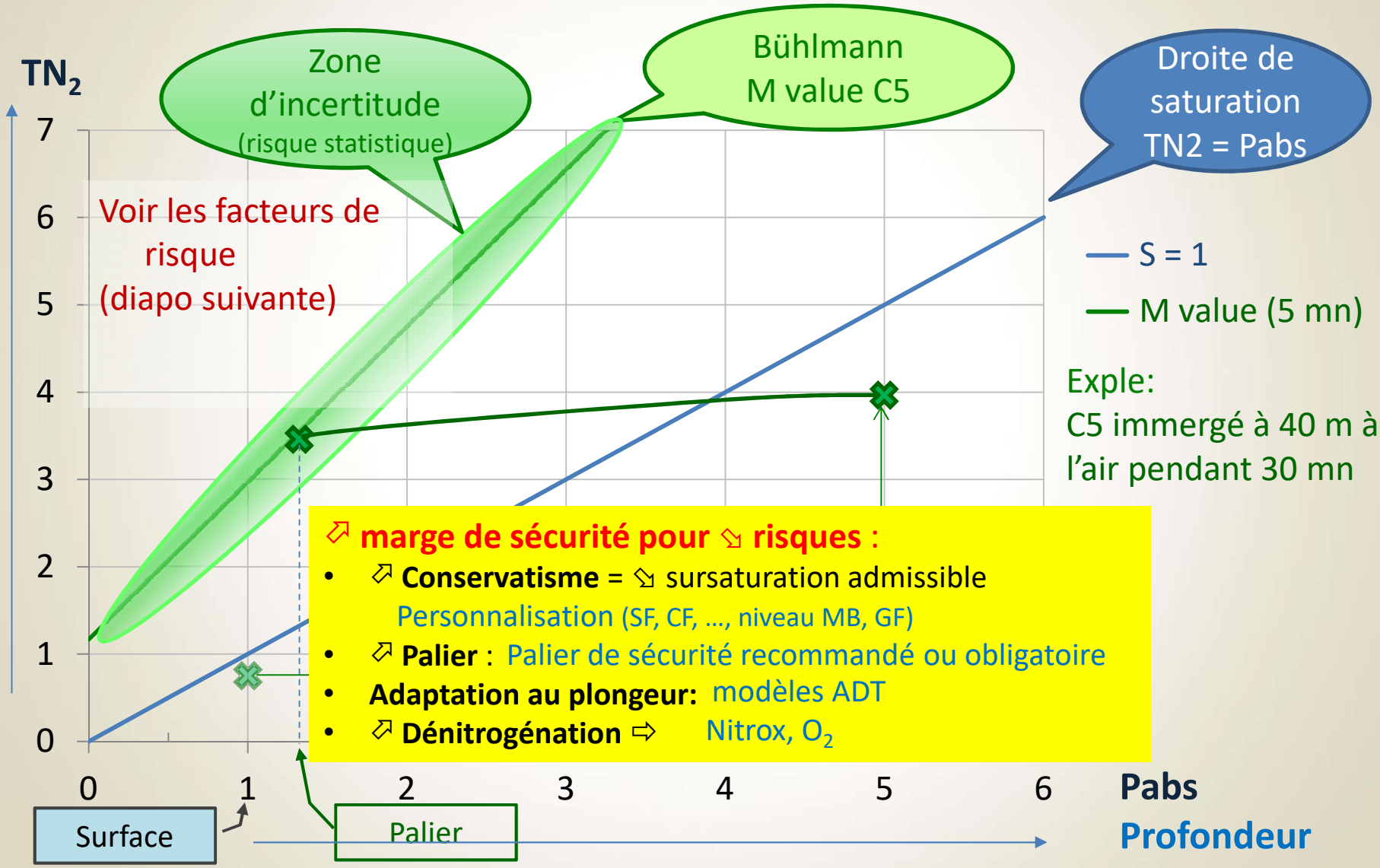
MN90:
a = Sc = 2,72
b = 0

$TN_2 = 2,72*1 + 0$ **TN_2 = 2,72 bar**

Concept des M-values (suite)



