



FFESSM 07940176
Piscine Robert Belvaux
94170 Le Perreux sur Marne
Tel : 06 95 76 94 51

Modèles de Désaturation en Plongée Sous-Marine

Une étude historique et technique des modèles de décompression

Sommaire

1. Justification
2. Rappels
3. Modèle de Haldane
4. Notion des M-values
5. Modèle de Bühlmann
6. Notion de Gradient Factor (GF)
7. Mise en pratique et limites
8. Paliers profonds



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémie POIJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

Les modèles de désaturation en plongée sont des éléments essentiels à la pratique en sécurité de l'activité.

Ils ont une importance CAPITALE dans les conditions de plongée profonde et/ou longue.

Ils permettent de minimiser les risques d'accident de désaturation.



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémie POIJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

Gaz Dissous et Comportement sous Pression

• Loi de Dalton (1810) :

- Cette loi stipule que la pression exercée par un mélange gazeux est égale à la somme des pressions partielles de chaque gaz. En plongée, cela signifie que la pression exercée par l'azote et l'oxygène est proportionnelle à leur concentration dans l'air comprimé.
- Par exemple, en profondeur, la concentration d'azote dans les tissus augmente proportionnellement à la pression ambiante.

• Loi de Henry (1803) :

- Cette loi décrit comment les gaz se dissolvent dans un liquide en fonction de la pression. Plus la pression est élevée, plus un gaz se dissout dans le sang et les tissus.
- Elle explique pourquoi les plongeurs doivent respecter des paliers de décompression : lorsque la pression diminue, les gaz dissous doivent être éliminés lentement pour éviter leur libération rapide sous forme de bulles.



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POUJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

On parle de « saturation » pour décrire la phase d'accumulation de gaz neutre au cours d'une plongée dans les différents tissus de l'organisme.

⇒ Dépend de la profondeur, de la durée de plongée, de la nature du gaz respiré mais aussi du travail ventilatoire ainsi que de prédispositions individuelles.

La « désaturation » correspond à la phase au cours de laquelle le gaz neutre accumulé dans les tissus repasse dans le sang pour être éliminé par les poumons.

La « sursaturation » fait référence à une quantité d'azote, dissoute dans le corps, supérieure à celle présente dans les poumons.

⇒ On en extrait une « sursaturation critique (Sc) »

On définit la diffusion comme l'échange au travers d'une membrane (alvéolaire ou tissulaire) à l'inverse de la perfusion qui correspond au transport dans le sang



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémie POIJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

Historique :

- Au XIXe siècle, de nombreux accidents surviennent lors de la construction des ponts et des plongées en scaphandres lourds.
- En 1905, la *Royal Navy* confie à John Scott Haldane, éminent physiologiste écossais reconnu pour son travail sur la respiration, la tâche d'améliorer les conditions de sécurité des plongées jusqu'à 60 m.
- Il publie un article complet en 1908 créant ainsi un modèle de désaturation, invente la notion de remontée par paliers et publie les premières tables au monde.

La modélisation de Haldane :

Représentation du corps humain par des « **compartiments** » anatomiques factices au nombre de 5 avec chacun un temps d'élimination de moitié (« **demi-vie** ») et un seuil limite de tolérance à la sursaturation sans causer d'accident (Sc)



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POIJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

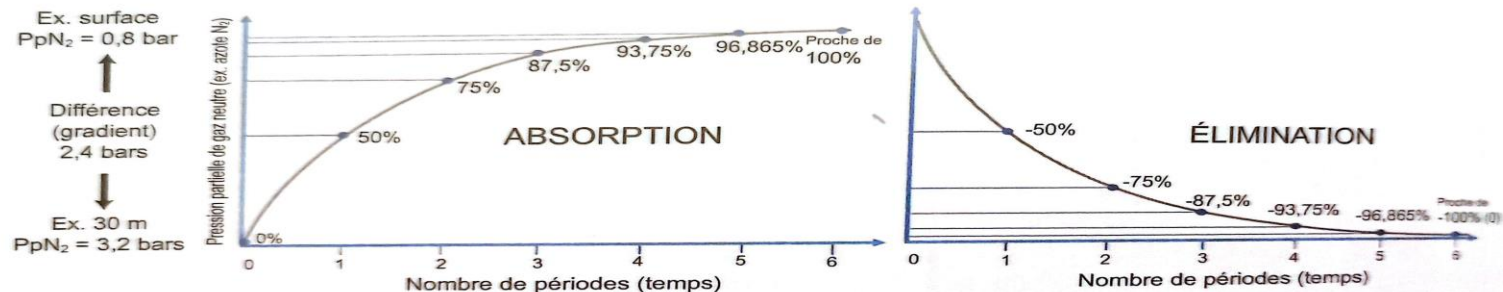
Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds



Il divise ensuite son modèle en 2 phases :

- Le calcul du niveau de saturation/désaturation définit la tension en gaz neutre. \Rightarrow Equation de Schreiner pour la multi-profondeur

Inclus : la pression partielle du gaz, la profondeur, la demi-vie du compartiment et enfin la durée de plongée.

