



Sommaire

- Pourquoi ce cours ?
- Brève Histoire de la décompression
- La problématique: passer de la physiologie au calcul
- Les Hypothèses de Haldane
- Le modèle de Haldane
- L'évolution vers les tables MN90
 - Charge d'un compartiment et Loi de saturation
 - Décharge d'un compartiment
 - Profondeur du palier
 - Compartiment directeur
 - Pour aller plus loin...
- Autres modèles Haldanien: concept des M-values
- Autres modèles non Haldanien

Pourquoi ce cours ?

Un GP qui a la responsabilité de guider des plongeurs en exploration est une « référence » et doit avoir un minimum de culture générale sur la pratique d'une bonne désaturation. À ce titre, il doit :

- Comprendre les principes qui ont amenés à l'élaboration et à la validation des procédures de décompression
- Être capable d'appréhender des calculs simples de dissolution et de désaturation
- Être capable de discernement entre une procédure dictée par un ordinateur de plongée et la réalité « physiologique »
- Être capable de citer différents modèles de désaturation et en connaître les grands principes

Brève Histoire de la décompression

Milieu du 19^{ème} siècle: lors de grands travaux d'infrastructures, ouvriers exposés au sec à des pressions de 2 à 4 atm plusieurs h/j

- Constat: « mal des saisons » pour certains
- Symptômes: difficultés respiratoires – douleurs musculaires – accidents cérébraux – coma – mort
- Expression consacrée « on ne paye qu'en sortant ».

En parallèle: **invention du scaphandre** à casque par **Siebe** (1839) amélioré par **Cabirol** (1856) puis apparition du régulateur **Rouquayrol – Denayrouze** (1865) ⇒ augmentation nbre de scaphandriers

- Constat: nombreux accidents
- Préconisations: prof et durée limitées – remontées lentes (1 m/mn)

Bucquoy met en évidence la création de bulles du fait de l'air dissous (1861)
«...occasionnant des accidents comparables à ceux d'une injection d'air dans les veines »

Paul Bert (la pression barométrique 1878) met en évidence les rôles spécifiques de l'azote et de l'oxygène et émet les premières hypothèses sur les ADD et préconise une décompression lente

John Scott Haldane physiologiste écossais, propose la première table de décompression en plongée à l'air pour la Royal Navy (1908) – les concepts utilisés sont toujours d'actualité !

Nous allons voir au fil de la présentation quelles ont été les évolutions jusqu'à nos jours.

La problématique: passer de la physiologie au calcul

Objectif: Décrire une procédure à appliquer pour éviter les accidents **MAIS** mécanismes physiologiques mal connus et trop complexes
Comment faire ?

⇒ Établir un **modèle**

- Modèle = outil simplificateur d'une réalité complexe
- Outil « mathématique » permettant la représentation et l'approche de phénomènes physiques et physiologique.
- Traduction **imparfaite** de la réalité physiologique
- Repose sur la loi de Henry

Comment valider le modèle ?

⇒ **Expérimentation !**
(risque global actuel évalué à 5 accidents pour 10000 plongées)

MODELE → **FORMULES MATHÉMATIQUES** → **EXPERIMENTATION VALIDATION**

Hypothèses
Paramètres jugés clés pour décrire les phénomènes de décompression

Présentation sous forme de valeurs pré-calculées:
TABLES DE PLONGÉE

Programmation sous forme de logiciels:
ORDINATEURS DE PLONGÉE

Les Hypothèses de Haldane

Hypothèses physiologiques:

1. L'équilibre des pressions au niveau alvéolaire (poumons / sang) est instantané
2. L'équilibre des pressions au niveau tissulaire (sang / tissus) est instantané

Diffusion Instantanée (= non prise en compte)

Hypothèses liées à la modélisation mathématique:

3. Le corps humain est représenté par des « compartiments »
4. Chaque compartiment est **isolé**. Il n'échange de gaz qu'avec la circulation sanguine et elle seule
⇒ **Modèle à perfusion**
5. Chaque compartiment a un comportement homogène vis à vis de la charge et de la décharge en gaz inerte. La tension de gaz dissous est uniforme à l'intérieur d'un compartiment. Charge & décharge sont **symétriques**.