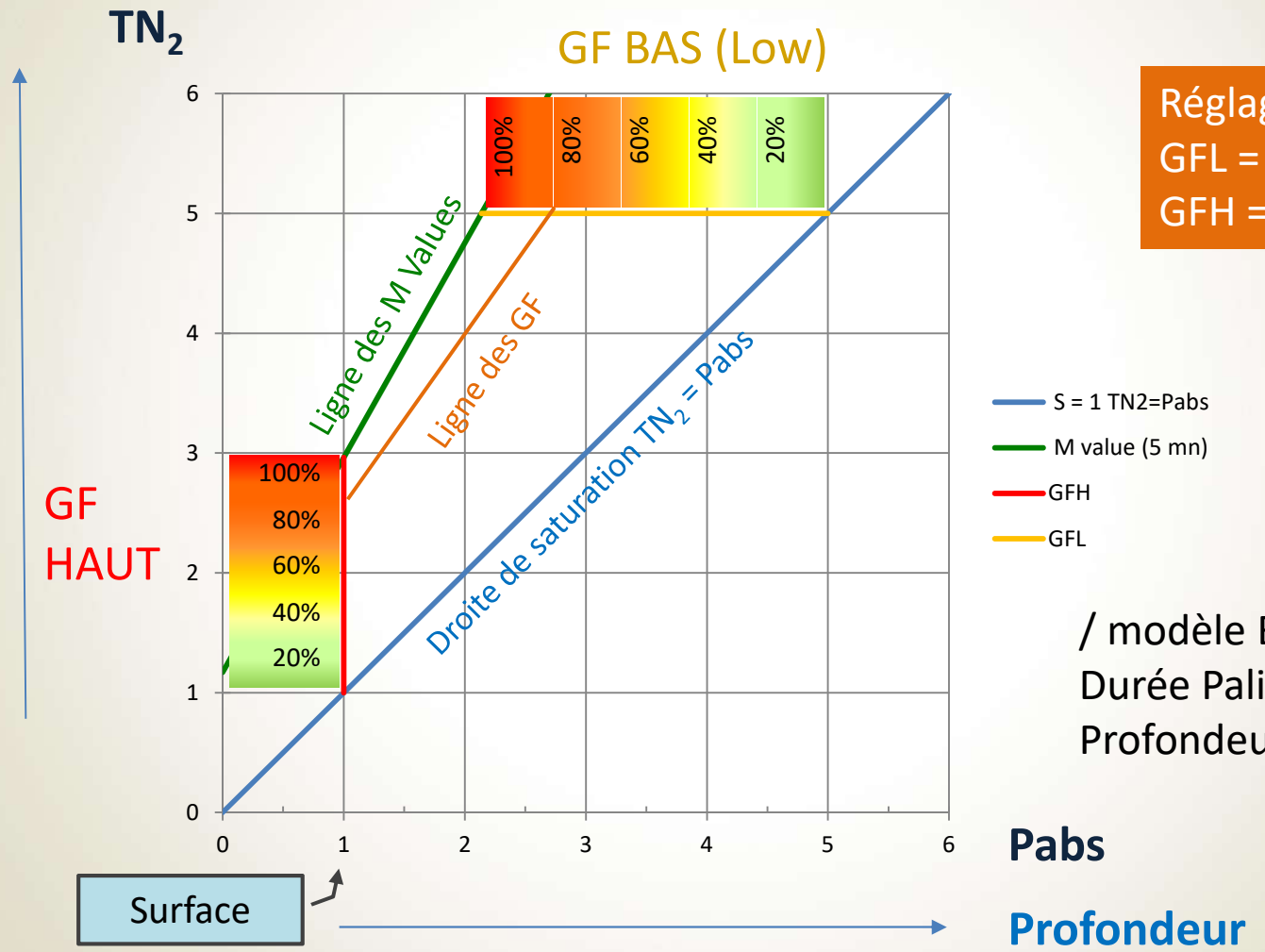
Diminution du risque : principe



Les facteurs de risque

- Risque lié au modèle augmente avec la profondeur et la durée de la plongée
- Facteurs de risque personnel (facteurs favorisant): âge, embonpoint, forme physique, hygiène de vie (alcool, tabac…), médical
- Comportements à risque : efforts pendant la plongée, lors de la remontée et après la plongée (à glotte fermée), apnée après la plongée, avion, altitude, nbre de plongée par jour
- Profils à risque: profils inversés, yo-yo, consécutives, successive rapprochée

