

Plongées profondes aux mélanges et décompression

Photos de Laurent Ballesta

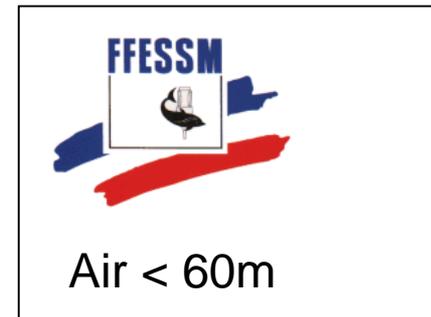
(sauf précision contraire)

issues de son dernier livre "Planète Mers" ed.
Michel Lafon

Plongées profondes

Le littoral de 0 à -60m

- La cote est connue
- Les techniques sont maîtrisées
- Les formations sont éprouvées



Plongées profondes

Le littoral au-delà de 60m

- Ces zones sont désormais accessibles
- De nouvelles explorations sont possibles
- Il existe des territoires vierges
- La beauté existe même à grande profondeur



Tx élémentaire 70m
Tx « tout court » 120m

Plongées profondes

Par jean-marc Belin

Le littoral au-delà de 60m est accessible

- Mais il va falloir adapter les techniques
- Et ça va coûter cher, C'est le prix de l'autonomie



Par jean-marc Belin

Plongées profondes

Les gaz

- Grandes quantités
- Différents mélanges pour différentes zones



$0,16b < PpO_2 < 1,6b$
TX élémentaire : $O_2 > 18\%$

Plongées profondes

Les gaz

L'air :

L'air n'est pas utilisé pour les plongées profondes (sauf bouée et combi) :

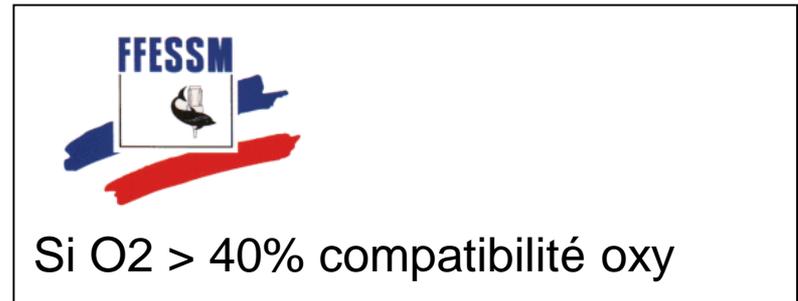
- Narcose due à l'azote (qui limite l'intervention entre 35 et 60 mètres selon durée et effort)
- Risque d'essoufflement accru avec la profondeur
- 20% d'oxygène (trop en profondeur et trop peu près de la surface)

Plongées profondes

Les gaz

L'oxygène :

- PpO₂ mini 0.16b, dans la réalité : 0.7b
- PpO₂ maxi : 1.6b, dans la réalité :
fond 1.0 à 1.4b
déco 1.6b
- Toxicité : attention au couple
PpO₂/durée
- Délicat à manipuler (dégraissage,
transfert lent, ...)



Plongées profondes

Les gaz

L'hélium :

- Pas d'effet narcotique jusqu'à 16b
- SNHP possible à partir de 150 mètres
- Environ 5 fois moins « lourd » que N_2 (poids du bloc)
- Aisance respiratoire (repousse l'essoufflement)
- Diffuse très rapidement (2,65 fois plus vite que N_2)
- Dissolution inférieure à l'azote
- Déperdition calorifique importante (air dans la combi)
- Coût élevé (avantage au recycleur)

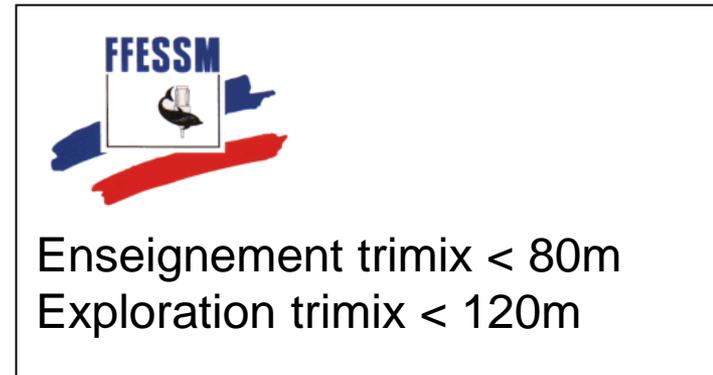


Plongées profondes

Les gaz

Gaz fond

- PpO_2 fond entre 1.0 et 1.4b
- équivalent air (narcose et essoufflement) entre 25 et 35m
- Exemples
 - jusqu'à 80 mètres : Tx15/50 (PpO_2 fond = 1.35b EAD = 29m)
 - jusqu'à 120 mètres : Tx10/70 (PpO_2 fond = 1.30b EAD = 23m)



Plongées profondes

Les gaz

Gaz Déco

- Oxy pur à -6m
- Mélanges intermédiaires :
PpO₂ entre 0.7b et 1.6b
Pas de nouvelle charge d'azote
- Exemples
fond à 80 mètres Tx15/50 On peut remonter jusqu'à 36m puis Tx35/30 jusqu'à 6m, puis oxy pur

fond à 120 mètres Tx10/70 il faudra 2 mélanges intermédiaires

Plongées profondes

Les gaz

Gaz Descente

Le trimix est hypoxique, il faut un gaz pour descendre :

Éviter l'oxygène, pas de marge

Employer un des gaz de déco

Plongées profondes

Les gaz

Fabrication

- dégraissage du matériel recevant de l'oxygène
- introduire oxygène en premier
- introduire hélium en second
- compléter avec l'air

- Homogénéisation



Marquage des blocs

Plongées profondes

Les gaz

Le marquage/analyse

- convention : Tx15/50
- prof max d'utilisation
- éventuellement pression
- Nom du proprio si équipe nombreuse
- le reste n'a rien à faire sur le bloc (date, ...)



