

LA DÉCOMPRESSION

Éléments à savoir pour le MF2

PROPRIÉTÉS DES GAZ

- Période de diffusion d'un gaz dans un tissu inversement proportionnel à la racine carrée de leur masse moléculaire (loi de Graham)
- Chaque gaz à une solubilité propre
- Diffusion :
 - Phénomène lent
 - Au travers de la membrane alvéolo-capillaire
 - Dans le tissu

PERFUSION

- ⊙ Perfusion à profondeur constante :

$$p = p_0 + (P - p_0) \times (1 - e^{-kt}) \quad k = \frac{\ln 2}{T}, e^{-kt} = 0.5^{-\frac{t}{T}}$$

- ⊙ Perfusion à profondeur variable (Schreiner) :

$$p = p_{i0} + R \left(t - \frac{1}{k} \right) - \left(p_{i0} - p_0 - \frac{R}{k} \right) e^{-kt}$$

- R : variation du gaz en fonction de la P_{amb}
- $R = F_i \times V$ [bar/min]
- p_{i0} : pression initiale du gaz inerte respiré
- p_0 : pression du gaz inerte au départ
- Penser à retirer 0.0627bar de p_{H2O}

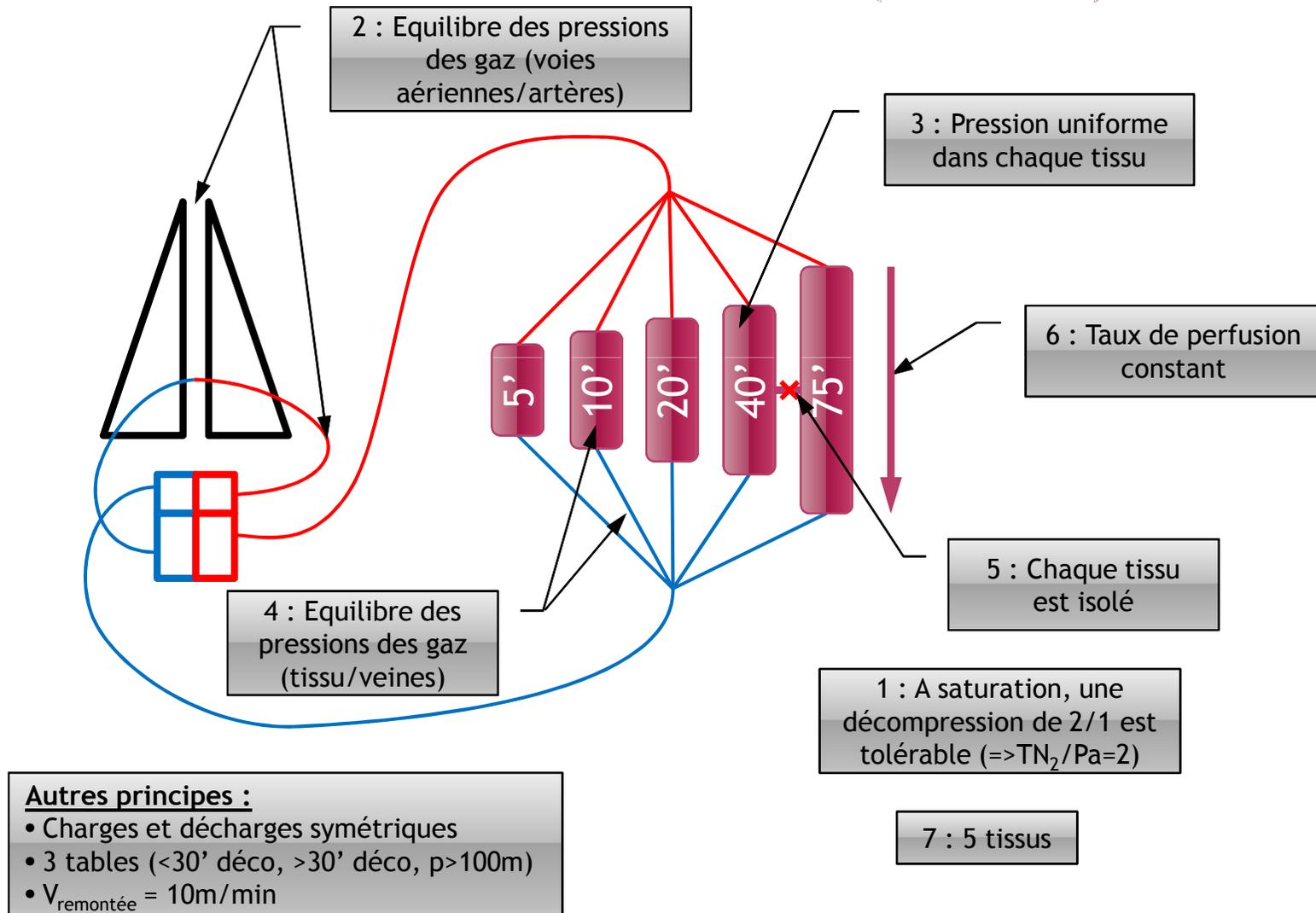
HISTORIQUE - LES BASES

Date	Nom	Description
1644	Toriccelli	Invention du tube barométrique
1653	Pascal	Découverte de la pression
1661	Boyle	Découverte de la compression des gaz
1676	Mariotte	Enoncé de la loi des gaz
1689	Borrelli	Premier scaphandre
1690	Halley	Première cloche
1755	Black	Découverte du CO ₂
1755	Priestley	Découverte de l'O ₂
1774	Lavoisier	Etude du rôle de l'O ₂
1788	Lavoisier	Importance de l'O ₂ dans la vie
1793	Dalton	Loi sur les mélanges gazeux
1796	Klingert	Invention d'un scaphandre
1803	Henry	Loi sur la dissolution des gaz
1928	Dean & Dean	Nouvel équipement de plongée
1840	Siebe	Invention du scaphandre pied lourd (à partir de Dean & Dean)