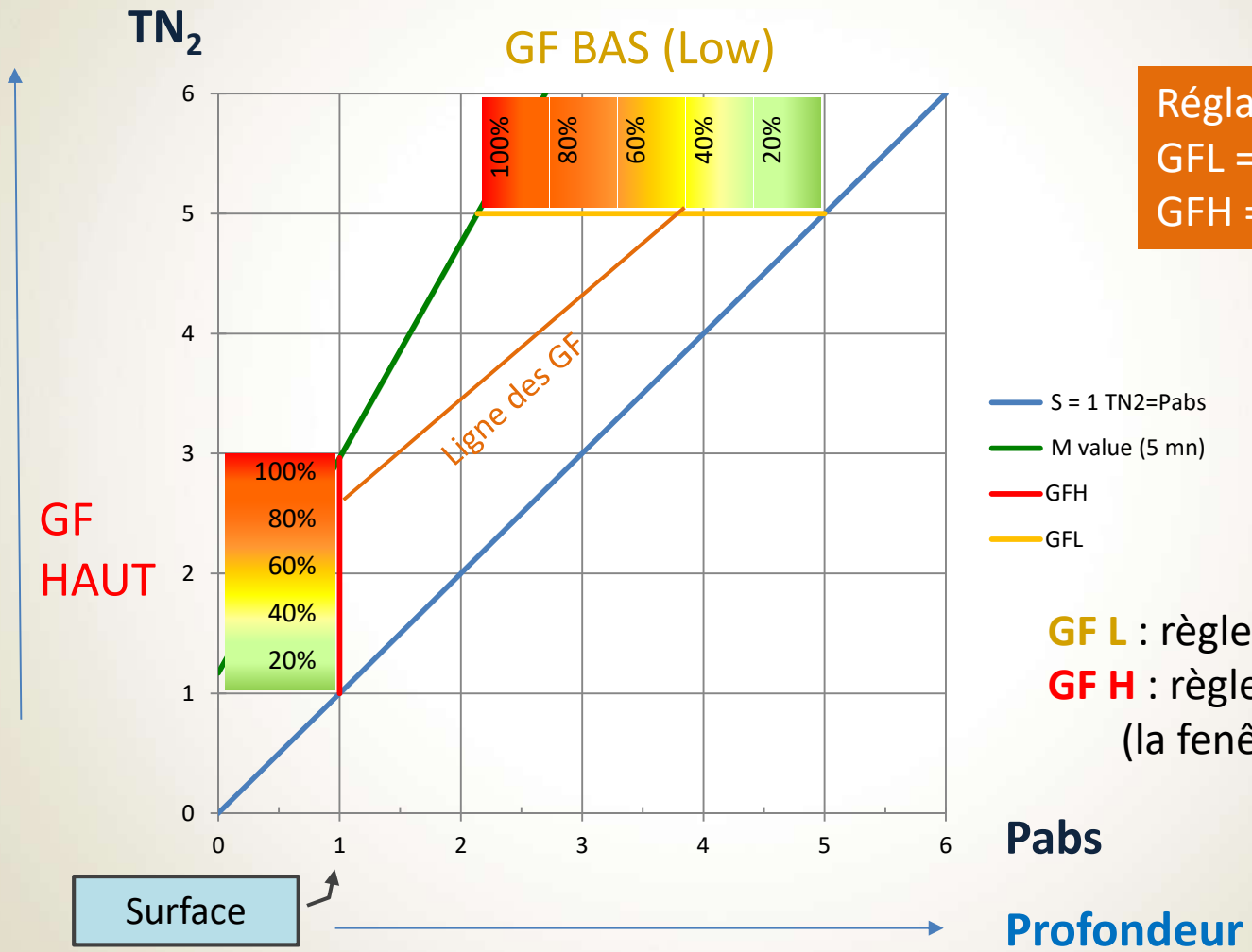
Concept des « Gradient Factor »



Réglage 1
GFL = 80%
GFH = 80%

/ modèle Bühlmann initial :
Durée Palier ⬀
Profondeur Palier ⬀

Concept des « Gradient Factor »



Réglage 2
GFL = 40%
GFH = 80%

GF L : règle le 1er palier
GF H : règle le dernier palier
(la fenêtre de sortie)