- Le calcul de la pression absolue du gaz au moment de la remontée. Cela permet de fixer les conditions de remontée, en se basant sur un seuil de sursaturation critique (Sc) à 2.



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémie POUJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

Avant d'aborder le cœur du sujet, il faut définir le *facteur* Q : approximation de la charge en azote dans un compartiment unique.

Il se définit comme $Q = p\sqrt{\Delta t}$ (p : profondeur / Δt : durée de la plongée)

Il détermine alors un risque théorique d'ADD.

Point historique :

Malgré une amélioration de la sécurité des plongées, les accidents lors des plongées longues, profondes ou multiples sont encore trop nombreux, notamment à plus de 40m.

Un médecin militaire de l'*U.S Navy* du nom de *Workman* se penche sur la sécurité des plongées.

Il commence par abaisser le seuil de sursaturation de 2 à 1,58 ($2 \times 0,79$).
Il crée ensuite la notion des M-values ; au lieu de se questionner sur la pression absolue en gaz, il s'interroge sur la quantité maximale en azote que peut stocker chaque compartiment.



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémie POIJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

La formule devient donc

$$TN_2 \max = P_{abs} \times S_c$$

$$TN_2 \max = (P_{atm} + 1 \times \frac{p}{10}) \times S_c$$

$$TN_2 \max = \underbrace{S_c \times P_{atm}}_{M_0} + \underbrace{\frac{1}{10} \times S_c}_{\Delta M} \times \underbrace{p}_{p}$$

Équation des M-Values de Workman



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POUJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

Il a alors modifié les 10% du Sc par 6, 7 ou 8% ce qui a diminué M_p et donc durci les paliers avec des paliers plus profonds et/ou plus longs.

Il s'avère que cette modification :

- Ne va pas modifier les plongées sans palier obligatoire
- Va peu modifier les plongées à niveau de saturation moyen
- Va modifier d'autant plus les paliers obligatoires que le facteur Q est grand ($Q > 190$).

On va alors retrouver une modification de la répartition de la durée des paliers obligatoires sans franche majoration de la durée.



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POUJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

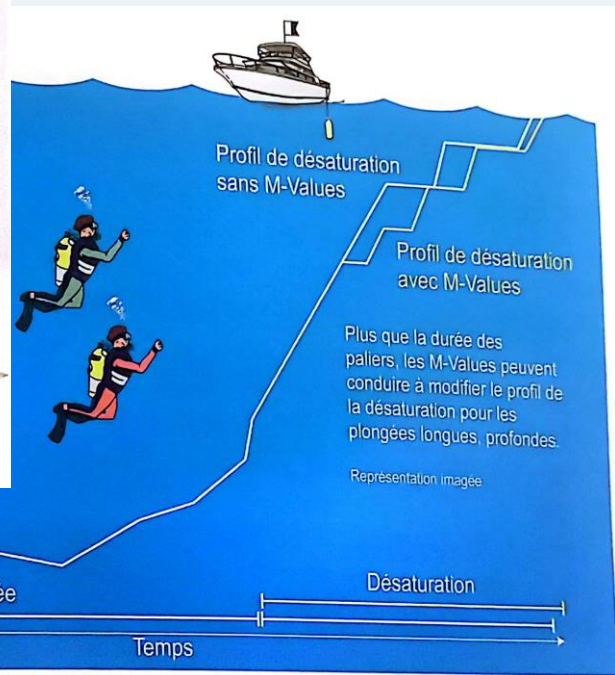
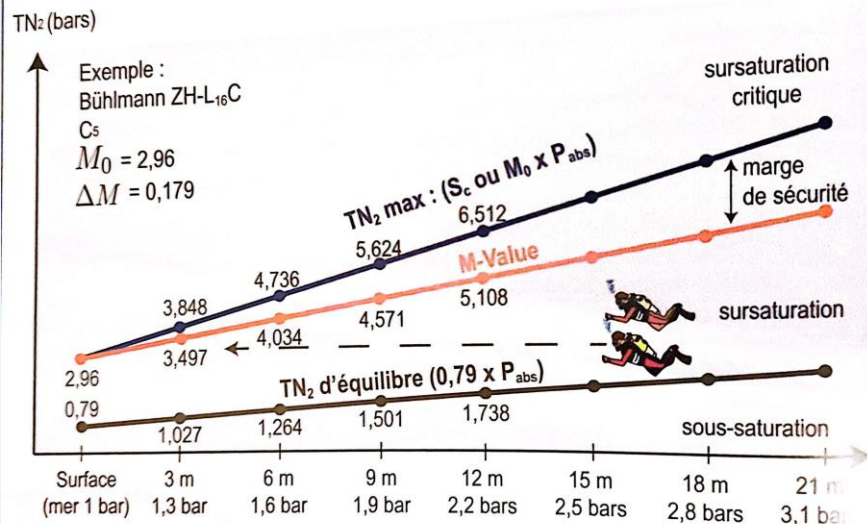
Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds





Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POUJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

Publication en 1983 d'un médecin suisse : *A. Bühlmann* suite à un travail en collaboration avec la marine française et américaine, largement financé par l'économie pétrolière off shore.

- Majoration du nombre de compartiments à 16 (vs 9 pour Workmann et 5 pour Haldane)
- Fraction d'azote retenue à 0,79 (vs 0,80)
- Patm à 0,95 bar (vs 1 bar)
- Prise en compte de l'air alvéolaire, retirant 0,063 à la pression absolue du mélange respiré pour prendre en compte CO2 et vapeur d'eau.
- Prise en compte d'une marge de sécurité en ajoutant 0,2 bar sur la profondeur retenue soit 2 m.



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémie POJJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

La dénomination se retrouve sous la forme :

ZH-L16 C pour les ordinateurs de plongée.

ADT (adaptatif) intégrerait le comportement et les conditions environnementales du plongeur dans les calculs de désaturation. (Absence publication scientifique)

MB (microbulles) correspond à un ajustement manuel des M-values par modification des facteurs de gradients : L0, L1...

PDIS (palier intermédiaire dépendant du profil) correspond à des paliers profonds.

Bühlmann a utilisé des M-Values modifiées nommées **coefficients a et b** qu'il a manuellement réduit.



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POIJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

**Notion de Gradient
Factor (GF)**

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

Il s'agit d'une astuce de calcul proposée sans mode d'emploi ayant pour objectif de modifier les M-values en manière uniforme à 85-90%.

On distingue 2 GF : GF_{low} (M-value lors du 1^{er} palier, le plus profond) et GF_{high} (M-value lors du dernier palier, le plus proche de la surface).

Le GF_{low} doit être inférieur au GF_{high} permettant de forcer la réalisation de paliers plus profonds.

- ⇒ Paramétrages précalculés (Facteur de sécurité, safety factor, facteur de prudence, paramètres personnels, PFactors, réglage du conservatisme, faible niveau de bulles)
- ⇒ Modification des GF via une analyse en temps réel (bubble factor ou facteur ξ)
- ⇒ Paramétrage libre par l'utilisateur



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POUJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