1841	Trieger	Première description d'un ADD
1854	Pol & Watelle	Etude des ADD, son lien avec la dépression, bénéfice du retour à l'hyperbarie
1861	Bucquoy	Première hypothèse sur les bulles
1869	Vernes	20 000 lieues sous les mers
1878	Bert	« La pression barométrique », synthèse de l'hyperbarie (rôle du CO ₂ et du N ₂ dans les ADD, avantage de l'O ₂ comme traitement, rôle toxique de l'O ₂ sur le SNC)

HISTORIQUE - MODÉLISATION

Date	Nom	Description
1908	Hadane	Modèle et tables de décompression
???	Hills, Leonard	Modèle à diffusion
1939-45	Benhke	Développement de la plongée à l'Héliox
1953	Hempleman	Développement d'un modèle à diffusion
1965	Powell	Mise en évidence du caractère aléatoire des microbulles
1965	Workmann	Introduction des M-Values
1966	Hills, Brian	Modèle sur la thermodynamique des bulles
1970	Spencer	Tables à partir du Doppler
1977	Hennessy & Hempleman	Essai de fusion de perfusion et diffusion, échec
1977	Yount	Modèle à microbulles (VPM)
1960-70	Bühlmann	Adaptation d'un modèle haldanien pour l'altitude (M-Values + prise en compte de la vapeur d'eau dans l'air alvéolaire)
???	Fructus	M-Values pour les tourelles Cx70 (sans vapeur d'eau)
1983	Nishi	Tables DCIEM (perfusion + diffusion, tests au Doppler)
1989	Lambertsen	Publication sur la contre diffusion isobarique + toxicité de l'O2 (UPTD)
1990	Marine Nationale	Publication des tables MN 90
199?	Wienke	Création du modèle RGBM à partir du modèle VPM
1992	Imbert	Création des tables MT 92
1997	Heminway	Création du logiciel V-Planner à partir de VPM

MODÈLE HALDANIEN (1908)



HEMPLEMAN, WORKMAN

◉ Hempleman (1958) :