Compartiment = découpage artificiel du corps humain – région anatomique factice qui regroupe un ensemble de tissus physiologiques ayant le même comportement vis-à-vis de la charge & décharge en gaz dissous (possédant un **taux de perfusion homogène**)

Chaque compartiment est défini par sa **période** (exprimée en mn) qui caractérise sa vitesse d'absorption. Les compartiments les mieux « perfusés » ont les périodes les plus courtes

Période = temps constant mis par un compartiment :

- En phase de charge: pour qu'il absorbe la moitié du gaz qui lui manque pour atteindre l'équilibre
- En phase de décharge: pour qu'il restitue la moitié du gaz qu'il a en trop pour atteindre l'équilibre

Le modèle de Haldane

Constat: des plongeurs peuvent remonter de 10 m à la surface sans problème (quelle que soit la durée passée au fond) ⇒ **rapport de pression de 2 acceptable**
 Constat confirmé par expérimentation (chèvres)

- Modèle avec 5 compartiments de périodes 5, 10, 20, 40 et 75 minutes
- Tous les compartiments « supportent » un rapport de sursaturation maxi = 2 (appelé coefficient de sursaturation critique Sc) : **Sc = 2 unique**
- Lorsque cette valeur est dépassée ⇒ respect d'un palier à la profondeur respectant le rapport 2 (défini modulo 10 pieds ≈ 3m)
- Vitesse de remontée « empirique » fixée à 10 m/mn
- Plongée simple uniquement
- Aucune bulle si le rapport 2 est respecté ⇒ **toute présence de bulle est pathogène**

05/01/2017

Alain BERTRAND - Formation GP

7

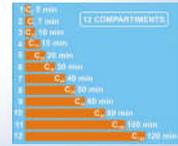
L'évolution vers les tables MN90

Tables Haldane (1908) ⇒ tables US Navy (1930):
 - ajout C120 pour plongée successive
 - 1 Sc par compartiment

France (Marine Nationale): tables US Navy traduites en système métrique: tables GRS (1948) ⇒ tables GERS 1959 (3 compartiments - 15 m/mn) puis GERS 1965 (4 compartiments - 20 m/mn) ⇒

Tables actuelles MN90: La FFESSM impose leur utilisation pour les examens théoriques

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



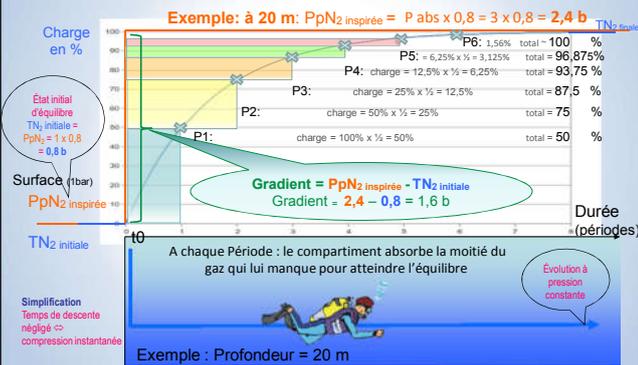
- 12 compartiments
- Chaque compartiment possède un Sc propre
- **Chaque Sc est fixe** (quelle que soit la profondeur)

05/01/2017

Alain BERTRAND - Formation GP

8

Charge d'un compartiment



05/01/2017

Alain BERTRAND - Formation GP

9

Loi de saturation

Méthode à Gradient constant

1. Calcul du gradient initial: $G = PpN_2 \text{ inspirée} - TN_2 \text{ initiale}$
2. Détermination du taux de saturation en fonction du nombre de période:

Durée (en nombre de période)	Taux de saturation Ts		
	en nombre	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	1	100%

3. $TN_2 \text{ cherchée} = TN_2 \text{ initiale} + G \times Ts$

Exemple: Calculez la TN_2 d'un compartiment immergé qui « respire » de l'air à 20 m pendant 3 périodes

$$TN_2 \text{ cherchée} = 0,8 + 1,6 \times 0,875 = 2,2 \text{ b}$$

(la valeur trouvée est bien comprise entre 0,8 et 2,4 b)

05/01/2017

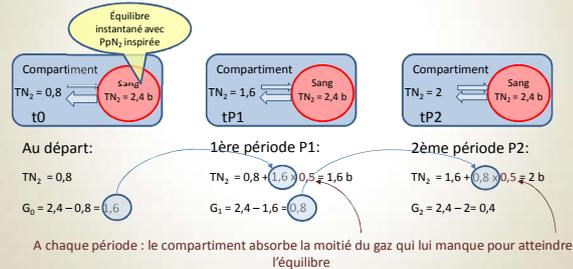
Alain BERTRAND - Formation GP

10

Loi de saturation

Méthode itérative (utilisation des résultats du calcul précédent)

Exemple précédent: un compartiment est immergé et « respire » de l'air à 20 m pendant 2 périodes



05/01/2017

Alain BERTRAND - Formation GP

11

Décharge d'un compartiment

Le compartiment peut-il remonter en surface?