Caractéristiques des modèles (néo) Haldanien

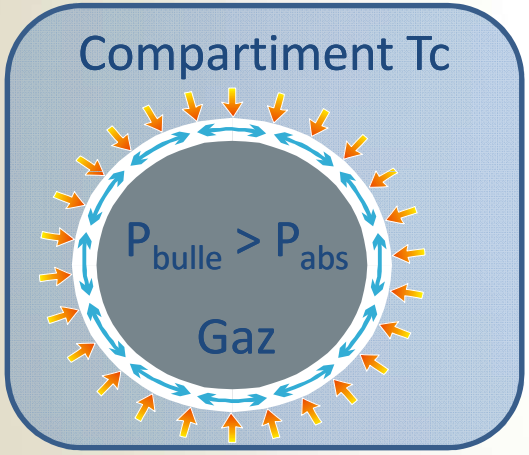
- Air respiré sous pression ⇨ dissolution N_2 dans nombre fini de compartiments qui représentent le plongeur (12 pour MN90, 16 pour Bühlmann)
- Échanges alvéole/sang et sang/compartiment instantanés
- Compartiment défini par:
  - Sa **période** définissant la vitesse de charge / décharge: Plus les compartiments 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** ⇨ **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 <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
- Paliers plus profonds, vitesse plus lente ⇨ 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: ⬊ VdR ⇨ moins de bulles circulantes !
- Actualisation MN90 en 1996: Vitesse inter palier fixée à 6 m/mn
- ⬊ VdR :

  ⬊ le gradient et la sursaturation

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

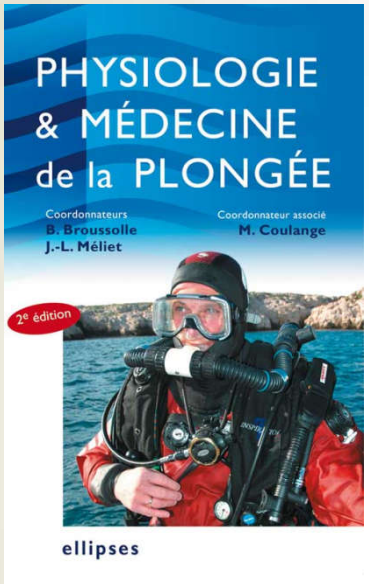
- Modèles à microbulles => VdR ~ 10 m/mn
- Modèles Bühlmann: vitesses variables [20 - 7] m/mn voire [10 - 3] m/mn ou fixe

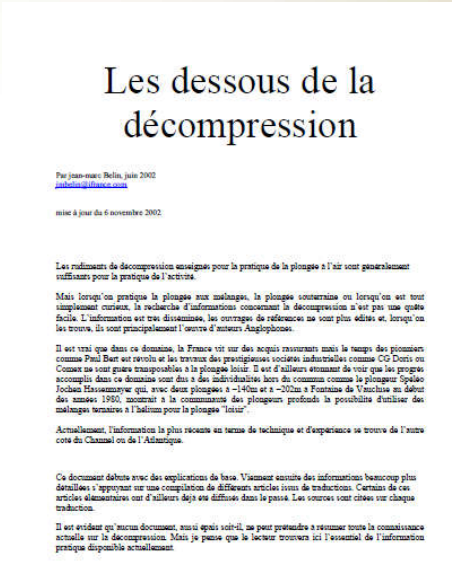
- Comment gérer une VdR trop rapide ? : pas de réponse claire à ce jour

Considérations sur les paliers profonds

Paliers profonds	«**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	Voir article Alain Foret (bibliographie) **Pour les plongées à l'air**, **la pratique des paliers profonds semble contre productive** voire dangereuse en l'état actuel des recherches.
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





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 référence 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 ressurants mais le temps des pionniers comme Paul Bert est révolu et les travaux des prestigieuses sociétés industrielles comme CG 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.

