




Formation GP désaturation => 4 grands thèmes:

- Connaissances théoriques : dissolution + modèles de désaturation – objet du présent cours
- Utilisation des tables MN90
- Utilisation des ordinateurs et étude de cas concrets
- Accidents de désaturation



Sommaire

- [Pourquoi ce cours ?](#)
- Rappels & compléments : [loi de Henry](#), [air](#), [échanges gazeux](#), [compléments loi de Henry](#)
- Dissolution et plongée: [courbes](#), [profil](#), [facteurs de dissolution](#)
- Notion de modèle: [problématique](#), [limites](#), [principaux modèles](#)
- Haldane : [Hypothèses](#) et [modèle](#)
- [L'évolution vers les tables MN90](#)
 - [Charge d'un compartiment](#) , [exemple](#)
 - Décharge d'un compartiment: [le compartiment peut-il remonter?](#) et [loi de désaturation](#)
 - [Profondeur du palier](#)
 - [Compartiment directeur](#)
- [Autres modèles Haldanien](#): [concept des M-values](#)
- [Caractéristiques des modèles Haldanien](#)
- [Modèles non Haldanien](#) – [principe de VPM](#)
- Diminution du risque : [principe](#), [concept des « Gradient Factor »](#)
- Considérations sur : [Vitesse de remontée](#) et [paliers profonds](#)

Compléments :

- saturation : [rappel & définitions](#)
- [Exemples de question GP](#)
- [GP = Responsable de la désaturation des plongeurs qu'il encadre !](#)

22/01/2022 Alain BERTRAND - Formation GP Codep01 2

Pourquoi ce cours ?

- Comprendre les notions fondamentales qui ont amenés à l'élaboration et à la validation des procédures de décompression.
- Connaître le vocabulaire et les définitions des concepts principaux
- 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

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

3

Un GP a la responsabilité de guider des plongeurs en exploration.

Il est responsable de la désaturation des plongeurs qu'il encadre !

En tant que GP vous devenez une « référence »


À ce titre, vous devez:

- Avoir un minimum de culture générale et servir de modèle sur les « bonnes pratiques » de désaturation.
- Adopter et adapter un comportement...
- Pouvoir répondre aux questions des plongeurs que vous encadrez
- ...

- Être capable d'appréhender des calculs simples de dissolution et de désaturation (non évalué à l'examen GP FFESSM)

La loi de Henry

*William Henry (1775 - 1836) physicien et chimiste britannique.
En 1803, il énonce la loi sur la dissolution des gaz dans les liquides, appelée Loi de Henry.*



À température donnée, lorsqu'un gaz est en équilibre avec un liquide dans lequel il est soluble, la concentration de gaz dissous est proportionnelle à la pression qu'exerce ce gaz sur le liquide.

Équilibre = bilan des échanges nul après une durée d'exposition suffisante
Concentration = quantité de gaz dissous par litre de liquide.
Pression (P) = pression du gaz sous forme gazeuse
Tension (T) = pression du gaz dissous dans le liquide

Justification de la Tension $C = s \times P$

Le rapport C/s représente la pression de gaz dissous appelée

$$\underbrace{C/s}_{\text{Tension}} = P$$

C: concentration du gaz dans le liquide
s: solubilité gaz / liquide à température donnée

À l'équilibre et à température constante: $T_{\text{ension}} = P_{\text{ression}}$

22/01/2022
Alain BERTRAND - Formation GP Codep01
4

Modification de la Pression du gaz = Rupture de l'équilibre

Si $P \nearrow$ (compression) : recherche d'un nouvel équilibre: $T \nearrow$ jusqu'à $T = P$: le liquide se charge en gaz

Si $P \searrow$ (décompression): recherche d'un nouvel équilibre: $T \searrow$ jusqu'à $T = P$: le liquide libère le gaz en excès – la loi de Henry ne précise pas sous quelle forme !

Exemple : ouverture bouteille de champagne: le gaz (CO_2) est libéré avec plus ou moins de bulles !

Et la plongée ?!

- Grace à son détendeur, le plongeur respire de l'air (en général !) à pression ambiante (Pabs)
- L'air est un mélange gazeux – Composition ?



Composition de l'air

Azote	(N ₂)	78,084%
Oxygène	(O ₂)	20,946%
Argon		0,934%
Gaz carbonique	(CO ₂)	0,033%
Gaz rares:		0,003%
néon		
hélium		
krypton		
Hydrogène		
xénon		
Radon		
Oxyde de carbone		
Méthane ...		

Utilisation Simplifiée :

N₂ ⇔ 79% ou **80%**

O₂ ⇔ 21% **20%**

Dissolution du mélange Air :

N₂ ⇔ gaz **inerte** soluble dans l'organisme (sans réaction chimique)

O₂ ⇔ utilisé par l'organisme
Très peu dissous (combiné)
non pris en compte

Pression partielle d'azote inspiré :

PpN₂ = 0.8 x Pabs

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

5

Échanges gazeux: rappels & compléments

	mm Hg	bar	
O ₂	20,93%	159	0,21
CO ₂	0,03%	0	0,00
N ₂	79,03%	601	0,79
Vapeur d'eau	0,00%	0	0

Nb : les valeurs des tableaux illustrent des échanges en surface

	mm Hg	bar	
O ₂	13,55%	103	0,14
CO ₂	5,26%	40	0,05
N ₂	75,00%	570	0,75
Vapeur d'eau	6,18%	47	0,063
Total	100%	760	1

PpN₂ inspirée:
 Surface: $PpN_2 = 0,8 \times 1 = 0,8 \text{ b}$
 Fond: $PpN_2 = 0,8 \times P_{abs}$

PpN₂ Alvéolaire:
 Surface: $PpN_2 = 0,75 \text{ b}$

Différence de pression entre phase gazeuse et phase dissoute = **Gradient**

PpN₂ - TN₂ : gradient (G) significatif des échanges gazeux par **diffusion**

PpN₂ > TN₂ : Diffusion N ₂ dans le sang - Transport - Diffusion N ₂ dans les cellules	G > 0 TN ₂ ≠: Charge
PpN₂ = TN₂ : État d'équilibre obtenu après un temps d'exposition suffisant	G = 0
PpN₂ < TN₂ : Désaturation N ₂ (Diffusion N ₂ depuis cellule dans le sang - Transport - puis Diffusion N ₂ dans l'air alvéolaire)	G < 0 TN ₂ ↘: Décharge

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

6

Principe de la **Diffusion** : caractérise un échange par différence de pression
 Un gaz diffuse toujours

- d'une zone de pression élevée vers une zone de pression plus basse
- jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint

L'écart (**P - T**) « force motrice des échanges » est appelé **Gradient** de pression.

