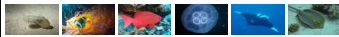




LES MODELES DE DECOMPRESSION



Niveau 4 – Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

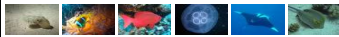
1



PLAN DE LA PRESENTATION



- **Un peu d'histoire**
- **Qu'est-ce qu'un modèle ?**
- **Le modèle haldanien**
- **Les tables MN90 : Calculs**
- **Il existe aussi d'autres modèles ...**



Niveau 4 – Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

2

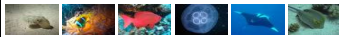


Alain GOTAINER

Un peu d'histoire



- 1755 Premiers comptes rendus sur la respiration d'air sous pression
- Milieu XIX^è 1^{ers} travaux hyperbares
« Un mal mystérieux ... »
- 1846 1^{ers} rapports d'accidents et mise en évidence de la création de bulles du fait de l'air dissout
- 1865-1872 Denayrouze préconise : « maxi 35m, 2h30 par jour, remontée à 1m par min ... »
- 1878 Paul Bert met en évidence le rôle de l'azote
- 1908 John Scott Haldane propose une table de remontée par paliers
- 1958 Modèle adopté par Royal Navy suivie de US Navy ...



Niveau 4 – Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

3

Alain GOTAINER

-La respiration d'air sous pression est une activité relativement récente dont les premiers comptes rendus datent de 1755.

-Le milieu du 18^{ème} voit la construction de grands ouvrages (piles de ponts, puits, ...) avec la mise en œuvre de travaux hyperbares au sec.

-Les pressions sont de 2 à 4 atmosphères et un mal mystérieux, « le mal des caissons » commence à frapper certains travailleurs.

-Dans les années qui suivent les 1^{ers} rapports d'accidents (1846), la thèse de Bucquoy mettra en évidence les effets de la décompression du fait de l'air dissout (l'azote n'étant toujours pas identifié comme LA cause).

-Dans les années 1865-1872, Denayrouze donnera de précieux renseignements en préconisant de respecter certains paramètres de remontée.

-En 1878, Paul Bert édite un ouvrage capital : « La pression barométrique » dans lequel il met scientifiquement en évidence le rôle spécifique de l'azote dans les effets de la décompression.

- La marine anglaise confie à John Scott Haldane la mise au point des règles de sécurité pour la Royal Navy qui adoptera en 1958 ses tables de remontée par paliers.

Qu'est-ce qu'un modèle ?

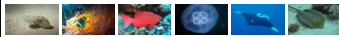


- **Définition** C'est une représentation simplifiée d'un phénomène non étudiable car trop complexe
- **Exemples** Modèles économiques, marketing, astronomiques, sociologiques, ...

Détermination de paramètres clefs

Phase d'expérimentation

Démonstration d'une différence raisonnable
entre le modèle et la réalité
au regard de l'utilisation prévue



Un modèle s'attache à déterminer des paramètres clefs permettant d'approcher au mieux le phénomène décrit, sans pour autant en connaître tous les tenants et les aboutissants.

Bien entendu, la pertinence d'un modèle est validée par une phase d'expérimentation, afin de montrer que la différence entre le modèle et la réalité est acceptable pour l'usage qui en est fait.

Qu'est-ce qu'un modèle ?

APPLICATION A LA PLONGEE

Un modèle est une approche physique et mathématique schématique d'un processus physiologique

```

    graph LR
      MODELE[MODELE] --> FORMULES[FORMULES MATHÉMATIQUES]
      FORMULES --> EXPERIMENTATION[EXPERIMENTATION VALIDATION]
      EXPERIMENTATION --> TABLES([Présentation sous forme de valeurs pré-calculées :  
TABLES DE PLONGEE])
      EXPERIMENTATION --> ORDINATEURS([Programmation sous forme de logiciels :  
ORDINATEURS DE PLONGEE])
  
```

*Hypothèses
Paramètres jugés clefs pour décrire les phénomènes de décompression*

© Alain Foret, Illustr-Pack II

Niveau 4 – Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

5

Alain GOTAINER

Certains modèles sont traduits uniquement sous forme de tables de plongée, d'autres sont aussi intégrés dans des ordinateurs ou logiciels de plongée.