Plongées profondes

Les gaz

Le gaz pour la bouée et la combinaison

Air ou argon

bouteille de 2 litres

détendeur + flexible direct system

soupape de surpression (ou poséïdon avec soupape)

Plongées profondes

La décompression

Règles générales (stratégie)

- Choix des gaz essentiel
- Remontée lente 9m/mn
- plus il y a d'hélium, plus les paliers sont profonds
- palier de 6m à l'oxy puis remontée lente à la surface
- repos en surface 10' avant de sortir
- pas d'effort immédiat
- hydratation

Plongées profondes

La décompression

Les outils actuels

- Tables (IANTD, ...)
- Logiciels
- Ordinateurs (VR3, HS-Explorer)



Tx élémentaire : tables à venir (utilisation procédures air + oxy)

Trimix « tout court » : tables ou ordinateurs ou logiciels (liste)

Plongées profondes

La décompression

**Nés d'un Besoin :
la plongée avec de l'hélium ! Courte, profonde avec décompression dans
l'eau.**

- Septembre 1981, Jochen Hasenmayer atteint -145m à la Fontaine du vacluse.
2 ans plus tard, il atteint la profondeur incroyable de 202 mètres (seul !)
- Avril 1988 Sheck Exley atteint 234 mètres (780 pieds) au Rio Mante
(Mexique)

Décompression maison vaguement extrapolée des procédures US. Navy

Plongées profondes

La décompression

Logiciels développés par des amateurs éclairés :

•Dr.X (Sheck Exley)

Zplan (William M. Smithers)

Decoplanner (Global Underwater Explorer, Erik Baker)

GAP (Kees Hofwegen & Peter Fjelsten)

Abyss (Abyssmal Diving Inc, Christopher Parett)

Vplanner (Ross hemingway)

Plongées profondes

La décompression

Ces logiciels ont pu voir le jour grâce :

- au développement du micro-ordinateur
- aux connaissances informatiques de leurs concepteurs
- Aux modèles disponibles :
 - Bühlmann
 - VPM (Yount & Hoffman) / RGBM (Wienke)



Connaître les outils et
les modèles

Plongées profondes

La décompression

Le succès du modèle Bühlmann

Un modèle testé pour l 'azote et l 'hélium

Un modèle se prêtant bien à l 'algorithmique

Un modèle publié en Allemand et en Anglais

(Tauchmedizin)

Plongées profondes

La décompression

Le Modèle Bühlmann (Haldane - Workman - ...)

16 compartiments : **pour chacun d'eux :**

1 périodes pour N₂ et 1 droite de sursaturation max

1 périodes pour He et 1 droite de sursaturation max

1 équation de calcul de charge :

$$P = P_0 + (P_i - P_0) (1 - 2^{-(t/\text{période})}) \text{ (bühlmann)}$$

$$P = P_{i0} + R(t - 1/k) - [P_{i0} - P_0 - (R/k)]e^{-kt} \text{ (Schreiner)}$$

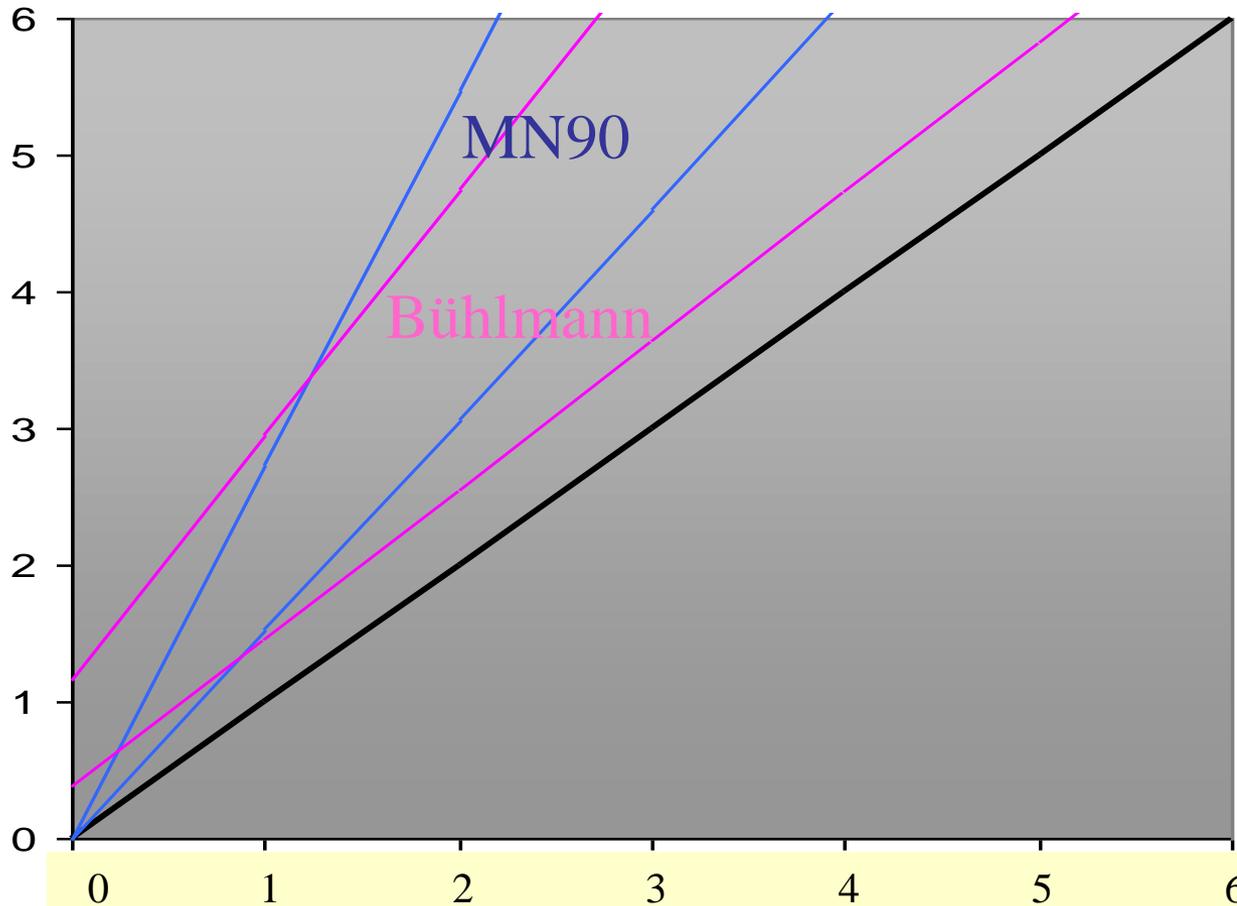
1 équation (de droite) pour le calcul de sursaturation max :

$$\text{Sursaturation max (M_value)} = P_{abs} * (1/b) + a$$

Buhlmann ZH-L16 M-values hélium (1990)				Buhlmann ZH-L16 M-values azote (1990)					
Cpt N°	Per. min	Coeff a	Coeff b	Cpt N°	Per. min	A Coeff a bar	B Coeff a bar	C Coeff a bar	Coeff b
1	1,51	1,6189	0,4245	1	4,0	1,2599	1,2599	1,2599	0,5050
1b	1,88		0,4770	1b	5,0	1,1696	1,1696	1,1696	0,5578
2	3,02	1,3830	0,5747	2	8,0	1,0000	1,0000	1,0000	0,6514
3	4,72	1,1919	0,6527	3	12,5	0,8618	0,8618	0,8618	0,7222
4	6,99	1,0458	0,7223	4	18,5	0,7562	0,7562	0,7562	0,7825
5	10,21	0,9220	0,7582	5	27,0	0,6667	0,6667	0,6667	0,8126
6	14,48	0,8205	0,7957	6	38,3	0,5933	0,5933	0,5600	0,8434
7	20,53	0,7305	0,8279	7	54,3	0,5282	0,5282	0,4947	0,8693
8	29,11	0,6502	0,8553	8	77,0	0,4710	0,4710	0,4500	0,8910
9	41,20	0,5950	0,8757	9	109	0,4187	0,4187	0,4187	0,9092
10	55,19	0,5545	0,8903	10	146	0,3798	0,3798	0,3798	0,9222
11	70,69	0,5333	0,8997	11	187	0,3497	0,3497	0,3497	0,9319
12	90,34	0,5189	0,9073	12	239	0,3223	0,3223	0,3223	0,9403
13	115,29	0,5181	0,9122	13	305	0,2971	0,2971	0,2850	0,9477
14	147,42	0,5176	0,9171	14	390	0,2737	0,2737	0,2737	0,9544
15	188,24	0,5172	0,9217	15	498	0,2523	0,2523	0,2523	0,9602
16	240,03	0,5119	0,9267	16	635	0,2327	0,2327	0,2327	0,9653