Par définition, gradient = mesure de la variation d'une grandeur (ici la pression)

Loi de Henry – compléments

Solubilité & capacité d'absorption

Exemples: [3]

1 litre de plasma (à 37°C) peut dissoudre	13,4 ml d'Azote
1 litre de plasma (à 37°C) peut dissoudre	8,7 ml d'Hélium
1 litre d'huile (à 37°C) peut dissoudre	67 ml d'Azote (5 x plus que le plasma)

Capacité d'absorption = volume maxi de gaz que l'on peut dissoudre par litre de liquide à température donnée et à P_{ambiante} \Rightarrow symbolisé par verre – contenu = N_2 dissous

Azote seul au contact d'un liquide : Pression $N_2 = P_{\text{abs}}$
 À l'équilibre : $TN_2 = P_{\text{abs}}$: N_2 dissous = verre plein \Leftrightarrow **saturation**

Air (mélange gazeux) au contact d'un liquide : Pression $N_2 = PpN_2$
 À l'équilibre : $TN_2 = PpN_2$: N_2 dissous = verre rempli à 80%

Capacité d'absorption (taille du verre) proportionnelle à P_{ambiante} subie !

Saturation (d'un liquide par un gaz) = état d'un liquide ayant dissous la quantité maximale de gaz possible dans des conditions déterminées de température et de pression.
À saturation: $TN_2 = P_{\text{abs}}$

TN_2 / P_{abs} : est appelé rapport (ou ratio) de sursaturation (S)

22/01/2022 Alain BERTRAND - Formation GP Codep01 7

En Plongée: l'ensemble du corps est soumis à P_{ambiante} (transmise instantanément aux solides et aux liquides de l'organisme)

L'utilisation du récipient (verre) est tirée du § vulgarisation [2] (diapo bibliographie)

Azote seul au contact d'un liquide : la quantité maxi absorbée par le liquide est liée à la **pression absolue** subie par le liquide: Si $P_{\text{abs}} \nearrow$: capacité d'absorption \nearrow (taille du verre \nearrow) et inversement !

Loi de Henry: À l'**équilibre** $TN_2 = P_{\text{abs}}$: la quantité de N_2 dissous est représentée par le verre plein \Leftrightarrow **saturation**

Air (mélange gazeux) au contact d'un liquide, la quantité réellement absorbée par le liquide est limitée par la **pression partielle** du gaz dans le mélange.

Loi de Henry: À l'**équilibre** pour l'air (à saturation par abus de langage) $TN_2 = PpN_2$: le verre est rempli à 80%

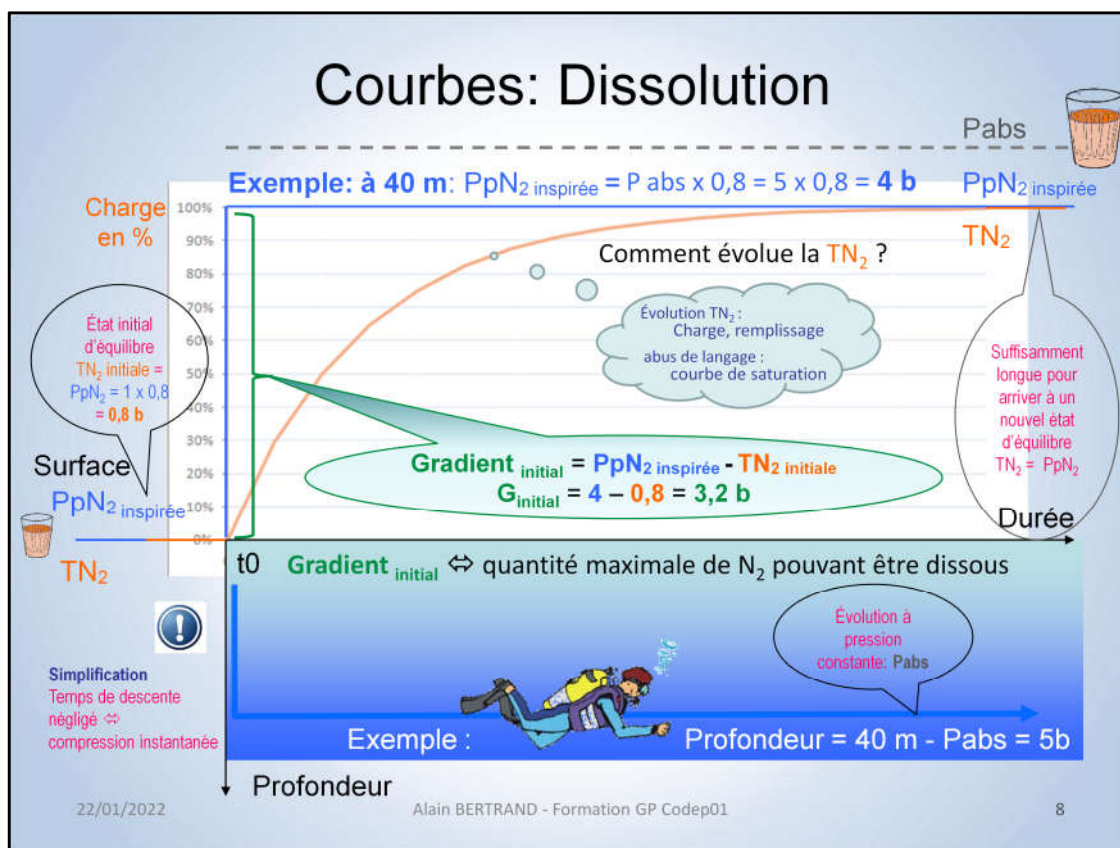
Exemple : travailleurs hyperbares plongés à 190 m de fond pendant plusieurs jours – Pression absolue = 20 bar – besoins en O_2 : 0,2 bar ce qui représente 1% du mélange respiré \Rightarrow le verre est rempli à 99% de diluant (pas de l'azote mais plutôt de l'hélium).

Les 2 termes soulignés justifient l'appellation de plongeurs à saturation !

Il y a sursaturation lorsque $TN_2 > P_{\text{abs}}$: état obtenu par diminution de la P_{abs} (décompression) et dans ce cas le verre « déborde ».

Le rapport TN_2/P_{abs} est appelé **Rapport de sursaturation ou coefficient de saturation (S)**

- \Rightarrow Doit être surveillé pendant la décompression
- \Rightarrow Doit être maintenu inférieur à une valeur critique pour éviter le dégazage anarchique



Plongeur assimilé à une « grosse bassine » d'eau salée au contact de l'azote !

Courbe de dissolution également appelée courbe de charge

Phase de charge: $G > 0 \searrow 0$ le gradient, important au départ, diminue pendant la charge puis s'annule lorsqu'un nouvel équilibre est atteint.