Examen du rapport de sursaturation $S = TN_2 / P \text{ abs}$

Suite de l'exemple:

Après 3 périodes à 20 m, $TN_2 = 2,2 \text{ b}$

Calcul de la sursaturation:

$$S = TN_2 / P \text{ abs} = ?$$

$$S = 2,2 / 1 = 2,2 \text{ b}$$

Pour pouvoir remonter en surface il faut

$$S \leq Sc$$

Selon **tableau** quels sont les compartiments qui peuvent remonter directement en surface?
 C5, C7, C10, C15

Pour les autres: Palier impératif car

$$S > Sc$$

$S > Sc$	Accident: Dégazage anarchique et bulles pathogènes	Paliers impératifs!
$S = Sc$	Sursaturation critique	$T > P$
$S > 1 \text{ et } S < Sc$	Etat de sur-saturation Selon Haldane: pas de bulle Mise en évidence de microbulles par mesures Doppler	Phase de remontée
$S = 1$	Saturation complète	
$S < 1$	Etat de sous-saturation	Phase plongée



05/01/2017

Alain BERTRAND - Formation GP

12

Décharge d'un compartiment

Le compartiment peut-il remonter en surface?

Examen du rapport de saturation $S = \frac{TN_2}{Pabs} \Rightarrow TN_2 = S \times Pabs$

Autre Représentation :

Graphe des pressions

Courbe de type $Y = a \times X$

- Sc MN90 (5 mn)
- Sc MN90 (120 mn)
- S = 1
- Droite de saturation $TN_2 = Pabs$

tableau

Zone de sursaturation Admissible pour C5 Rouge pour C120

Zone de sursaturation admissible

Zone de sous saturation

13

Décharge d'un compartiment

loi de désaturation

$TN_2 \text{ résiduelle} = TN_2 \text{ initiale} + G \times t$

Exemple suite : calculer la TN_2 résiduelle d'un compartiment 3 périodes après sa remontée

PpN ₂ inspirée (en surface) = 1 x 0,8 =	0,8 b
TN ₂ initiale =	2,2 b
Gradient =	0,8 - 2,2 = -1,4 b
TN₂ cherchée = 2,2 - 1,4 x 0,875 =	0,975 b

Exemple suite : et si le compartiment « respire » de l'O₂ pur ?

PpN ₂ inspirée (en surface) = 1 x 0,0 =	0,0 b
TN ₂ initiale =	2,2 b
Gradient =	0,0 - 2,2 = -2,2 b
TN₂ cherchée = 2,2 - 2,2 x 0,875 =	0,275 b

Dénitrogénéation améliorée !!

14

Profondeur du palier

- Palier obligatoire si $S > Sc$

Exemple suite : le compartiment **C20** est immergé et « respire » de l'air à 20 m pendant 3 périodes (60 mn)

Résultat précédemment trouvé : TN_2 cherchée = 2,2 b

$S = \frac{TN_2}{Pabs} = \frac{2,2}{1} = 2,2$

Selon [tableau](#) , Sc pour C20 ?

$Sc = 2,04$ donc palier obligatoire pour C20 car $S > Sc$

- Profondeur du Palier : quelle est la pression qui permet de respecter le Sc ? (remontée le + haut possible)

$TN_2 / Pabs = Sc$ donc $Pabs = \frac{TN_2}{Sc}$

$Pabs = \frac{2,2}{2,04} = 1,078 \text{ b}$ soit ~ 0,8 m donc palier à 3 m

- Et la durée du palier ? (voir Pour aller + loin)

15

Compartiment directeur

Les compartiments **C5, C10 & C20** sont immergés à 35 m pendant 40 mn

Pabs	4,5 b		
TN ₂ initiale	0,8 b		
PpN ₂ 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 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%

TN_2 cherchée = TN_2 initiale + $G \times Ts$

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

16

Pour aller plus loin...

- Et si je veux calculer la durée du palier?
- Et si je veux calculer TN_2 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?
 $TN_2 = Sc \times Pabs$ surface = $PpN_2 = 0,8 \times Pabs$ fond

17

Autres modèles Haldanien: concept des M-values

- M-value** = limite de sursaturation tolérée par un compartiment

Développé d'abord par **Workman** (~1965):