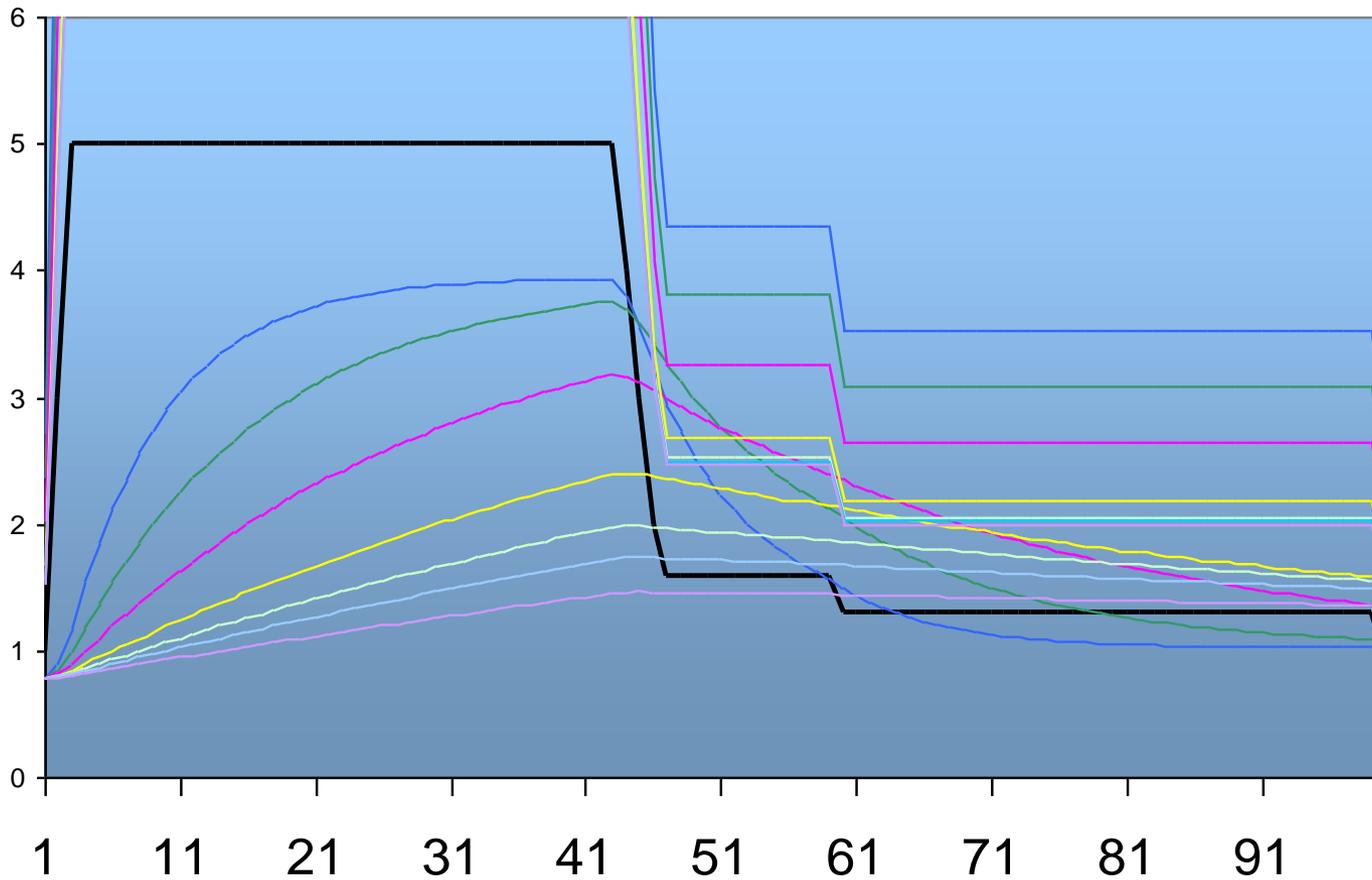
Plongées profondes

La décompression



Plongées profondes

La décompression



Plongées profondes

La décompression

Decoplanner

modèle Haldanien

M_values Bühlmann

Paliers profonds

Multi-gaz

Commercialisé par GUE

Global Underwater
Explorer

The screenshot shows the 'Decompression Planner' software interface. The title bar reads 'Decompression Planner - [Mission: 1 Dive: 1]'. The menu bar includes 'File', 'Options', 'Dive', 'Tools', 'Graph', 'Window', and 'Help'. There are three main sections: 'Depth Plan (Metres)', 'Deco Gas', and 'Gas Plan', each with a 'Clear' button. The 'Depth Plan' table has columns for Depth, Time, O2, He, PPO2, and Ceil. The 'Deco Gas' table has columns for Depth, O2, and He. The 'Gas Plan' table has columns for Size, O2, He, MOD, Res, Litres, and BAR. Below these is a summary line: 'Dive Plan: ZHL16C Safety: OFF Descent: Normal'. The main table has columns for Depth, Time, O2%, He%, Start, End, PPO2, Gas, Gas Req'd, GF%, MVal%, CNS%, and OTU's. The data rows are as follows:

Depth	Time	O2%	He%	Start	End	PPO2	Gas	Gas Req'd	GF%	MVal%	CNS%	OTU's
40	20	21	0	4	20	1.05	20	2400	0	14	7	18.53
6	8	21	0	24	31	0.34	17	218	100	88	8	20.03
0				32					100	99		

Plongées profondes

La décompression

Gas Absorption Program

modèle Haldanien

M_values Bühlmann

Paliers profonds

Multi-gaz

(version RGBM)