Par abus de langage appelée courbe de saturation (dans ce cas, saturation = charge)

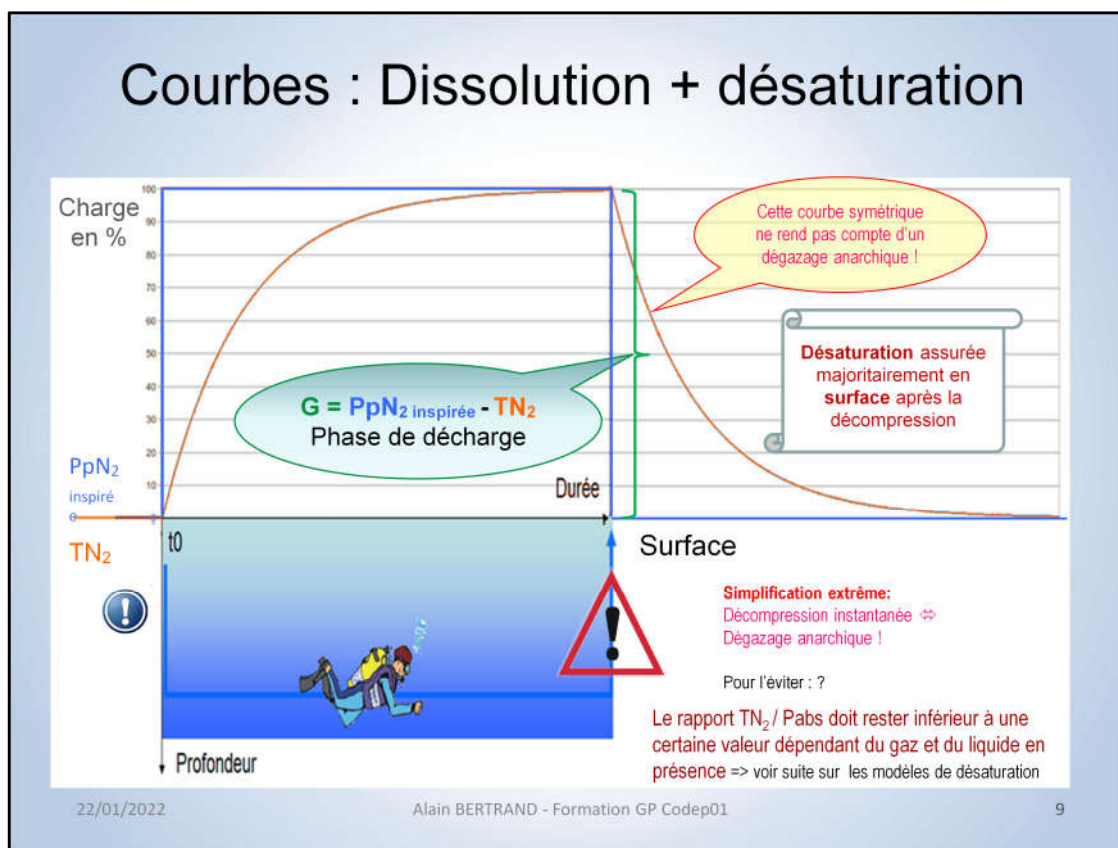
La notion de durée suffisamment longue sera explicitée avec le modèle de Haldane (voir diapo « charge d'un compartiment »).

Exemple chiffré: plongée à 40m – Pabs = 5 bar – $TN_2 \text{ max} = 4 \text{ bars} (0,8 \times 5)$

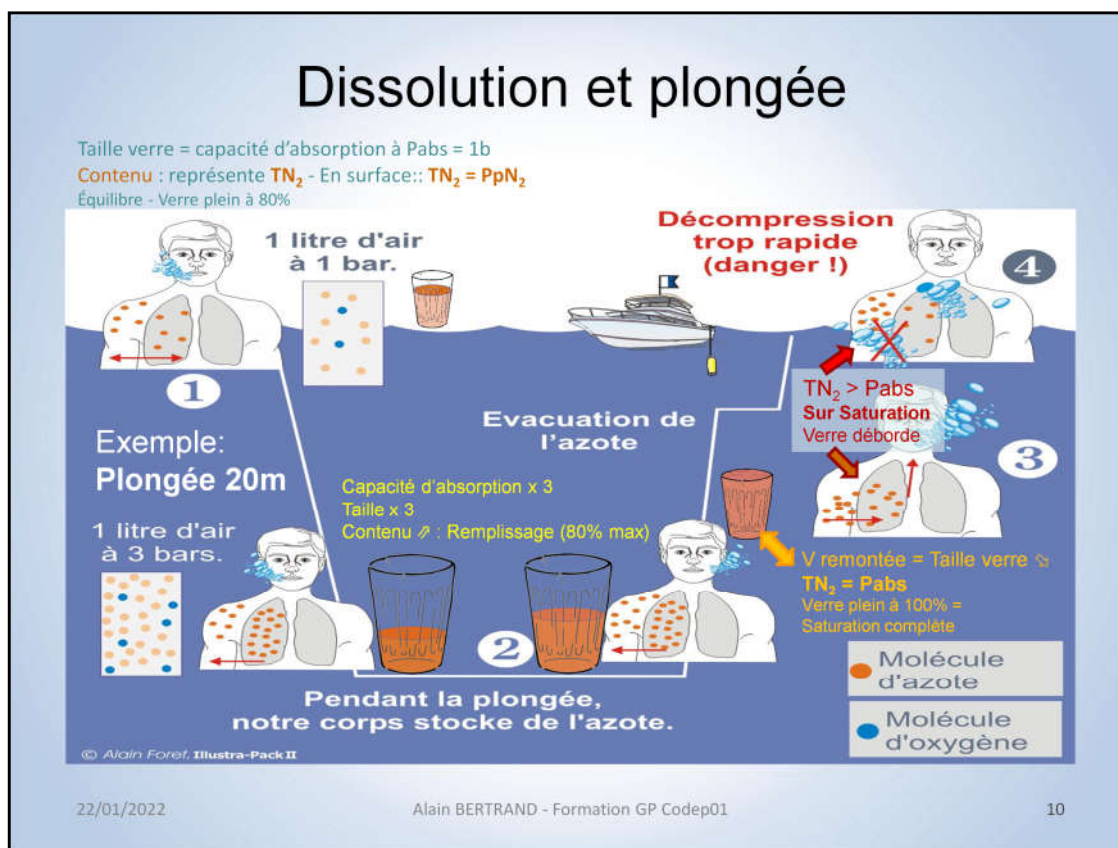
Remarque: Après avoir atteint l'équilibre, si on remonte rapidement de 5 bar (40m) à 4 bar (30m) la TN_2 n'ayant pas le temps d'évoluer :

on se retrouve avec $TN_2 = Pabs$ donc à saturation (le verre a diminué de taille jusqu'à être plein) – pas de risque lié à la sursaturation

=> **justifie l'argument pour dégager rapidement de la zone profonde**
 (IPD 40m : vitesse de remontée rapide tolérée jusqu'à 35 m)



Pendant les phases de **charge** et de **décharge**, la **vitesse de diffusion** est proportionnelle au **gradient** de pression (importante au départ puis nulle à l'équilibre) et dépend du gaz, du liquide et des conditions du milieu.