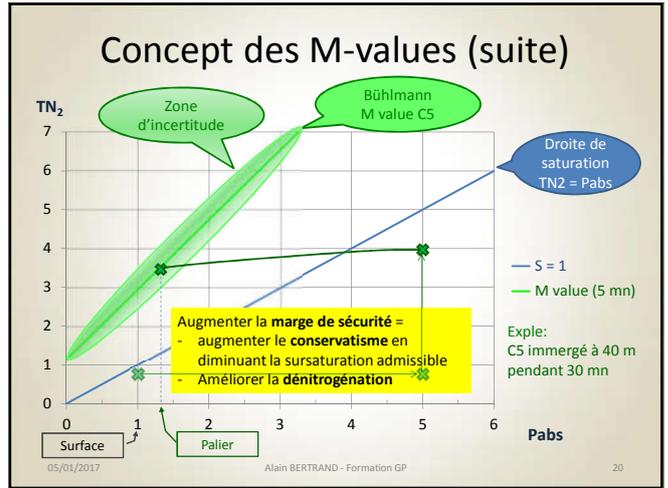
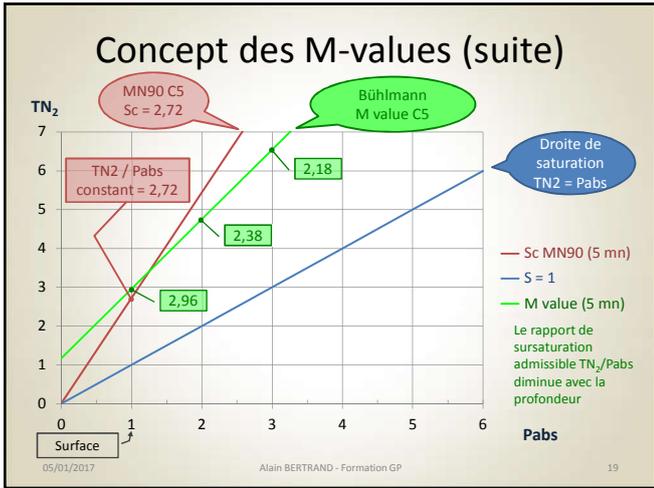
- relation linéaire entre P ambiante et Tension gaz inerte (N_2 et **Hélium**) tolérée dans chaque compartiment
- fonction des périodes des compartiments **ET de la profondeur**
- M-values = Paire de coefficient (a, b) définissant une droite:
 $TN_2 = a \times Pabs + b$ pour chaque compartiment

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 la plupart des ordinateurs du marché
16 compartiments dont le plus long est 635 mn !

18



Caractéristiques des modèles (néo) Haldanien

- L'air respiré sous pression entraîne la dissolution de l'azote dans un nombre fini de compartiments qui représentent le plongeur (exemples: 12 pour MN90, 16 pour Bühlmann)
- Les échanges alvéole /sang et sang / compartiment sont instantanés
- Chaque compartiment est 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** défini par un 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 du gaz dissout homogène et pas d'échanges entre les compartiments
 - Charge et décharge sont symétriques (même vitesse)
 - Une bonne désaturation est une désaturation **sans bulles** – bulles = accident

Autres 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
- Modèle canadien du **DCIEM (1983)**: 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 Hawaii)**
 - RGBM** travaux découlant de VPM (~1991 - Bruce **Wienke**)
 - Modèle adaptatif de **Bühlmann (ZH-L8ADT MB)**

Principes du modèle VPM

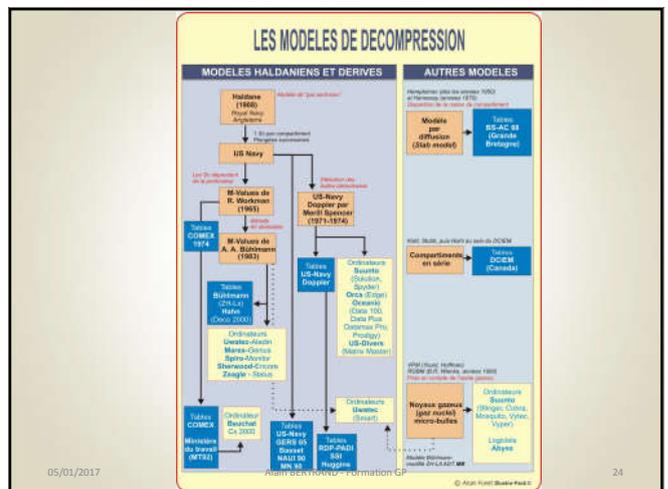
- Dissolution identique au modèle Haldanien ZHL16
- Prise en compte de noyaux gazeux **préexistants**: les 16 compartiments Bühlmann sont « équipés » d'une micro bulle
- Critère de remontée: la bulle ne doit pas dépasser un volume critique

Compartiment Tc

$P_{bulle} > P_{abs}$
Gaz

A la descente la bulle diminue par diffusion mais ne disparaît pas car l'enveloppe devient imperméable
 À la remontée: l'enveloppe redevient perméable
 Tant que $T_c < P_b$: diffusion vers l'extérieur, la bulle ne grossit pas
 Si $T_c > P_b$: diffusion vers l'intérieur, la bulle grossit

- Modèle adapté à la plongée profonde multi gaz
- Paliers profonds, vitesse 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 (\varnothing noyaux gazeux non prévus)



Bibliographie



05/01/2017

Alain BERTRAND - Formation GP

25/24

MN90

Compartment	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

05/01/2017

Alain BERTRAND - Formation GP

26