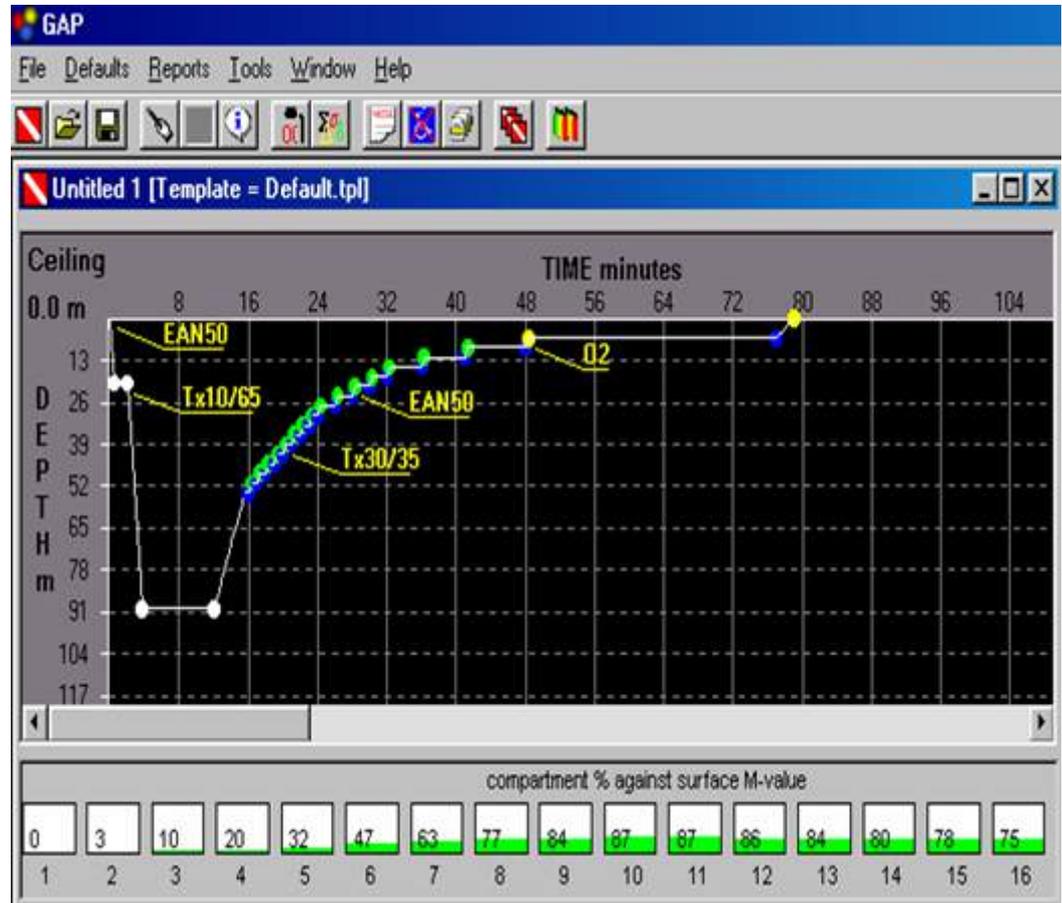
Logiciel gratuit

<http://www.gap-software.com/>

Gas Absorption Program

Version 1.2 Build:298

Copyright © 1998-2000 Kees Hofwegen, Peter Fjelsten



Plongées profondes

La décompression

Abyss

modèle Haldanien

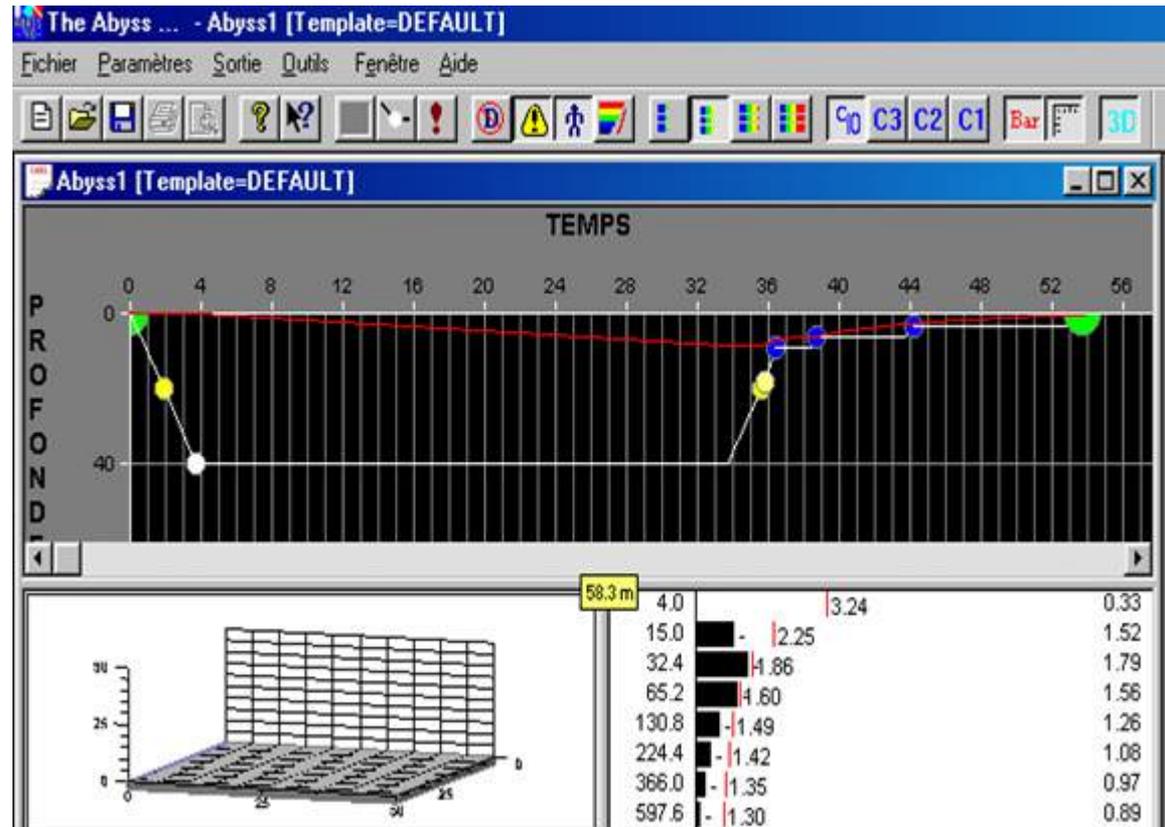
Existe une version RGBM

M_values

Bühlmann/Abyss

Multi-gaz (O_2 , N_2 , He, Ne, Ar)

Logiciel commercialisé
par Abyss



Plongées profondes

Par F. Maxant

La décompression

Paramétrage

- Vitesse de descente et de remontée
- Profondeur du dernier palier (6 mètres ou 3 mètres)
- Altitude
- consommations en plongée et au palier
- système métrique ou Impérial
- etc.