Chronologiquement depuis la surface:

- Étape 2 = durée de la plongée = phase de charge (sous-saturation)
- Phase de Décompression : importance de la Vitesse de Remontée - VdR = vitesse à laquelle la taille du verre diminue ! Passage de sous-saturation vers saturation puis sursaturation
- Étape 3 ou Étape 4: phase de **sursaturation**

Étape 3: VdR contrôlée et paliers permettent d'éliminer l'azote en excès au travers du filtre pulmonaire sans production de bulles pathogènes

Une bonne désaturation nécessite une sursaturation « maîtrisée » !

Depuis les années 70 on sait que toute remontée génère des bulles ! (dites « silencieuses » et tolérées jusqu'à un certain stade)

Étape 4: une VdR trop rapide ou le non respect de palier provoque une sursaturation avec production importante de bulles

Si l'écart $TN_2 - Pabs$ ou si le rapport $TN_2/Pabs$ est trop important, de nombreuses bulles apparaissent au sein des liquides physiologiques.

=> **dégazage anarchique avec fort risque d'accident**

Analogie : ouverture « maîtrisée » ou « au sabre » d'une bouteille de champagne (dans laquelle $T = P = \sim 5$ bar)

Exemple : Azote dans l'eau [3]

En laboratoire, matériel « propre » : bulles apparaissent pour $T/P > 100$

Liquide physiologique : bulles apparaissent pour $T/P = \sim 2$

Les facteurs de dissolution appliqués au plongeur

Facteur <i>(paramètres loi de Henry)</i>	Concernant le Plongeur	La dissolution (charge en gaz inerte) augmente si :
Pression du gaz		
Durée d'exposition (jusqu'à l'équilibre)		
Agitation		
Température		
Nature du gaz		
Nature du liquide		
Surface de contact		

Surligné jaune : les facteurs variables pendant la plongée

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

11

Ces facteurs sont étroitement associés à la loi de Henry (Voir les termes soulignés de la diapo « loi de Henry »).

Les facteurs de dissolution appliqués au plongeur

Facteur (paramètres loi de Henry)	Concernant le Plongeur	La dissolution (charge en gaz inerte) augmente si :
Pression du gaz	Profondeur d'évolution ⇔ PpN ₂ inspirée Facteur le plus important en plongée	Profondeur ↗ : ↗ gradient & capacité d'absorption ⇔ ↗ échanges gazeux par diffusion
Durée d'exposition (jusqu'à l'équilibre)	Durée d'immersion - en plongée sportive l'état d'équilibre complet n'est jamais atteint	↗ Temps de plongée = ↗ Remplissage ↗ échanges gazeux par diffusion jusqu'à l'équilibre
Agitation	Efforts, Froid, Stress : ⇔ ↗ consommation - Efforts importants non prévus par la procédure de déco !	↗ rythme respiratoire ↗ Débit sanguin ⇔ perfusion ↗ & ↗ échanges gazeux par diffusion : Remplissage accéléré
Température	Température corps humain (régulée à ~37°C)	La température diminue (hypothermie)
Nature du gaz	Gaz dissous = diluant = Azote (+ Hélium si trimix) N ₂ : Air = 80% - Nitrox < 80%	La solubilité ↗ : celle de l'azote est supérieure à celle de l'hélium (corrélation avec l'effet narcotique ?)
Nature du liquide	Le corps humain : ~ 65% d'eau - la répartition diffère selon les tissus Attention surcharge pondérale	La solubilité ↗ : La solubilité de l'azote n'est pas identique dans tous les tissus (plasma, graisse...)
Surface de contact	Poumons - tissus physiologiques plus ou moins bien vascularisés	La vascularisation ↗ : La vitesse de diffusion ↗ pour les tissus mieux perfusés

Surligné jaune : les facteurs variables pendant la plongée

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

12

Le couple profondeur-temps est très important car en fonction de la profondeur et de la durée la charge en azote sera différente.

Une durée courte mais profonde occasionne de la charge.

Une durée longue mais peu profonde occasionne de la charge.

Une durée courte et peu profonde occasionne moins de charge.

Une durée longue et profonde sort du cadre de la plongée loisir!

Charge en N₂ : 60 mn à 20 m sensiblement équivalent à 10 mn à 50 m ! [1]

Facteurs « physiologiques »:

- Agitation (accélération du débit sanguin)
- Nature du liquide (tissus)
- Surface de contact (vascularisation des tissus, efficacité du filtre pulmonaire)

La problématique: passer de la physiologie au calcul

⇒ Établir un **modèle**

Modèle =

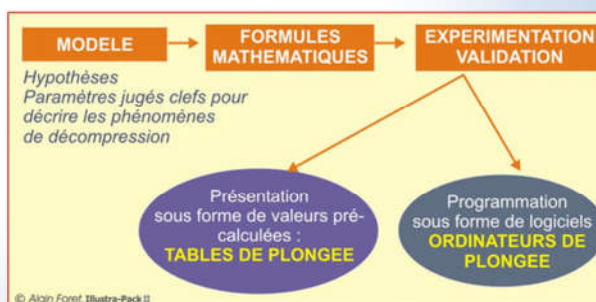
- outil **simplificateur** d'une réalité complexe
- Outil « mathématique » permettant la représentation et l'approche de phénomènes physiques et physiologique.
- Traduction **imparfaite** de la réalité physiologique

Repose sur la loi de Henry

Comment valider le modèle ?

⇒ **Expérimentation !**
et /ou **Étude statistique**

banques de données (Marines – Comex) – Notion de **risque accepté**
Risque global actuel évalué à 5 accidents pour 10 000 plongées selon [3]



22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

13

Objectif: Décrire une procédure à appliquer pour éviter les accidents

MAIS mécanismes physiologiques mal connus et trop complexes !

Comment faire ?

Le modèle et ses limites: facteurs de risque

Modèle ⇔ Protocole de désaturation « **standardisé** » basé sur:

mesures:	Temps de plongée – Profondeur	} Quantité N₂ dissous <u>prévue</u> par le modèle
hypothèse:	Consommation air	
hypothèse:	efficacité élimination N ₂ par filtre pulmonaire (N ₂ dissous + gazeux)	
autres hypothèses:	Physiologie , modélisation mathématique	

facteur de risque théorique qui augmente avec la profondeur et la durée de la plongée

↗ Quantité N₂ dissous ⇔ ↗ Risque !