- Modèle par diffusion
- Décharge 1.5 × plus lente que la charge
- Définition d'une quantité de N₂ accumulée :

$$QN_2 = P\sqrt{t}$$

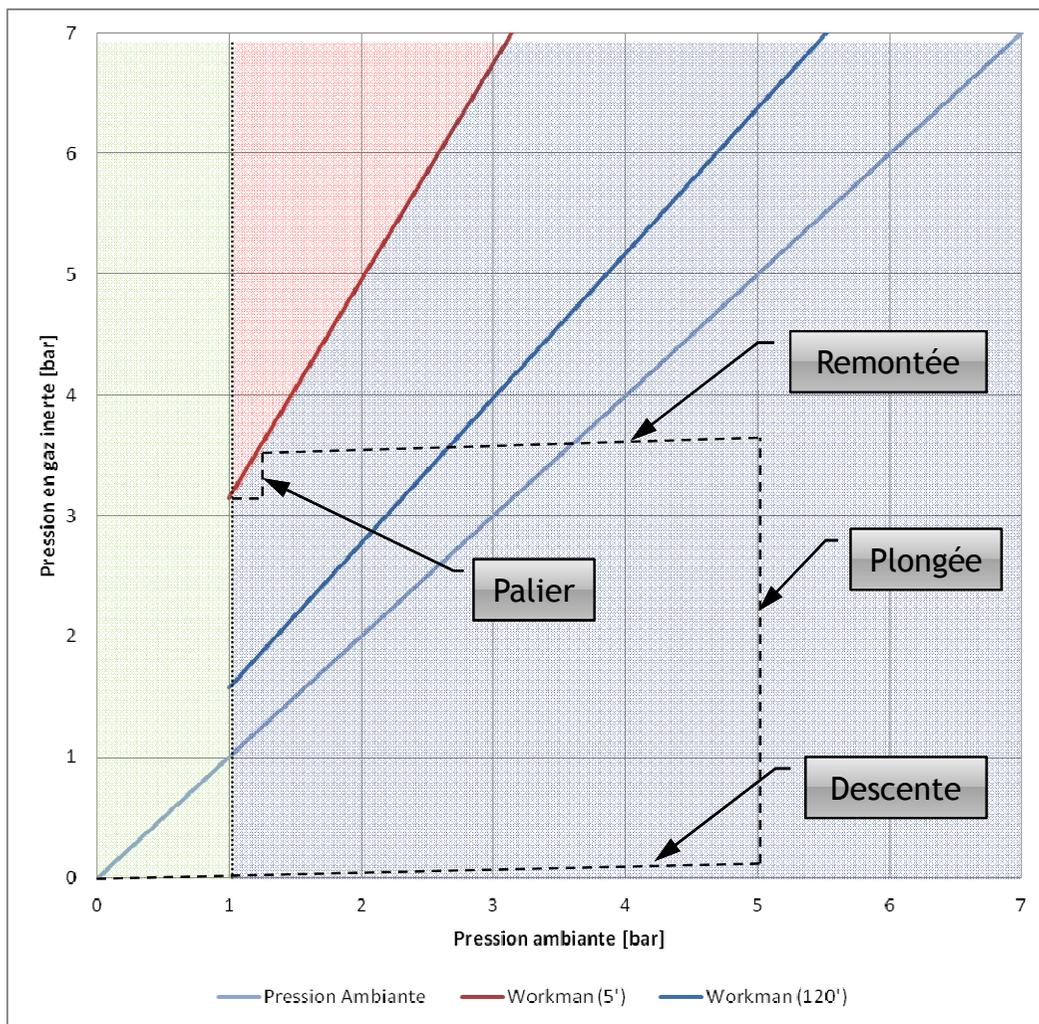
- Seuil critique à Q = 500 (en dessous, sécu)
- Phénomène lent (diffusion prédominante)

◉ Workman (1965) :

- Création des M-Values (Sc variant avec la profondeur)
- Vitesse de remontée de 18m/min

M-VALUES

COMMENT ÇA MARCHE ?