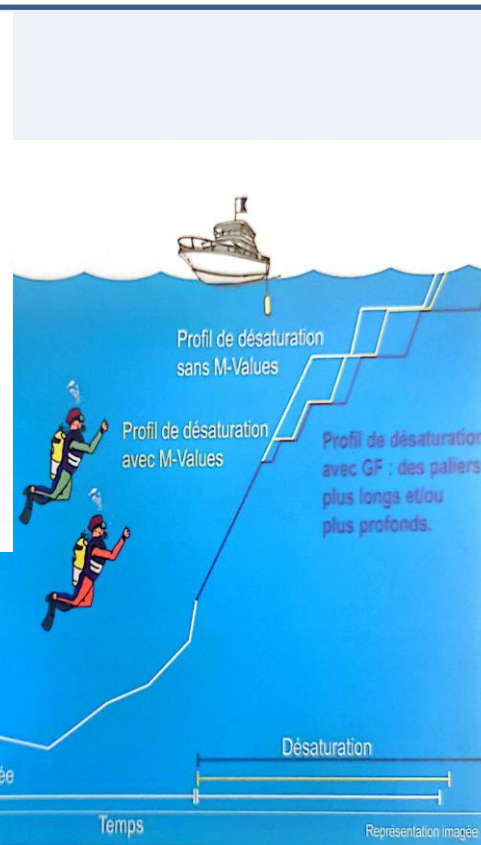
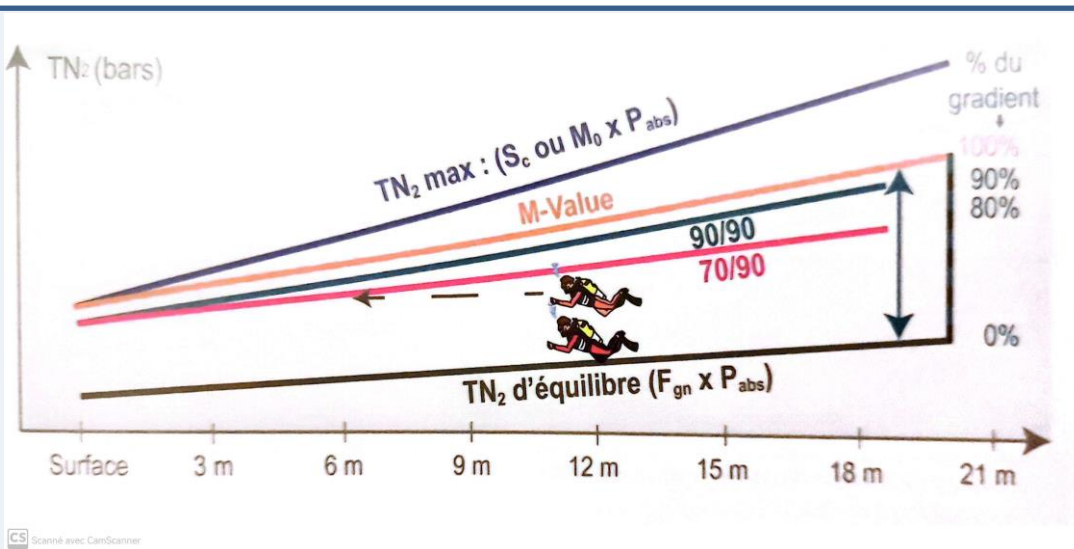
Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

**Notion de Gradient
Factor (GF)**

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds





Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POJJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

**Mise en pratique
et limites**

Paliers profonds

Il existe de nombreuses limites aux modèles de désaturation. On ne peut par exemple pas modéliser les remontées rapides, les yoyos, les dents de scie ou bien les interruptions de palier.

Une modélisation imparfaite a été réalisée concernant la prise en compte de l'azote résiduel entre 2 plongées ayant lieu le même jour ; les profils inversés ou bien les facteurs de risque individuels de risque.



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POIJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

Recommandations CTN FFESSM 18 octobre 2024 :

* En cas de vitesse de remontée trop rapide

Cas d'une remontée dépassant une vitesse de 15m/mn entre 30m et la surface, sur une distance de 10 mètres minimum :

Redescendre en moins de 3 min au moins à mi-profondeur et y rester 5 min. Puis faire au moins un palier de 1 min à 6 mètres et 5 min à 3 mètres (en plus de ce qui est prévu par votre moyen de désaturation). Si la ré-immersion est impossible, mise sous O2 et évacuation.

* En cas d'interruption de palier obligatoire

- Ré-immersion réalisable : redescendre en moins de 3 min, poursuivre le palier en ajoutant 3 min à 3 mètres.

- Ré-immersion non réalisable en cas de signe d'un possible accident ou plus de 3 min de paliers non réalisés : déclenchement des secours.

- Ré-immersion non réalisable sans signe d'accident, si erreur maximale de 3 min de palier non fait : période d'observation de 3 heures et interdiction de nouvelle plongée pendant 24 heures. Au moindre signe pouvant évoquer un accident, déclenchement des secours.



Modèles de désaturation en plongée N3 (2024)

Jérémy POIJOL
Vincent GARNIER

Justification

Rappel

Modèle de Haldane

Notion des M-values

Modèle de Bühlmann

Notion de Gradient
Factor (GF)

Mise en pratique
et limites

Paliers profonds

Observation par un biologiste marin, *Richard Pyle*, dans les années 90, d'une diminution de la fatigue à l'issue des plongées profondes où il avait réussi à capturer des poissons. Dès lors, il effectuait des arrêts de 1-2 min lors de la remontée pour permettre à l'animal de vider le gaz contenu dans sa vessie natatoire.

Il reproduisit donc l'expérience.

Cependant, il s'agit de plongée au trimix, non reproductible à l'air, sans aucune preuve scientifique qui plus est.

Par la suite un effet de mode s'est installé avec incorporation dans les ordinateurs de plongée.

La théorie a ensuite été invalidée lors d'études de la marine nationale (2005) et de l'US-Navy (2011)

Depuis 2019, les paliers profonds à l'air comme aux mélanges ne doivent être ni enseignés ni pratiqués.

LES HYDRONAUTES DU PERREUX



Merci de votre attention !