Tables et ordinateurs ne s'opposent donc pas, ce ne sont que des formes différentes de présentation des résultats fournis par un modèle de décompression.

Le modèle haldanien

- **Constatation** Pas de troubles si remontée lente de -12 mètres à la surface
- **Déduction** Rapport de 1 à 2 (de 2 bars à 1 bars)
- **Extrapolation** Ne jamais dépasser ce rapport des pressions quelque soit la profondeur et la durée au fond
- **Illustration** Pas de risque à remonter de -50m (6 bars) à 20m (3 bars)

MAIS

Procédure impossible à respecter
car vitesses de remontées variables nécessaires

DONC

Paliers de 3m en 3m à partir de 12m
Vitesse de remontée fixe de 10m par min



Haldane est parti de la constatation suivante qu'aucun trouble n'apparaissait lors d'une remontée très lente d'une profondeur de 12 mètres à la surface quelque soit la durée du séjour au fond.

Son intelligence a été de ne pas considérer que la profondeur, mais de considérer le rapport de pression entre le fond et la surface. Le respect de ce rapport de 1 à 2 (des quelques 2 bars à 12 mètres au 1 bar de la surface) n'est pas générateur d'accident quelque soit la profondeur d'où l'on remonte (de 60 [7 bars] à 25 m [3,5 bars] comme de 50 [6 bars] à 20 m [3 bars] ou encore de 30 [4 bars] à 10 mètres [2 bars]).

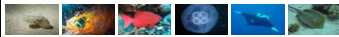
Cependant, ces résultats imposent des procédures impossibles à respecter car elles nécessitent des vitesses de remontées variables. Une méthode proche est donc adoptée qui impose des paliers tous les 3 m avec une vitesse de remontée fixe de 10 m par minute.

Le modèle haldanien



LES HYPOTHESES

- Hypothèse 1 Equilibre des pressions **poumons/sang** instantané (MODELE PAR PERFUSION)
- Hypothèse 2 Equilibre des pressions **tissus/sang** instantané (MODELE PAR PERFUSION)
- Hypothèse 3 Représentation du corps en régions anatomiques fictives : **Compartiments**
- Hypothèse 4 Comportement **symétrique en charge et en décharge** de N₂ pour chaque compartiment



Au delà des hypothèses listées ci-dessus, notons que Haldane n'a prévu qu'une table pour des plongées simples (ou isolées) sans envisager les plongées successives.

Le seuil de sursaturation critique dont nous parlerons dans la suite de ce cours sera figé par Haldane à la seule valeur de 2.

La composition de l'air retenue est celle de l'air atmosphérique au niveau de la mer et non de l'air alvéolaire.

Le modèle haldanien



RAPPEL

- **Loi de Henry (1803)** « ... la masse de gaz dissout dans un volume donné de liquide est proportionnelle à la pression. »

$$PpGaz = Pabs \times \text{Fraction de présence du Gaz}$$



Haldane s'est appuyé sur cette loi pour bâtir son modèle. Cela suppose qu'une approche purement physique puisse traduire ce qui se produit dans le corps humain. Ce n'est pas le cas mais les expériences ont montré que les résultats sont tout de même satisfaisants.