Exemple pour le compartiment 5' :

- Surface
- Pas de palier
- Palier

SPENCER, YOUNT

⊙ Spencer (1970) :

- Mise en évidence des bulles circulantes
- Utilisation du Doppler
- Première courbe de sécurité :

$$P = 490 \times t^{-0.51} \quad t \approx \left(\frac{465}{P} \right)^2$$

⊙ Yount (1977) :

- En parallèle aux travaux de Hennessy et Hempleman qui essaie de fusionner perfusion et diffusion
- Créé le modèle VPM

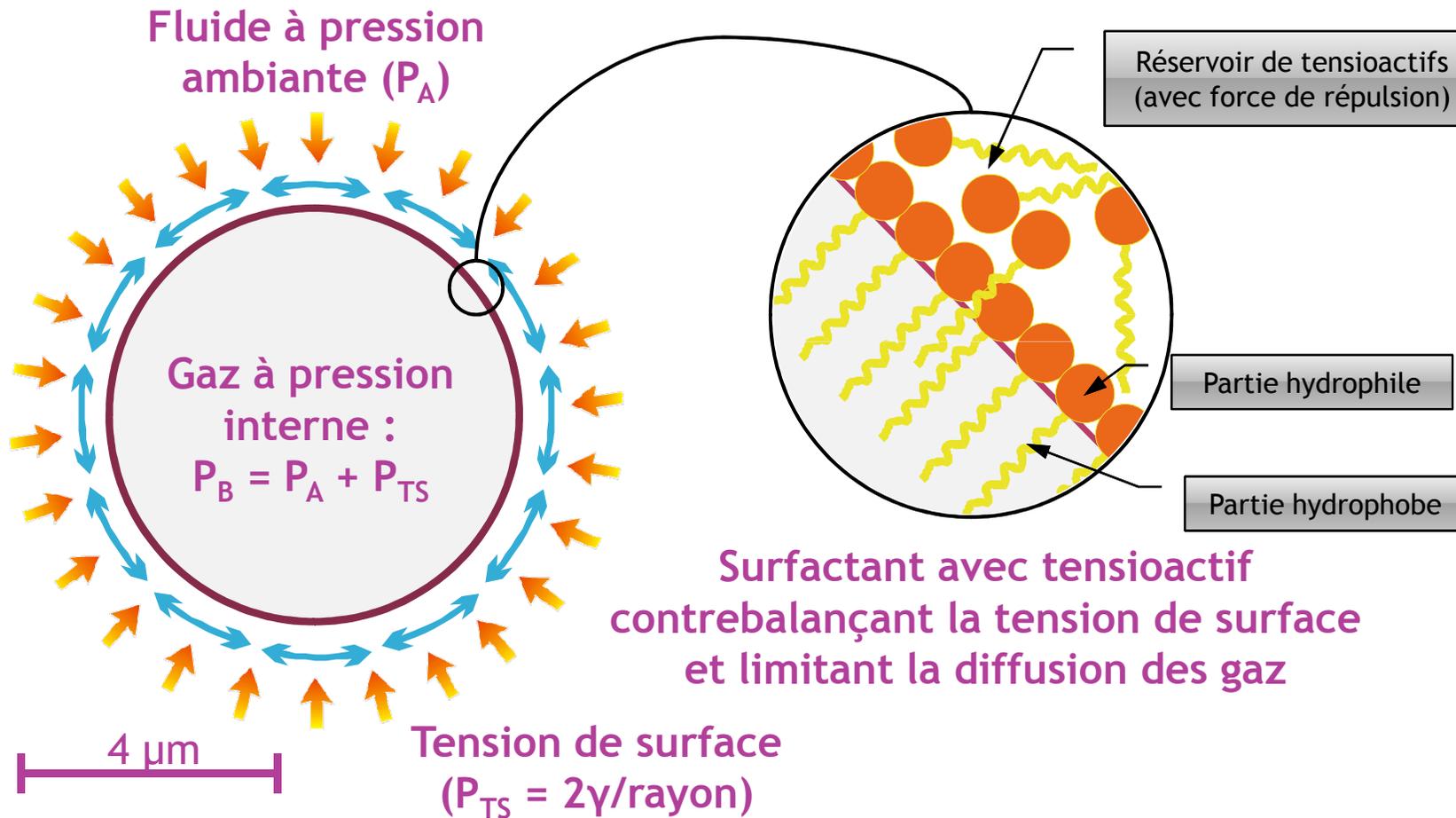
VPM - HYPOTHÈSES

- Paramètres initiaux :
 - Nombre de noyaux gazeux fixe
 - Taille de la bulle
- Propriétés des bulles :
 - Perméables jusqu'à un certain point (imperméabilité atteinte à 9bar)
 - Avec une membrane (interface fluide / liquide)
 - Élastique et avec mémoire (cherche à revenir à l'état initial)
- Ne tient pas compte de la dissolution des gaz

VPM

- ⊙ Evolution de la bulle suivant :
 - Mariotte
 - Tension superficielle
 - Surfactant (limite la réduction des bulles)
- ⊙ Nombre de bulles maxi tolérable
 - N1 supportable indéfiniment
 - $N2 > N1$ supportable temporairement

VPM - VIE D'UNE BULLE



EQUILIBRE DES FORCES

Répulsion du surfactant

Attractions chimiques et électriques

$$P_{\text{bulle}} + 2\gamma_c / \text{rayon} - B = P_{\text{amb}} + 2\gamma / \text{rayon}$$

Tension de surface

⊙ $P(\text{bulle}) = P(\text{gaz dissout})$

⊙ $B = \text{cte}$

⊙ Réduction d'une bulle : $r_{\text{réduit}} = \frac{1}{\frac{P_{\text{réduit}}}{2(\gamma_c - \gamma)} + \frac{1}{r_0}}$

EVOLUTION DES BULLES

⊙ Grossissement :