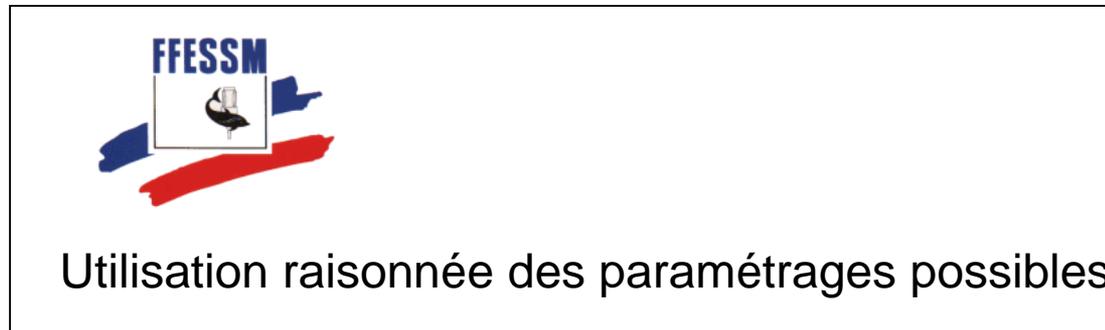
Plongées profondes

La décompression

Conservatisme



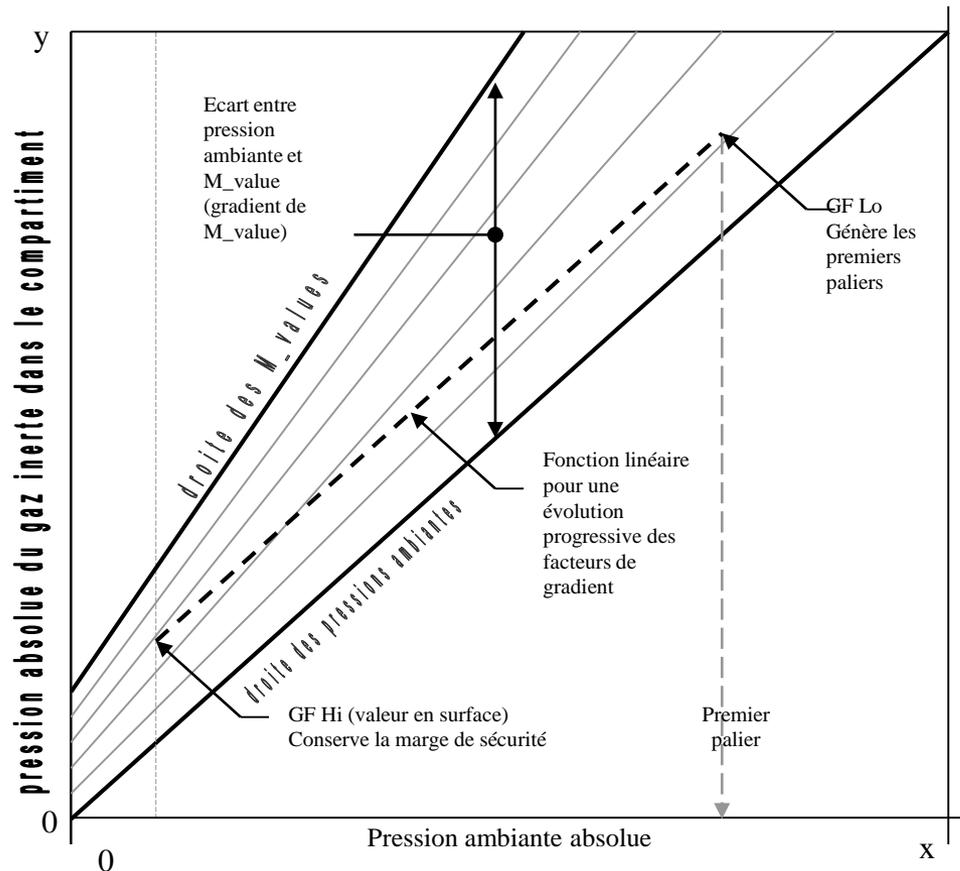
- L 'extrapolation de ces équations pour des plongées longues et profondes (et aux mélanges) ne donne pas satisfaction.
- L 'expérience montre l 'intérêt des paliers profonds (R. Pyle)
- On bricole le modèle pour paramétrer les limites de sur-saturation : au choix de chacun (les facteurs de gradient)