Les tables MN90 : Calculs

LES COMPARTIMENTS CONSIDERATIONS & DEFINITIONS


- 1 Le corps humain est représenté par **12** compartiments
- 2 Le **gradient** ($G = P_p N_2 \text{ fond} - P_p N_2 \text{ surface}$) correspond à la $Q^{\text{té}}$ maxi de N_2 que peuvent absorber les compartiments
- 3 La **période** est le temps (en min) que met un compartiment pour absorber la moitié du gradient de pression.
La période caractérise chaque compartiment (C_5, C_{10}, \dots)



Se basant sur le modèle Haldanien, les tables MN90 (Marine Nationale 1990) considèrent que :

- Le corps humain peut être représenté par un ensemble de régions anatomiques factices appelées « compartiments ».
- La différence des pressions partielles d'azote entre le fond et la surface est appelée « gradient » (G) et correspond à la quantité maximum d'azote assimilable par l'organisme.
- Chaque compartiment est caractérisé par une période définie en minute correspondant au temps que mettra chaque compartiment pour absorber la moitié du gradient de pression partielle d'azote.

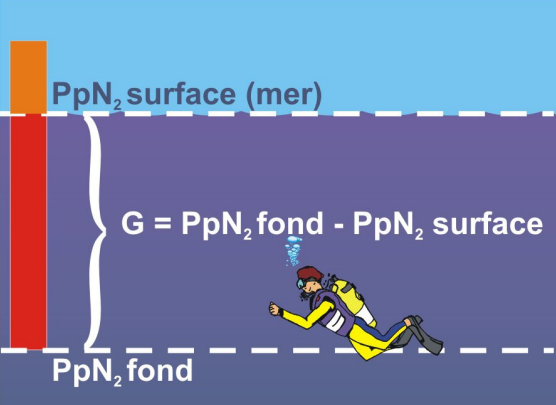
Les tables MN90 : Calculs



LES COMPARTIMENTS CONSIDERATIONS & DEFINITIONS


12 COMPARTIMENTS

- 1 C_5 5 min
- 2 C_7 7 min
- 3 C_{10} 10 min
- 4 C_{15} 15 min
- 5 C_{20} 20 min
- 6 C_{30} 30 min
- 7 C_{40} 40 min
- 8 C_{50} 50 min
- 9 C_{60} 60 min
- 10 C_{80} 80 min
- 11 C_{100} 100 min
- 12 C_{120} 120 min




$G = PpN_2 \text{ fond} - PpN_2 \text{ surface}$

© Alain Forel, Illustration-Pack II



Niveau 4 – Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

10



Alain GOTAINER

Ci-dessus à gauche, la liste des 12 compartiments caractérisés par chacun sa période.

Par exemple le compartiment C_{40} mettra 40 minutes pour absorber la moitié du gradient de pression auquel il est soumis.

Ci-dessus à droite, l'illustration du gradient (G).

Les tables MN90 : Calculs

LES COMPARTIMENTS CONSIDERATIONS & DEFINITIONS

- 4 A chaque période supplémentaire, chaque compartiment se sature en N_2 de 50% de sa capacité de saturation restante.
(P_1 : 50%, P_2 : 50%+25% = 75%, P_3 : 75%+12,5% = 87,5%, ...)
- 5 Après 6 périodes, le taux de saturation (**Ts**) est \approx 100%
- 6 La tension de N_2 (**TN₂**) traduira la même notion de $Q^{té}$ de N_2 que la PpN_2 mais, dissoute dans les compartiments



- Après une première période de temps passé, un compartiment aura donc absorbé 50% du gradient auquel il est soumis. Mais la plongée continuant à se dérouler, ce même compartiment, au bout d'une seconde période de temps passée, absorbera encore la moitié des 50% non saturés, soit 25% du gradient qui viendront s'ajouter au 50% déjà assimilés. A l'issue de la seconde période, ce compartiment aura donc au total absorbé 50% (période 1) plus 25% (période 2) soit 75% du gradient. Et ainsi de suite pour les périodes suivantes pendant lesquelles continuera la plongée.