- Bulle comprimée => écrasement du surfactant jusqu'à une certaine limite où les molécules de surfactant quittent la bulle
- Stabilisation de la bulle à un rayon inférieur

⊙ Ecrasement :

- Uniquement lorsque $P_{\text{dissous}} - P_{\text{bulle}} > 2\gamma/\text{rayon}$
- Plus la bulle est petite, plus elle est difficile à faire grossir

VPM

◉ Éléments notables :

- Paliers profonds, raccourcissement des paliers proches de la surface
- Importance de la planification (O2)
- Influence de la vitesse de compression
- Efforts créent des noyaux gazeux (non pris en compte)

GENÈSE DES MICRO NOYAUX

- Inexistant dans milieux purs
- Formés de CO₂
- Création par :
 - Cavitation (augmentation de la vitesse)
 - Tribonucléation (chute de pression locale, séparation de 2 « plaques »)
 - Bulles de CO₂ capillaires (limité par le NO qui lisse les parois des vaisseaux)

ÉLÉMENTS NOTABLES GÉNÉRAUX

- Une bulle à plus de chance de grossir dans un milieu d'azote que d'hélium (solubilité plus importante du N₂)
- Utilisation de l'O₂ :
 - Augmente le gradient de l'azote
 - Limité par l'effet vasoconstricteur de l'O₂
 - Action anti-inflammatoire
- TODO : expliquer la contre-diffusion isobare par la théorie des bulles

BÜLHMANN (ZH-L16)

- Prise en compte de l'air alvéolaire (primordial en altitude):

pp (mmHg)	Inspiré	Alvéolaire
O ₂	159	104
N ₂	600	569
CO ₂	0.3	40
H ₂ O	0	47
Total	760	760

- Basé sur les M-Values
- 16 compartiments, 2 jeux de coefficients par compartiment (N₂ et He) contenant période propre et M-values