Hors Modèle:

Variabilité des facteurs physiologiques d'un individu à l'autre et pour un même individu d'un jour sur l'autre ⇔ « jouer » avec les limites du modèle = **DANGER !**

Nota: efforts, début essoufflement, stress, froid ⇔ ↗ **Consommation air** ⇔ ↗ **N₂ dissous**

- **Facteurs personnels:** méforme, hygiène de vie, âge > 40 ans, surcharge pondérale, antécédent médicaux, sédentarité, déshydratation, stress , froid ...
- **Comportements à risque :** efforts en plongée, hyperpression thoracique en fin de plongée (Valsalva, effort à glotte fermée), efforts ou apnée ou altitude ou avion après plongée, > 2 plongées / jour, pratique irrégulière...
- **Profils à risque :** yoyos, dents de scie, remontées rapides, consécutive/successive rapprochée, profils inversés...

22/01/2022
Alain BERTRAND - Formation GP Codep01
14/NUMPAGES

Le risque zéro n'existe pas ! Aucun modèle n'offre une garantie absolue

Analogie

Voiture : le risque augmente avec la vitesse

Plongée: le risque augmente avec la quantité de N₂ dissous !

Depuis 1970 (Spencer): mise en évidence de bulles « silencieuses » lors de la désaturation (toute plongée)

La prise en compte de germes gazeux (gaz nucléi) dans certains modèles de désaturation est relativement récente.

Modèle trompé par:

- Accélération de la charge en N₂ due à l'augmentation de la consommation d'air.

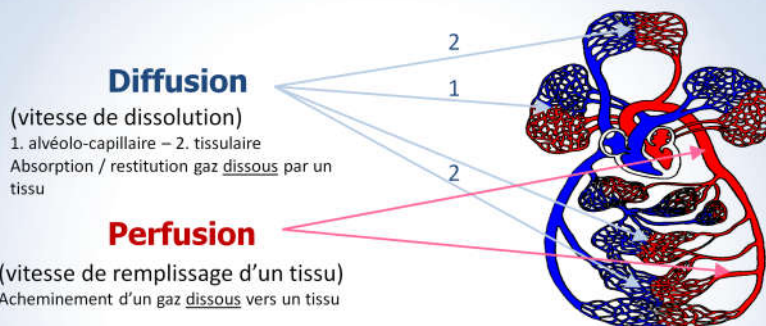
- Perturbation de l'élimination de N₂ due à :

- essoufflement (inefficacité des échanges)
- froid (vasoconstriction => baisse apport sanguin aux extrémités)
- déshydratation (diminution du volume sanguin)
- manque d'efficacité du filtre pulmonaire (enfant, fumeur, antécédents...)

- ...

Ne pas faire une confiance aveugle à son ordinateur !!

Les modèles de décompression



3 grandes familles:

Type Modèle		Facteur limitant	Famille	Algorithmes
Monophasique	Perfusion	Gaz dissous & durée d'acheminement	Haldane et dérivés	Bühlmann (MN90)
	Diffusion	Gaz dissous & durée de diffusion	Concept de Hempleman	
Diphasique	Microbulles + perfusion	Gaz dissous + noyaux gazeux	Prise en compte MicroBulles	VPM – RGBM Bühlmann MB

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

15

Aujourd'hui la plupart des ordinateurs du marché adoptent comme algorithme :

- soit Bühlmann
- soit RGBM (Reduced Gradient Bubble Model = modèle à faible gradient de bulle) !

Leur fiabilité et risque associé sont équivalents.

Aucun ordinateur du marché ne fonctionne sur la base des MN90.

Monophasique:

Production de **bulles** liée à **Quantité N₂ dissous + Baisse de pression**

Le modèle ne prend pas en compte la présence de microbulles

Diphasique:

Production de **bulles** liée à **Quantité N₂ dissous + germes gazeux + Baisse de pression**

Les germes gazeux sont pris en compte dans le modèle

Les Hypothèses de Haldane



Hypothèses physiologiques:

- L'équilibre des pressions au niveau alvéolaire (poumons / sang) est instantané
- L'équilibre des pressions au niveau tissulaire (sang / tissus) est instantané
- $P_{pN_2 \text{ air Alvéolaire}} = P_{pN_2 \text{ inspirée}}$

} Diffusion Instantanée (= non prise en compte)

Hypothèses liées à la modélisation mathématique:

- Le corps humain est représenté par des « compartiments » (*)
- Chaque compartiment est isolé. Il n'échange de gaz qu'avec la circulation sanguine et elle seule
⇒ **Modèle à perfusion** (transport N_2 par le sang vers l'ensemble du corps)
- 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
- Chaque compartiment est défini par sa période (*) qui caractérise sa vitesse d'absorption. Les compartiments les mieux « perfusés » ont les périodes les plus courtes (saturent plus rapidement).

(*) **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**)

(*) **Période** = temps constant (exprimé en mn) 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

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

16

Modèle à perfusion: Le temps nécessaire à l'acheminement des gaz jusqu'aux tissus va dépendre de la distance que le sang devra parcourir, et la quantité de gaz transportée sera fonction de la plus ou moins grande vascularisation de cet organe.

Le modèle de Haldane (1908)



Constat: des plongeurs peuvent remonter de 10 m à la surface sans problème (quelle que soit la durée passée au fond) \Rightarrow **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 S_c) : **$S_c = 2$ unique**
- Lorsque cette valeur est dépassée \Rightarrow respect d'un palier à la profondeur respectant le rapport 2 (défini modulo 10 pieds $\sim 3m$)
- Vitesse de remontée « empirique » fixée à 10 m/mn
- Plongée simple uniquement
- Aucune bulle si le rapport 2 est respecté \Rightarrow **toute présence de bulle est pathogène**
 - \Rightarrow Modèle à gaz dissous uniquement
 - (1 seule phase liquide: **modèle Monophasique**)

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

17

Empirique: ne veut pas dire arbitraire !

Empirique : non défini par une théorie mais déterminé après une expérimentation / observation sur le terrain – valeur déterminée après une suite d'essais-erreurs avant d'aboutir à une valeur satisfaisante.