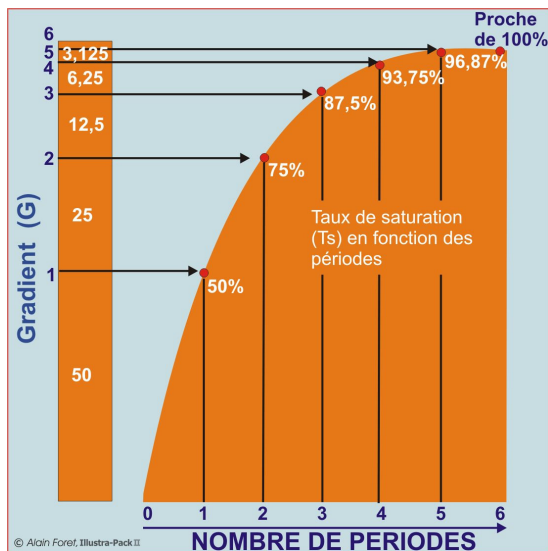
- Après six périodes, le taux de saturation de tout compartiment étant de 98,4375%, on considèrera que le compartiment est alors saturé à 100%.

- Les termes de tension et de pression partielle d'azote traduisent la même quantité. Le terme de pression partielle sera caractéristique de l'état gazeux alors que celui de tension caractérisera l'état dissout de l'azote dans l'organisme.

Les tables MN90 : Calculs



**LES COMPARTIMENTS
CONSIDERATIONS & DEFINITIONS**



© Alain Foret, Illustra-Pack II



Niveau 4 – Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

12



Ci-dessus l'illustration de l'évolution du taux de saturation pour chaque période de temps passé par un compartiment soumis à un gradient de pressions partielles d'azote.

Les tables MN90 : Calculs

MISE EN PRATIQUE
Comportement du compartiment C₁₀
lors d'une plongée à 25 m durant 30 min

- 1 Calcul de la tension finale en N₂ après 3 périodes

Tension initiale + (Gradient x Taux de saturation)

Tension initiale = TN₂ initiale = PpN₂ surface = 0,8 bar

Gradient = G = PpN₂ fond – PpN₂ surface = 2,8 – 0,8 = 2 bars

Taux de saturation = Ts = 50% + 25% + 12,5% = 87,5%

$$\text{TN}_2 \text{ finale} = \text{TN}_2 \text{ initiale} + (G \times Ts) = 0,8 + (2 \times 87,5\%) = 2,55 \text{ bars}$$



La tension finale d'un compartiment, c'est à dire la quantité d'azote qui se sera dissoute dans un compartiment donné après un nombre de périodes donné, s'obtient en ajoutant à la tension initiale de ce compartiment (les 0,8 bars de PpN₂ en surface), la fraction de gradient supplémentaire d'azote qui se sera dissoute dans le compartiment durant le nombre de périodes considéré.

Les tables MN90 : Calculs**MISE EN PRATIQUE**Comportement du compartiment C₁₀ lors d'une plongée à 25 m durant 30 min

- 2 Le compartiment C₁₀ peut-il regagner la surface ?

OUI si le rapport entre TN₂ *finale* et P_{abs} ne dépasse pas un seuil appelé le seuil de **Sursaturation critique (Sc)**

NON dans le cas inverse ⇒ **PALIER(s) !!!**

Souhaitant regagner la surface, P_{abs} doit être ≤ 1 bar

$$Sc = \frac{TN_2}{P_{abs}} \quad \Rightarrow \quad \frac{TN_2}{Sc} = \frac{2,55}{2,38} = 1,07 \text{ bars !!!}$$

- 70 cm maxi sinon danger



Niveau 4 – Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

14

Alain GOTAINER

La notion de seuil de sursaturation critique nous renvoie à la constatation initiale faite par Haldane du rapport de pression de 1 à 2 à ne pas dépasser au risque de s'exposer aux dangers du « mal des caissons ».

Depuis Haldane qui ne considérait qu'un unique seuil de sursaturation critique égal à 2, commun à tous les compartiments, le modèle a évolué pour considérer désormais des seuils de Sc spécifiques pour chaque compartiment (cf. tableau page suivante)

Pour qu'un compartiment puisse regagner la surface sans danger, le rapport de la tension en azote du compartiment considéré sur la pression absolue doit donc respecter à ne pas dépasser la valeur du seuil de sursaturation critique. En d'autres termes, le rapport de la tension en azote par le seuil de sursaturation du compartiment (rapport qui correspond à la pression absolue) doit donc être inférieur ou égal à 1 (pression atmosphérique de la surface). Si ce rapport n'est pas inférieur ou égal à 1, cela signifie que ce compartiment ne peut supporter une pression absolue égale à celle de la surface. Ce rapport déterminera donc la profondeur minimale supportable.