COEFFICIENTS ZH-L16A/C

$$P_{amb\ tol} = (P_{comp} - a) \times b$$

C	N ₂ (ZH-L16C)			He (ZH-L16A)		
	T	a	b	T	a	b
1	4	1.2599	0.5050	4.0	0.5050	0.4245
1b	5	1.1696	0.5578	5.0	0.5578	0.4770
2	8	1.0000	0.6514	8.0	0.6514	0.5747
3	12.5	0.8618	0.7222	12.5	0.7222	0.6527
4	18.5	0.7562	0.7785	18.5	0.7562	0.7223
5	27	0.6200	0.8126	27.0	0.6200	0.7582
6	38.3	0.5043	0.8434	38.3	0.5043	0.7957
7	54.3	0.4410	0.8693	54.3	0.4410	0.8279
8	77	0.4000	0.8910	77.0	0.4000	0.8553
9	109	0.3750	0.9092	109.0	0.3750	0.8757
10	146	0.3500	0.9222	146.0	0.3500	0.8903
11	187	0.3295	0.9319	187.0	0.3295	0.8997
12	239	0.3065	0.9403	239.0	0.3065	0.9073
13	305	0.2835	0.9477	305.0	0.2835	0.9122
14	390	0.2610	0.9544	390.0	0.2610	0.9171
15	498	0.2480	0.9602	498.0	0.2480	0.9217
16	635	0.2327	0.9653	635.0	0.2327	0.9267

Plus grande diffusivité de l'Hélium
Plus faible solubilité de l'Hélium

Tabelle 26. Die Koeffizienten ZH-L16 für N₂

Kompartiment Nr.	t _{1/2} N ₂ [min]	ZH-L16A „theoretisch“		ZH-L16B Tabelle	ZH-L16C Computer
		b	a	a	a
1	4,0	0,5050	1,2599	1,2599	1,2599
1b	5,0	0,5578	1,1696	1,1696	1,1696
2	8,0	0,6514	1,0000	1,0000	1,0000
3	12,5	0,7222	0,8618	0,8618	0,8618
4	18,5	0,7825	0,7562	0,7562	0,7562
5	27,0	0,8126	0,6667	0,6667	0,6200
6	38,3	0,8434	0,5933	0,5600	0,5043
7	54,3	0,8693	0,5282	0,4947	0,4410
8	77,0	0,8910	0,4701	0,4500	0,4000
9	109,0	0,9092	0,4187	0,4187	0,3750
10	146,0	0,9222	0,3798	0,3798	0,3500
11	187,0	0,9319	0,3497	0,3497	0,3295
12	239,0	0,9403	0,3223	0,3223	0,3065
13	305,0	0,9477	0,2971	0,2850	0,2835
14	390,0	0,9544	0,2737	0,2737	0,2610
15	498,0	0,9602	0,2523	0,2523	0,2480
16	635,0	0,9653	0,2327	0,2327	0,2327