L'évolution vers les tables MN90

Tables Haldane (1908) ⇨ tables US Navy :
 - en 1935: 1 Sc par compartiment - TN_2 au lieu de Pabs de l'air
 - en 1957: ajout C120 pour plongées successives

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 (mn)	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

Sc = coefficient de sursaturation critique

⇨ rapport de sursaturation maximum admissible

- 12 compartiments (+ C240 pour inhalation O_2)
- Chaque compartiment possède un Sc propre
- **Chaque Sc est fixe** (quelle que soit la profondeur)
- Efforts modérés
- Vitesses: 15 m/mn – 6 m/mn (paliers – surface)



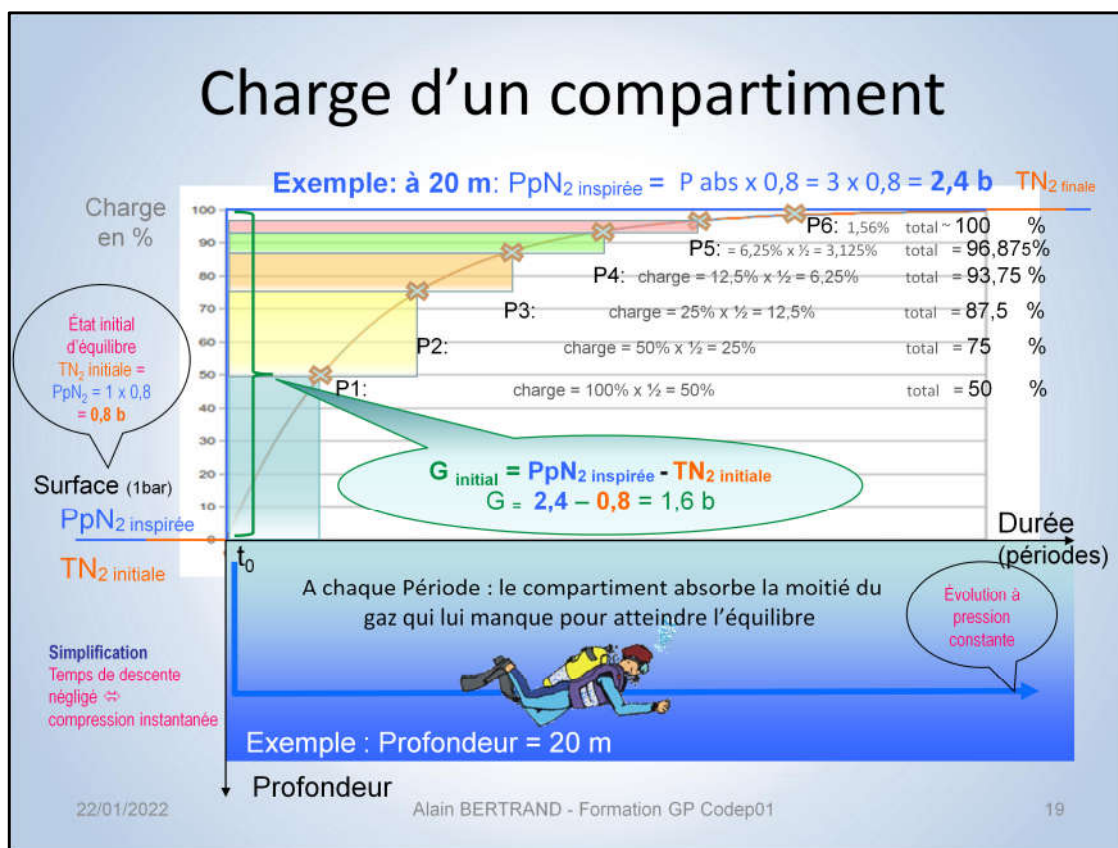
22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

18

GERS_65: point particulier de la courbe de plongée sans palier: 30 mn à 30 m !

MN90 : plus la période est faible plus la sursaturation maximum tolérée est forte !



L'équilibre est considéré atteint au bout de 6 périodes.

C'est la même courbe pour chacun des compartiments, seule la période change.

Pour une durée donnée, chaque compartiment possède un niveau de charge qui lui est propre et qui dépend de sa période.

Exemple : durée = 30 minutes

Niveau de charge C5 = 6 périodes donc ~100 %

Niveau de charge C10 = 3 périodes donc 87,5 %

Niveau de charge C15 = 2 périodes donc 75 %

Niveau de charge C30 = 1 période donc 50 %

...

Niveau de charge C120 = ¼ période

Charge d'un compartiment: exemple

Méthode à Gradient constant

1. Calcul du gradient initial:
2. Détermination du taux de saturation en fonction du nombre de période:

$$G_{\text{initial}} = PpN_2 \text{ inspirée} - TN_2 \text{ initiale}$$

Durée = nombre entier de période

Temps d'exposition considéré suffisant pour atteindre l'équilibre $TN_2 = PpN_2$

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	63/64	98,4375%

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

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

$$\begin{aligned} PpN_2 \text{ inspirée} &= 3 \times 0,8 = 2,4 \text{ b} \\ TN_2 \text{ initiale} = PpN_2 \text{ surface} &= 1 \times 0,8 = 0,8 \text{ b} \\ \text{Gradient initial} &= 2,4 - 0,8 = 1,6 \text{ b} \\ TN_2 \text{ cherchée} &= 0,8 + 1,6 \times 0,875 = 2,2 \text{ b} \end{aligned}$$

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



Décharge d'un compartiment

Le compartiment peut-il remonter en surface?

Examen du rapport de sursaturation $S = TN_2 / Pabs$

$S > Sc$	Risque important d'accident Dégazage anarchique - bulles pathogènes $TN_2 \gg Pabs$	Paliers impératifs !
$S = Sc$	Sursaturation critique $TN_2 > Pabs$	
$S < Sc$ et $S > 1$	État de Sursaturation Selon Haldane: pas de bulle Mise en évidence de microbulles par mesures Doppler	Phase de remontée
$S = 1$	Saturation complète $TN_2 < Pabs$	
$S < 1$	État de sous-saturation	Phase plongée

Suite de l'exemple :

Après 3 périodes à 20 m, $TN_2 = 2,2 b$

Calcul de la sursaturation:

$$S = TN_2 / Pabs = ?$$

$$S = 2,2 / 1 = 2,2 b$$

Pour pouvoir remonter en surface il faut

$$S \leq Sc \Leftrightarrow TN_2 \leq Sc$$

Selon [tableau](#) quels sont les compartiments qui peuvent remonter directement en surface?