De tous les compartiments, on appellera le « compartiment directeur », le premier des compartiments à limiter la remontée.

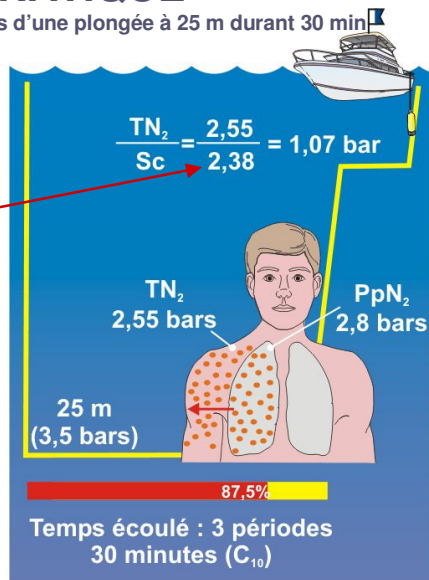
Les tables MN90 : Calculs



MISE EN PRATIQUE

Comportement du compartiment C₁₀ lors d'une plongée à 25 m durant 30 min

Cx	Périodes	Sc
C ₅	5 min	2,72
C ₇	7 min	2,54
C ₁₀	10 min	2,38
C ₁₅	15 min	2,20
C ₂₀	20 min	2,04
C ₃₀	30 min	1,82
C ₄₀	40 min	1,68
C ₅₀	50 min	1,61
C ₆₀	60 min	1,58
C ₈₀	80 min	1,56
C ₁₀₀	100 min	1,55
C ₁₂₀	120 min	1,54



© Alain Foret, Illustra-Pack II



Niveau 4 - Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>



Ci-dessus à gauche, la table des seuils de sursaturation critique pour chaque compartiment.

Ci-dessus à droite, l'illustration de notre exemple de mise en pratique.

Les tables MN90 : Calculs



MISE EN PRATIQUE

Comportement du compartiment C₁₀ lors d'une plongée à 25 m durant 30 min

- 3 Quid de l'azote résiduel ?

Une fois la surface regagnée, restes de N₂ dans le corps
GPS = K

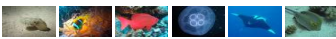
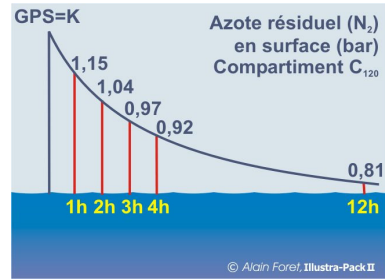
C₁₂₀ (compartiment directeur entre 2 plongées) x 6 périodes = 12 heures

Azote résiduel

Groupe de plongée successive	15min	30min	45min	1h	1h30	2h	2h30
A	0,84	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82
B	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,85	0,84
C	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,85
D	0,97	0,95	0,94	0,93	0,91	0,89	0,88
E	1,00	0,98	0,97	0,96	0,93	0,91	0,89
F	1,05	1,03	1,01	0,99	0,96	0,94	0,91
G	1,08	1,06	1,04	1,02	0,98	0,96	0,93
H	1,13	1,10	1,08	1,05	1,01	0,98	0,95
I	1,17	1,14	1,11	1,08	1,04	1,00	0,97
J	1,20	1,17	1,14	1,11	1,06	1,02	0,98
K	1,25	1,21	1,18	1,15	1,09	1,04	1,01
L	1,29	1,25	1,21	1,17	1,12	1,07	1,02
M	1,33	1,29	1,25	1,21	1,14	1,09	1,04
N	1,37	1,32	1,28	1,24	1,17	1,11	1,06
O	1,41	1,36	1,32	1,27	1,20	1,13	1,08
P	1,45	1,40	1,35	1,30	1,22	1,15	1,10