108 Theoretische Toleranzgrenzen und experimentelle Ergebnisse

Tabelle 27. Die Koeffizienten ZH-L16A für Helium

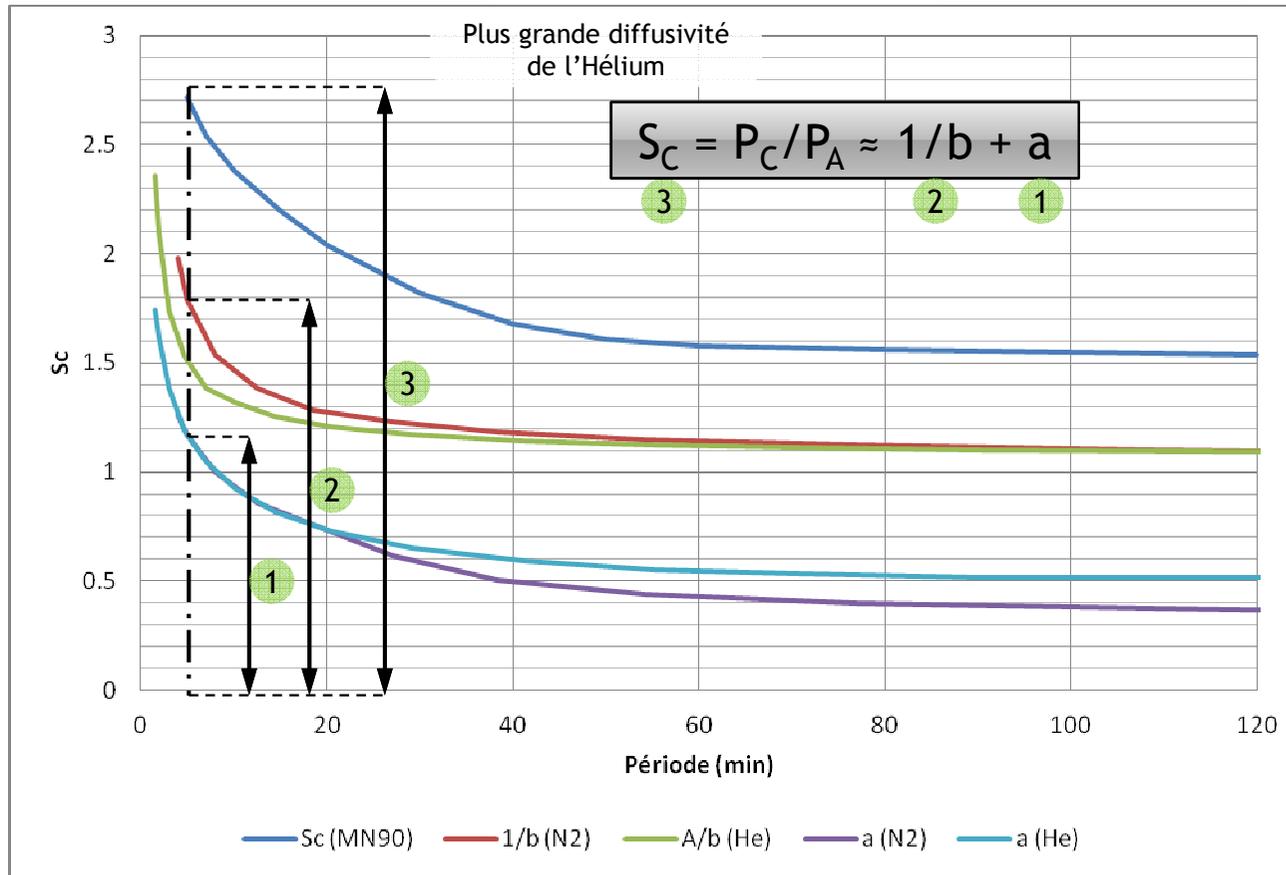
Kompartiment Nr.	t _{1/2} He [min]	Koeffizient	
		b	a
1	1,51	0,4245	1,7424
1b	1,88	0,4770	1,6189
2	3,02	0,5747	1,3830
3	4,72	0,6527	1,1919
4	6,99	0,7223	1,0458
5	10,21	0,7582	0,9220
6	14,48	0,7957	0,8205
7	20,53	0,8279	0,7305
8	29,11	0,8553	0,6502
9	41,20	0,8757	0,5950
10	55,19	0,8903	0,5545
11	70,69	0,8997	0,5333
12	90,34	0,9073	0,5189
13	115,29	0,9122	0,5181
14	147,42	0,9171	0,5176
15	188,24	0,9217	0,5172
16	240,03	0,9267	0,5119

LIEN AVEC LES MN90 ?