C5, C7, C10, C15

Pour les autres : Palier impératif car

$$S > Sc \Leftrightarrow TN_2 > Sc$$

22/01/2022



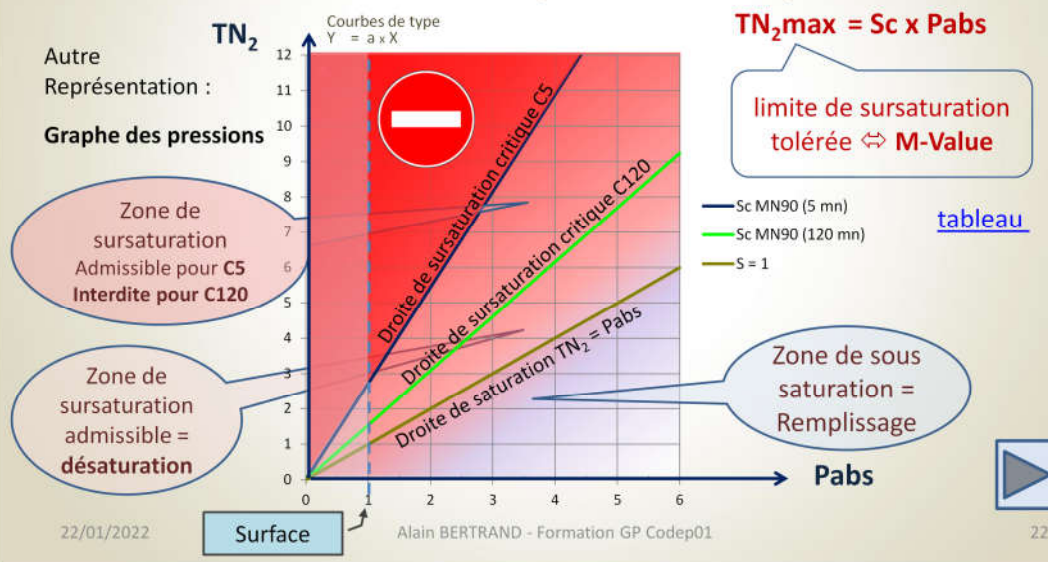
Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

21

Décharge d'un compartiment

Le compartiment peut-il remonter en surface?

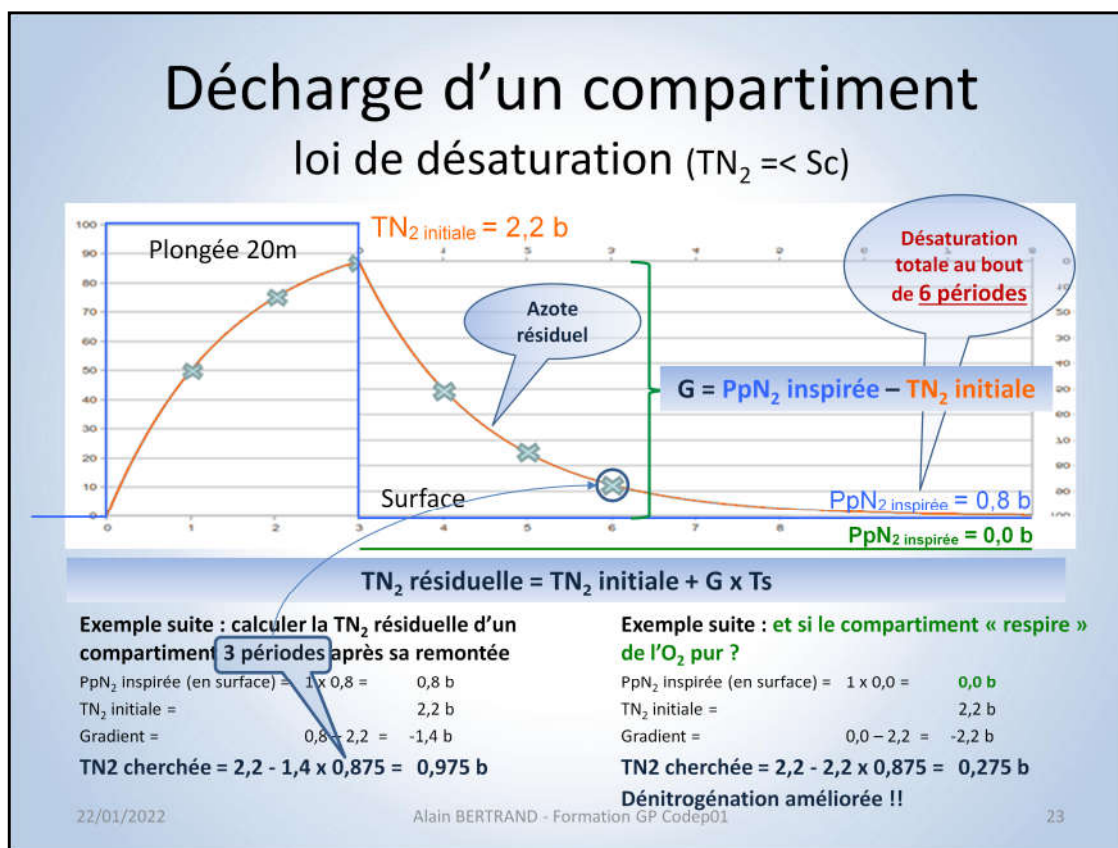
Examen du rapport de saturation $S = TN_2 / Pabs$ \Leftrightarrow $TN_2 = S \times Pabs$



La formulation des M-Values n'est pas due à Haldane mais à Workmann (1965) – voir la diapo « Autres modèles Haldanien ».

Chaque compartiment possède sa droite de sursaturation critique (sur le graphe seuls les extrêmes sont représentés: C5 – C120)

Utilisation de ce type de graphique: voir diapo « diminution du risque »



Azote résiduel (MN90) :

À partir d'un **Intervalle de surface de 15 mn**, seul le compartiment **C120** est pris en compte pour la désaturation (**Azote résiduel - GPS**)

Les autres compartiments, plus rapides, ont tous désaturé en dessous de la TN_2 du C120

La désaturation complète nécessite 6 périodes:

6 périodes = 12 h pour retrouver l'état d'équilibre (plongée simple)

Profondeur du palier

- **Palier obligatoire si $S > Sc \Leftrightarrow TN_2 > Sc$**

Exemple suite : le compartiment **C20** est immergé et « respire » de l'air à 20 m pendant 3 périodes (60 mn) - Résultat précédemment trouvé : **$TN_2 = 2,2 \text{ b}$**

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

$Sc = 2,04$ donc palier obligatoire pour C20 car $TN_2 > Sc$

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

$TN_2 / P_{abs} = Sc$ donc **$P_{abs} = TN_2 / Sc$**

$P_{abs} = 2,2 / 2,04 = 1,078 \text{ b}$ soit $\sim 0,8 \text{ m}$ donc palier à 3 m

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

Compartiment directeur

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

Pabs	4,5 b
TN2 initiale	0,8 b
PpN2 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	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		100%

TN2 cherchée = TN2 initiale + G x 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+2,8x1 3,60 b	=0,8+2,8x0,9375 3,43 b	=0,8+2,8x0,75 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 table	6 m	6 m	6 m

Quel est le compartiment directeur ?