Plongées profondes

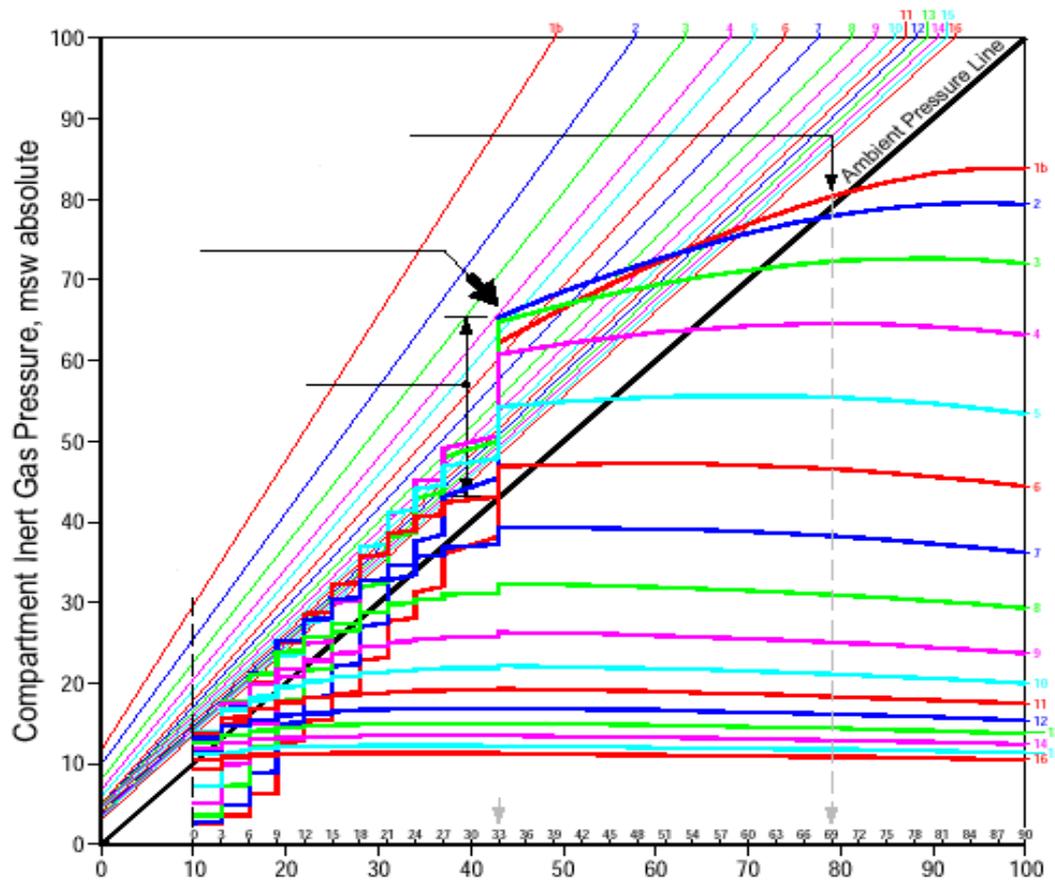
La décompression

Graphe des pressions : Facteurs de gradient



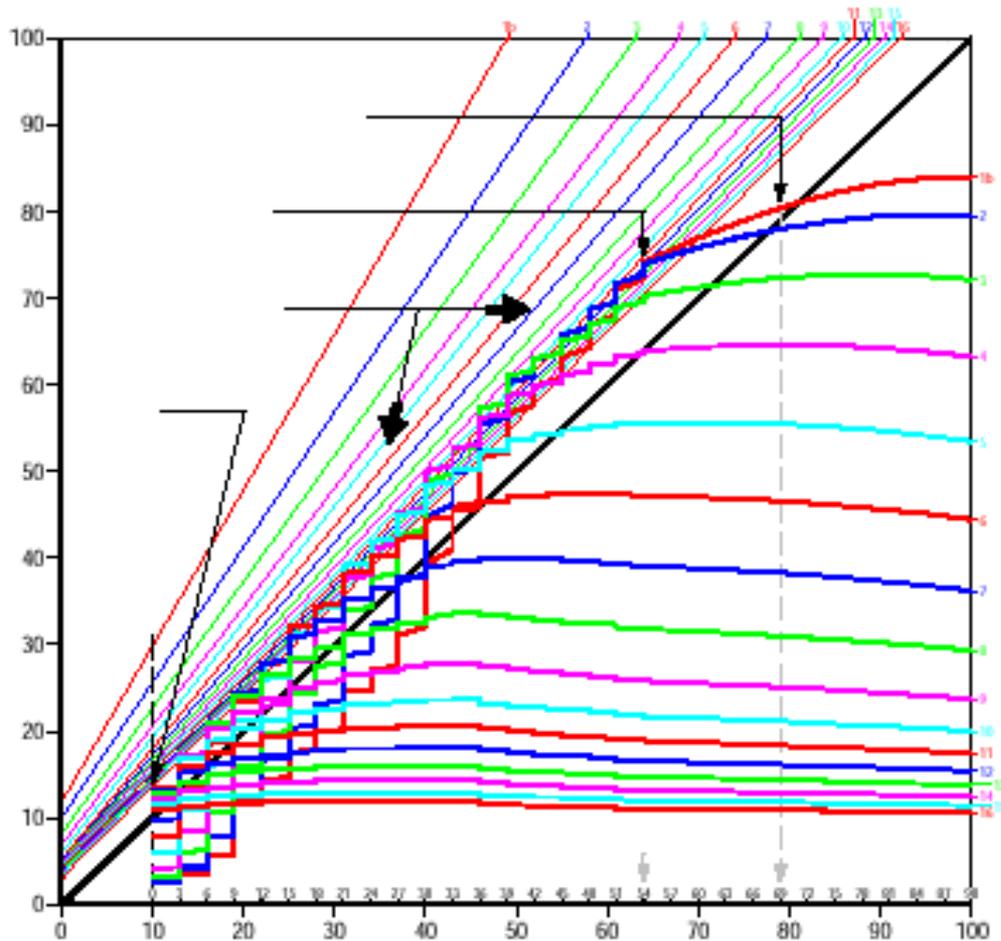
Plongées profondes

La décompression



Plongées profondes

La décompression



Plongées profondes

La décompression

Ordinateur Immergeable

VR3 (Delta P technology)

multi gaz

multi mode

circuit ouvert

circuit fermé

Sonde PpO₂ possible

modèle Bühlmann + paliers R.Pyle



Plongées profondes

La décompression

Le modèle VPM

(Varying Permeability Model)

- Pas de décompression sans bulle, quelle que soit l'importance de la décompression.

Plongées profondes

La décompression

Le modèle VPM

(Varying Permeability Model)

Le modèle prédit que tout être humain possède 'un capital' initial de micro-noyaux.

La distribution de ces noyaux est exponentielle dans tous nos tissus, quel que soit le compartiment considéré : beaucoup de petits noyaux et quelques gros.

Plongées profondes

La décompression

Le modèle VPM

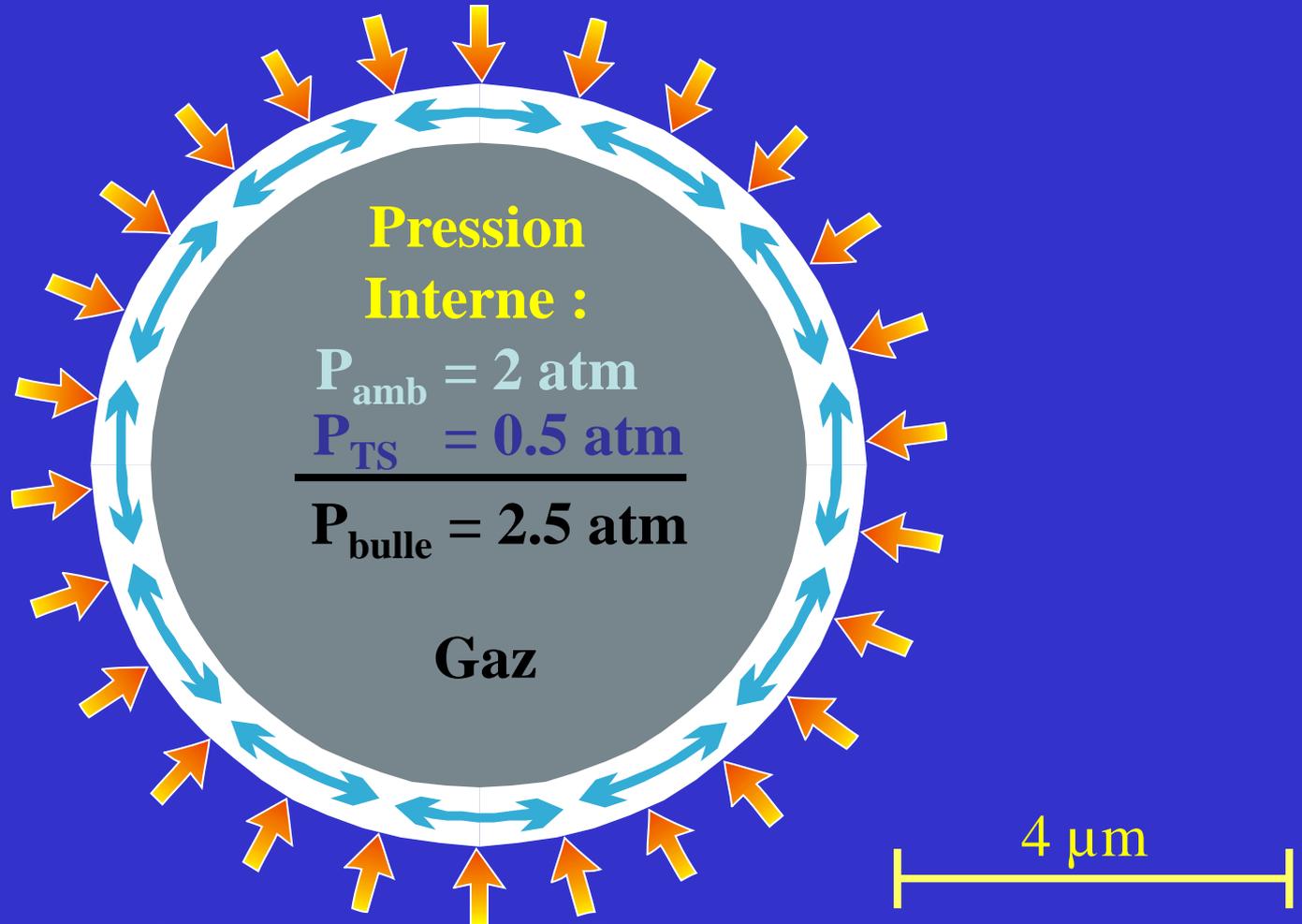
(Varying Permeability Model)