	10h30	11h	11h30	12h
	0,81			
	0,81	0,81	0,81	
	0,81	0,81	0,81	
	0,81	0,81	0,81	0,81
	0,81	0,81	0,81	0,81
	0,81	0,81	0,81	0,81
	0,81	0,81	0,81	0,81
	0,82	0,81	0,81	0,81
	0,82	0,81	0,81	0,81
	0,82	0,81	0,81	0,81
	0,82	0,82	0,81	0,81



Niveau 4 - Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

Une fois regagnés la surface, tous les compartiments n'ont pas pour autant éliminé tout l'azote absorbé durant la phase de « fond ». En d'autres termes, la tension en azote de tous les compartiments n'est pas revenue à l'égal de la pression partielle d'azote en surface.

C'est ce qu'indique le tableau d'évolution d'azote résiduel fourni avec les tables MN90. Le Groupe de Plongées Successives (GPS), obtenu en fonction des paramètres de la plongée réalisée, nous permet d'entrer dans le tableau reproduit ci-dessus pour déterminer la tension en azote du compartiment le plus contraignant (C₁₂₀) en fonction de la durée de l'intervalle surface.

Ayant considéré une symétrie de comportement des compartiments entre les phases d'absorption et de restitution de l'azote, on considérera que 6 périodes au maximum seront nécessaires pour que la tension du compartiment C₁₂₀ retrouve sa valeur d'équilibre en surface (0,81 bar). La période du compartiment C₁₂₀ étant égale à 120 minutes (2 heures), 6 périodes de ce compartiment, soit 12 heures seront au maximum nécessaires pour que sa tension soit égale à 0,81 bar.

Les tables MN90 : Calculs



MISE EN PRATIQUE
Comportement des compartiments
 C_{10} ($Sc=2,38$), C_{20} ($Sc=2,04$), C_{40} ($Sc=1,68$),
lors d'une plongée à 25 m durant 40 min

	C_{10}	C_{20}	C_{40}
A. TN_2 initiale	0,8 bar	0,8 bar	0,8 bar
B. Pression (25 m)	3,5 bars	3,5 bars	3,5 bars
C. PpN_2 (80% d'azote)	$3,5 \times 0,8 = 2,8$ bars	2,8 bars	2,8 bars
D. Gradient [C - A]	$2,8 - 0,8 = 2$ bars	2 bars	2 bars
E. Temps au fond	40 min	40 min	40 min
F. Période	10	20	40
G. Nb périodes [E ÷ F]	$40 \div 10 = 4$	$40 \div 20 = 2$	$40 \div 40 = 1$
H. Taux de saturation	93,75 %	75 %	50 %
I. N_2 dissout [D x H]	$2 \times 0,9375 = 1,875$ bars	$2 \times 0,75 = 1,5$ bars	$2 \times 0,5 = 1$ bar
J. TN_2 finale [A + I]	$0,8 + 1,875 = 2,675$ bars	$0,8 + 1,5 = 2,3$ bars	$0,8 + 1 = 1,8$ bars
K. Sc	2,38	2,04	1,68
L. Pabs = $TN_2 \div Sc$	$2,65 \div 2,38 = 1,123$ bars	$2,3 \div 2,04 = 1,127$ bars	$1,8 \div 1,68 = 1,07$ bars
M. Profondeur min	1,23 m	1,27 m	0,70 m
N. Palier	*	Compartiment directeur Palier à 3 m	*



Le tableau ci-dessus illustre une procédure synthétique qui permettra systématiquement de déterminer le compartiment directeur (ici parmi seulement 3 des 12 compartiments) imposant le premier un palier de sécurité.