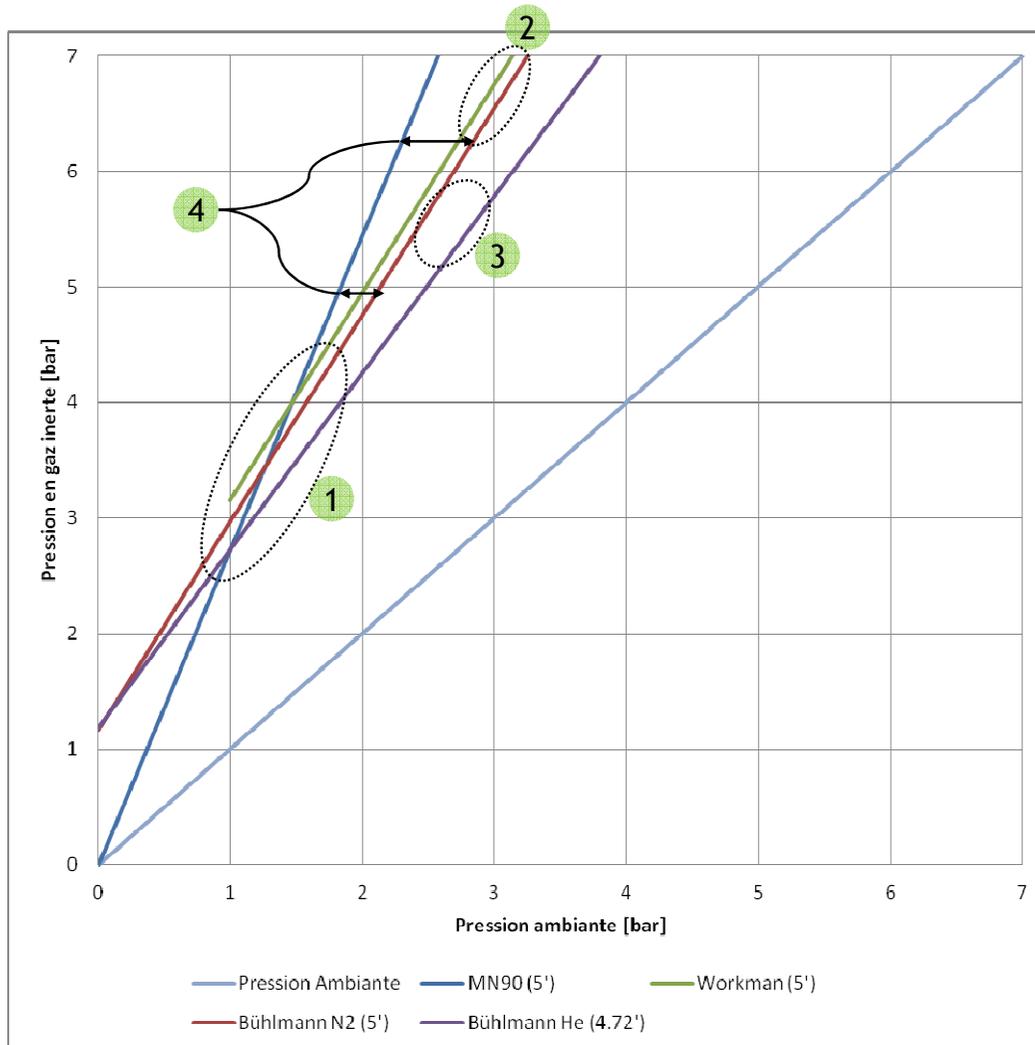
$$P_C/P_A = 1/b + a/P_A$$

Exemple à 1bar

$$S_C = P_C/P_A$$



COMPARATIF DE M-VALUES



1. Proche de la surface, sensiblement identique
2. Workman et Bülmhann relativement proches
3. Paliers profonds à l'hélium
4. Sc équivalent variable avec la profondeur

THALMANN, DCIEM

- ◎ Thalmann (1984) :
 - Modèle à charge/décharge asymétrique :
 - Charge exponentielle
 - Décharge linéaire
 - Implémenté sur des ordinateurs
 - Paliers fortement ralongés
- ◎ DCIEM (Defense and Civil Institute of Environmental Medicine - 1986) :
 - Tissus avec interaction (compartiments en série)
 - Profils testés par Doppler

WIENKE, MÉLIET

◉ Wienke (1991):

- Crée un modèle commercial (RGBM - Reduced Gradient Bubble Model)
- Basé sur Haldane + Yount
- Intègre noyau gazeux, $T_{max} = 720'$

◉ Méliet (1992) :

- Phénomènes de perfusion et diffusion
- Compartiments en série
- Décharge avec latence
- (se renseigner sur ce modèle)

VITESSE DE REMONTÉE

⊙ Différents standards (à l'air) :

- 15 à 17 m/min MN90
- 15 m/min BSAC (tables anglaises)
- 12 m/min COMEX, MT, US Navy,
- 10 m/min Tables Suisses
- 9 m/min SSI

⊙ Etude Marseillaise :

- 17m/min, trop rapide ?