§ Au cours de son immersion, le plongeur va subir les effets des variations de pression et les micro-noyaux vont évoluer (grossir ou rétrécir) en fonction des valeurs de tension des gaz dissous et de la pression ambiante (effet Boyle/Mariotte + diffusion gazeuse).

Effet de la Tension de Surface

**Pression
Ambiante :**
 $P_{amb} = 2 \text{ atm}$

**Tension de
Surface :**
 $P_{TS} = 0.5 \text{ atm}$

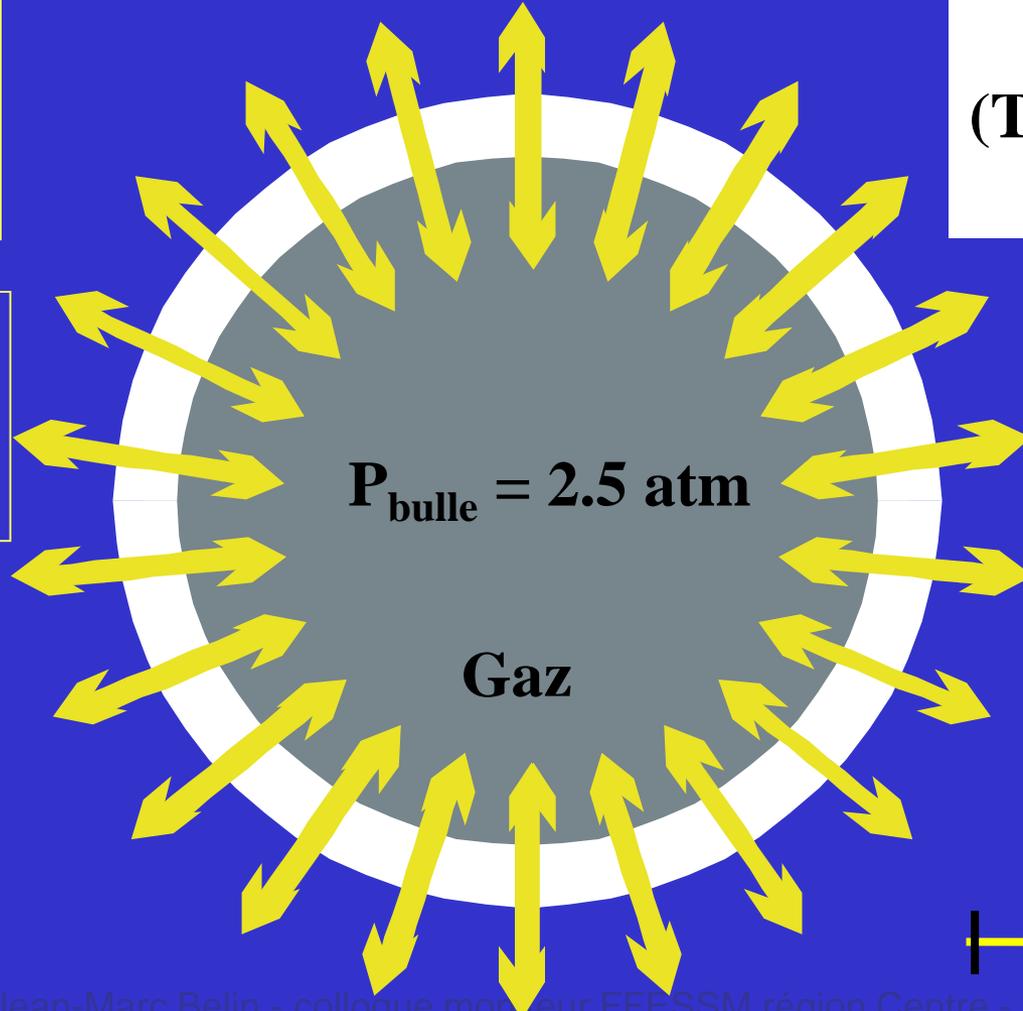


Gradients et Diffusion Gazeuse

**Pression
Ambiante :**
 $P_{amb} = 2 \text{ atm}$

**Tension de
Surface :**
 $P_{TS} = 0.5 \text{ atm}$

**Gaz dissous
(Tissus) Pression :**
 $P_{tis} = 3.2 \text{ atm}$



Fluide

Plongées profondes

La décompression

Le modèle VPM

(Varying Permeability Model)

Les expériences ont montré que l'organisme était capable de supporter indéfiniment un certain nombre de bulles ou bien un nombre de bulles plus important mais pendant un temps limité. Nous aurons donc deux manières de calculer selon le paramètre choisi ; Il faut noter que pour des plongées de durée moyenne à longue, les deux façons de calculer mènent au même résultat.

Plongées profondes

La décompression

Le modèle VPM

(Varying Permeability Model)

Les paramètres nécessaires aux calculs :

calcul de la tension des gaz dissous :

$$P = P_{io} + R(t - 1/k) - [P_{io} - P_o - (R/k)]e^{-kt}$$

- § r_0 : le rayon minimal de la bulle qu'on peut exciter pour grossir
- § γ : gamma, la tension de surface du noyau gazeux.
- § γ_c : la tension de réduction du noyau
- § λ : le volume *de bulles maxi tolérable*
- § T : le temps de régénération des noyaux (2 semaines environ)
- Le profil de la plongée (vitesse de descente et de remontée, profondeurs atteintes, temps, gaz respirés, ...)

Plongées profondes

La décompression

Le modèle VPM

(Varying Permeability Model)

Paliers plus profonds

Un profil calculé avec VPM impose les premiers paliers à une profondeur beaucoup plus importante qu'avec les modèles traditionnels. Par contre, les derniers paliers (plus proches de la surface) sont beaucoup plus courts qu'avec ces mêmes modèle Haldaniens

Plongées profondes

La décompression

Le modèle VPM

(Varying Permeability Model)

Déco plus courte

Pour des plongées de faible durée, la durée totale de décompression est plus longue, mais le phénomène s'inverse rapidement dès que le temps de plongée devient significatif.