Les tables MN90 : Calculs



EXERCICE

Comportement des compartiments
 C_5 ($Sc=2,72$), C_{10} ($Sc=2,38$), C_{15} ($Sc=2,20$),
 lors d'une plongée à 40 m durant 30 min

	C_5	C_{10}	C_{15}
A. TN_2 initiale			
B. Pression (40 m)			
C. PpN_2 (80% d'azote)			
D. Gradient [$C - A$]			
E. Temps au fond			
F. Période			
G. Nb périodes [$E + F$]			
H. Taux de saturation			
I. N_2 dissout [$D \times H$]			
J. TN_2 finale [$A + I$]			
K. Sc			
L. Pabs = $TN_2 \div Sc$			
M. Profondeur min			
N. Palier			



Exercice :

Compléter le tableau ci-dessus pour déterminer lequel de ces 3 compartiments imposera le premier un palier de sécurité suivant les paramètres de plongée énoncés.

Les tables MN90 : Calculs



CORRECTION EXERCICE

Comportement des compartiments
 C_5 ($Sc=2,72$), C_{10} ($Sc=2,38$), C_{15} ($Sc=2,20$),
 lors d'une plongée à 40 m durant 30 min

	C_5	C_{10}	C_{15}
A. TN_2 initiale	0,8	0,8	0,8
B. Pression (40 m)	5	5	5
C. PpN_2 (80% d'azote)	4	4	4
D. Gradient [C - A]	3,2	3,2	3,2
E. Temps au fond	30	30	30
F. Période	5	10	15
G. Nb périodes [E + F]	6	3	2
H. Taux de saturation	100%	87,5%	75%
I. N_2 dissout [D x H]	3,2	2,8	2,4
J. TN_2 finale [A + I]	4	3,6	3,2
K. Sc	2,72	2,38	2,20
L. Pabs = $TN_2 \div Sc$	1,47	1,51	1,45
M. Profondeur min	4,7 m	5,1 m	4,5 m
N. Palier		Compartiment directeur Palier à 6 m	



Niveau 4 – Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

19

Alain GOTAINER

Réponse :

Aucun des trois compartiments ne peut regagner la surface.

Le compartiment directeur, le plus limitatif, est le compartiment C_{10} , limitant la remontée à la profondeur de 5,10 mètres.

Le palier imposé par les tables MN90 est donc celui de 6 mètres.

Il existe aussi d'autres modèles ...



- **Haldaniens**
 - Workman** (plusieurs Sc par compartiment en fonction de la profondeur : M-Values)
 - Bühlmann** (prise en compte de l'air alvéolaire au lieu de l'air atmosphérique : Uwatec Aladin, Mares, Spiro, ...)
 - Spencer** (détection de bulles silencieuses : Suunto Spyder & Solution, ...)
 - Comex** (adapté aux travaux hyperbares : Beuchat Cx 2000, Tables MT92, ...)
- **Non haldaniens**
 - Modèles par diffusion** (BSAC)
 - Modèles « en série »** (DCIEM)
 - Modèles « di-phasiques »** (prise en compte des bulles silencieuses, des « profondes », successives, yo-yo, remontées rapides, ... : **VPM & RGBM**)



Les tables MN90 ne sont qu'un parmi différents supports, à traduire les résultats issus de la théorie développée par Haldane.

D'autres modèles, dits « Haldaniens » transcrivent des versions de ce modèle de référence.

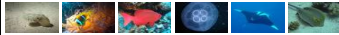
Ils sont traduits sur différents supports (tables ou ordinateurs) de différentes structures de plongées et de marques de fabricants d'ordinateurs ou d'éditeurs de logiciels de plongée.

Enfin, d'autres modèles encore ne s'appuient pas sur le modèle Haldanien. Ils sont dits : « non Haldaniens ».

La littérature est généreuse en la matière, à laquelle vous pourrez vous référer pour déterminer lequel parmi ces modèles correspondra le mieux à votre personnalité de plongeur : BONNE CHANCE !!!



FIN



Niveau 4 – Les modèles de décompression
<http://www.antonysub.fr>

21



Alain GOTAINER