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**			
Pabs		4,5 b	
TN2 initiale		0,8 b	
PpN2 inspirée	= 4,5 x 0,8	3,6 b	
Gradient	= 3,6 - 0,8	2,8 b	

Rappels:

Durée (en nbre de période)	Taux de saturation **Ts**		
	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_2 cherchée	=0,8+1*2,8	=0,8+0,9375*2,8	=0,8+0,75*2,8
	3,60 b	3,43 b	2,90 b
Sc	**2,72**	**2,38**	**2,04**
Pabs Palier : TN_2 /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 TN2 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 :

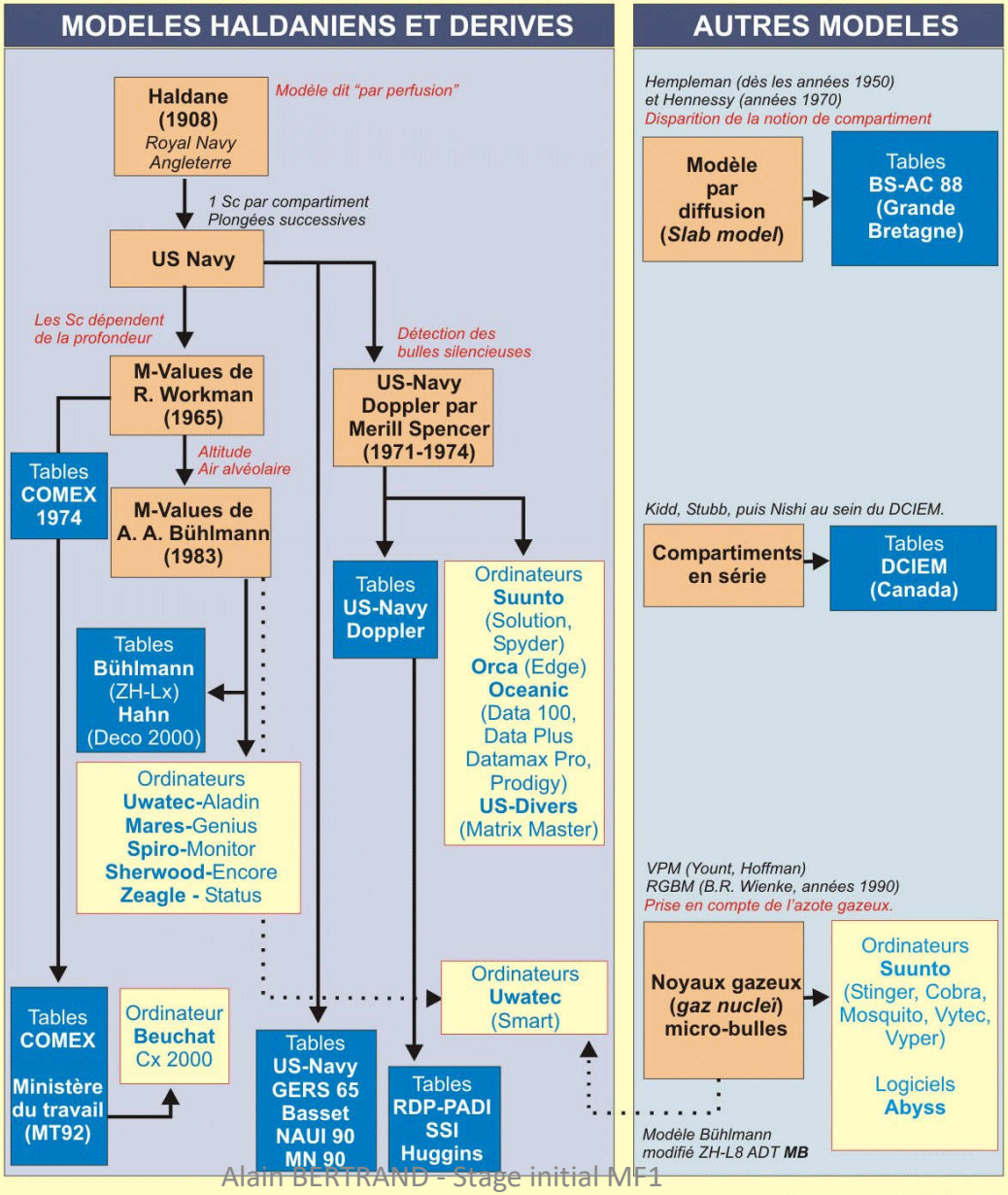
- À partir d'un Intervalle de surface de 15 mn, seul le compartiment **C120** est pris en compte pour la désaturation (**Azote résiduel**)

  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)

TN2 = Sc x Pabs surface = PpN2 = 0,8 x Pabs fond

LES MODELES DE DECOMPRESSION



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