Plongées profondes

La décompression

Le modèle VPM

(Varying Permeability Model)

Si palier oxy, paliers précédents plus courts

Une des conséquences de ce modèle, lorsqu'on utilise de l'oxygène au palier de -6m, est de raccourcir également les paliers précédents (voir explications d'Eric Maiken à ce sujet)

Vplanner

modèle VPM

Périodes et
compartiments
Bühlmann

Multi-gaz

Circuits ouverts
Circuits fermés

Logiciel gratuit

V-Planner - Jean-marc

Surface interval 48 hr 24 hr Actual: 000 days / hh:mm 00:00

Open SCR CCR

Bottom mix & travel
Depth, time, O₂/He

<input checked="" type="checkbox"/> 20, 4, 50
<input checked="" type="checkbox"/> 100, 18, 10/65

Deco gas
O₂/He

<input checked="" type="checkbox"/> 100
<input checked="" type="checkbox"/> 50
<input checked="" type="checkbox"/> 30/35

V-Planner by R. Hemingway, VPM code by Erik C. Baker.

DIVE PLAN

Surface interval = 2 880 minutes.
Altitude = 0m
Advanced configuration settings in effect.
Critical Volume = ON

Dec to 20m (1) on Nitrox 50.0, 20m/min decent.
Level 20m 3:00 (4) on Nitrox 50.0, 1.48 ppO₂, 9m END
Dec to 100m (8) on Nitrox 50.0, 20m/min decent.
Level 100m 14:00 (22) on Trimix 10.0/65.0, 1.09 ppO₂, :
Asc to 78m (24) on Trimix 10.0/65.0, -10m/min asc
Stop at 78m 1:00 (25) on Trimix 10.0/65.0, 0.87 ppO₂, 16
Stop at 75m 1:00 (26) on Trimix 10.0/65.0, 0.84 ppO₂, 15
Stop at 72m 1:00 (27) on Trimix 10.0/65.0, 0.81 ppO₂, 14
Stop at 69m 1:00 (28) on Trimix 10.0/65.0, 0.78 ppO₂, 13
Stop at 66m 1:00 (29) on Trimix 10.0/65.0, 0.75 ppO₂, 12
Stop at 63m 1:00 (30) on Trimix 10.0/65.0, 0.72 ppO₂, 11
Stop at 60m 1:00 (31) on Trimix 10.0/65.0, 0.69 ppO₂, 10
Stop at 57m 2:00 (33) on Trimix 10.0/65.0, 0.66 ppO₂, 9
Stop at 54m 1:00 (34) on Trimix 10.0/65.0, 0.63 ppO₂, 8
Stop at 51m 2:00 (36) on Trimix 10.0/65.0, 0.60 ppO₂, 7
Stop at 48m 2:00 (38) on Trimix 10.0/65.0, 0.57 ppO₂, 6
Stop at 45m 3:00 (41) on Trimix 10.0/65.0, 0.54 ppO₂, 5
Stop at 42m 2:00 (43) on Trimix 30.0/35.0, 1.54 ppO₂, 4
Stop at 39m 1:00 (44) on Trimix 30.0/35.0, 1.45 ppO₂, 3
Stop at 36m 2:00 (46) on Trimix 30.0/35.0, 1.36 ppO₂, 2
Stop at 33m 2:00 (48) on Trimix 30.0/35.0, 1.27 ppO₂, 1
Stop at 30m 2:00 (50) on Trimix 30.0/35.0, 1.18 ppO₂, 0

Add a level or mix Add deco

V-Planner by Ross Hemingway. powercheck@coastnet.com

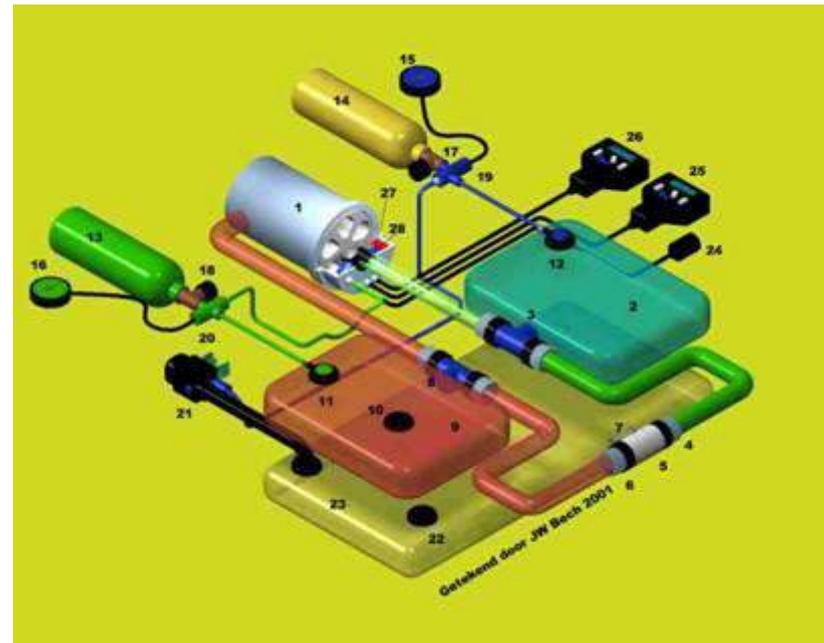
Varying Permeability Model (VPM) program code by Erik C. Baker.
ebaker@se.aeieng.com

Plongées profondes

Le Recycleur à circuit fermé (CCR)

Plongées profondes

Le Recycleur (CCR)



La réalité est un peu plus complexe

Le principe est simple

Plongées profondes

Le Recycleur (CCR)

Une boucle et des sacs pour respirer

Du gaz pour alimenter la boucle

Un produit chimique pour fixer le CO₂

Des capteurs et une électronique pour contrôler l'alimentation de l'oxygène



Plongées profondes

Le Recycleur CCR)

Une grande autonomie
indépendante de la
profondeur

**Une décompression
optimisée**

Une logistique simplifiée

Un silence étonnant

Plongées profondes

Le Recycleur

Une décompression optimisée (PPO₂ constante)

Minimise la charge en gaz inerte

Nécessite des outils adaptés (pas de table)



Plongées profondes

En milieu souterrain

Le recycleur a détrôné le scaphandre traditionnel

Par jean-louis Galera

Plongées profondes

En milieu souterrain

Du moins dans les
endroits où il passe



Par jean-marc Belin



Par jean-marc Belin

Plongées profondes

En milieu souterrain

Les difficultés ne sont pas qu'à l'entrée



Par Frank Vasseur

Plongées profondes

En milieu souterrain

Décompression à PpO_2 constante

Pas de table (pas de profil carré)

Uniquement des logiciels ou ordinateurs.

Possibilité d'installer une décompression de secours en circuit ouvert.