C10 compartiment directeur car le plus contraignant : impose le palier le plus profond

Autres modèles Haldanien & concept des M-values

M-value = valeur maximum (de la TN_2) : limite de sursaturation tolérée par un compartiment

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

Problématique **plongées longues et profondes** : modèle US-Navy de l'époque non satisfaisant pour chaque compartiment :

- Série de Sc fonction de la **Profondeur** (si Prof \nearrow : $Sc \searrow$)
- relation linéaire entre Profondeur et Tension gaz inerte (N_2 et Hélium) tolérée
- M-value = droite limite de sursaturation
 $TN_2 \text{ max}$

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) et de la **Pression absolue**

Publications de son modèle:

=> Utilisé par de nombreux ordinateurs du marché
16 compartiments dont le plus long est 635 mn !

Autres modèles:

Spencer (années 70): adapte les tables US-Navy après détection de bulles silencieuses par effet Doppler

En France: **COMEX** développe ses modèles pour travailleurs Hyperbare. Tables MT74 puis MT92

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

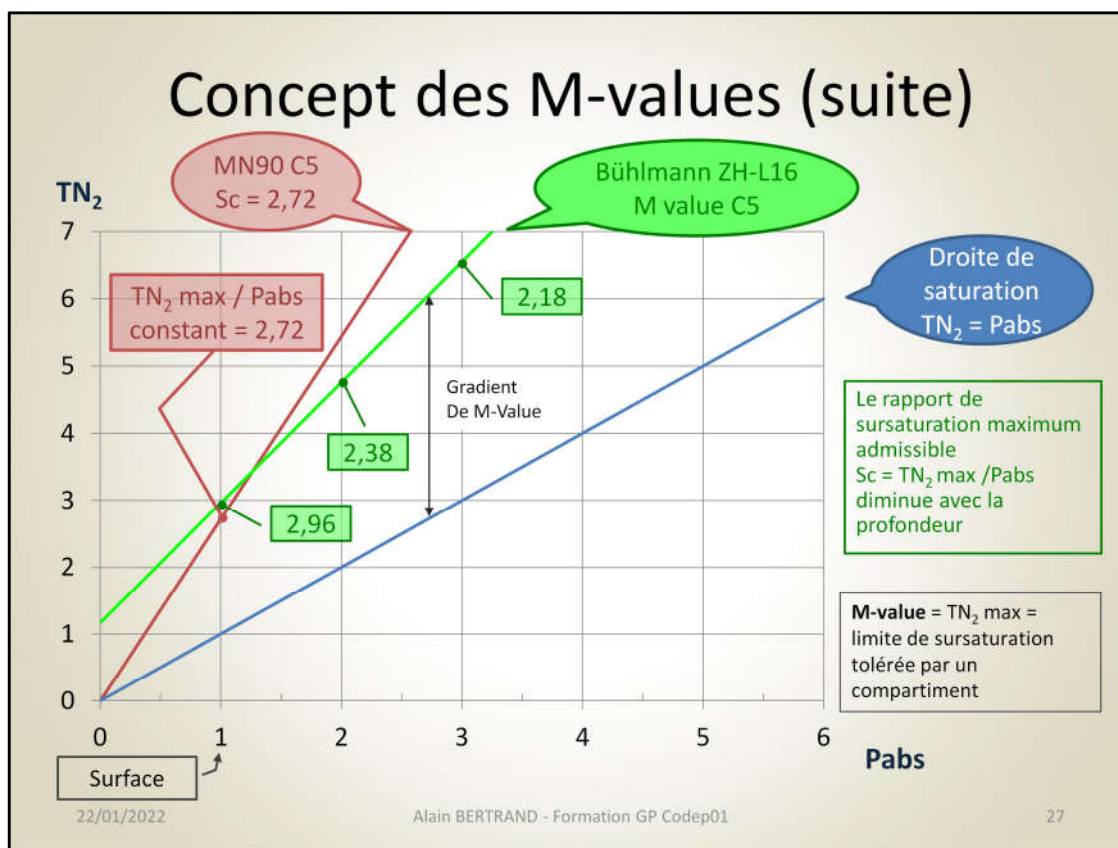
26

Bühlmann :

ZH: Zurich – L : limit – 12 ou 16 = nbre de M-Values

2 plongées simples sont espacées de 6 x 635 mn soit: $6 \times (120 \times 5 + 35) = 63h\ 30mn$! Soit un peu **plus de 2,5 j** !!

Une semaine de plongée: les compartiments « long » ne désaturent jamais complètement et se chargent progressivement!



Le graphique montre 2 M-Values :

- Celle du compartiment C5 de la MN90 (en rouge)
- Celle du compartiment C5 de l'algorithme Bühlmann ZH-L16 (en vert)

MN90: le Sc est fixe (2.72)

ZH-L16: le Sc diminue avec la profondeur

Caractéristiques des modèles (néo) Haldanien

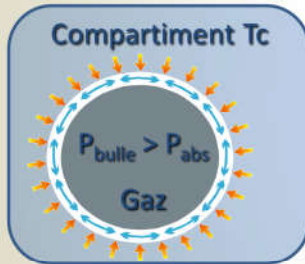
- Air respiré sous pression \Leftrightarrow dissolution N_2 dans nombre fini de compartiments qui représentent le plongeur (12 pour MN90, 16 pour Bühlmann)
- Échanges alvéole/sang et sang/compartiment considérés instantanés
- Compartiment défini par:
 - Sa **période** définissant la vitesse de charge / décharge: Plus les compartiments sont irrigués (modèle à perfusion), plus l'équilibre des pressions est réalisé rapidement (période courte = taux de perfusion élevé – période longue = tissus peu vascularisés)
 - Un **Critère de remontée** : coefficient S_c ou **limite de sursaturation admissible** (M-value) – 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 homogène du gaz dissous
 - Pas d'échanges entre les compartiments
 - Charge et décharge sont symétriques (même vitesse)
 - Bonne désaturation = désaturation **sans bulles** \Leftrightarrow **bulles = accident !**

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
Repris par Hennessy en 1988 => tables BSAC (GB)
- 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: modèles DIPHASIQUE**
 - **VPM** (Varying Permeability Model): modèle à perméabilité variable développé par David **Yount** (~1980 Hawaï) puis **Éric Baker** (2002 – 2005)
modèle libre d'accès
 - **RGBM** (modèle à faible gradient de bulle) travaux découlant de VPM (~1991 - Bruce **Wienke**) modèle exploité commercialement, protégé par secret industriel
 - Modèle adaptatif de **Bühlmann** (ZH-L8ADT **MB** ou ZH-L16ADT **MB**) utilisé dans certains ordinateur Uwatec: (MB: microbulles, + cardiofréquence-mètre)

Principes du modèle VPM

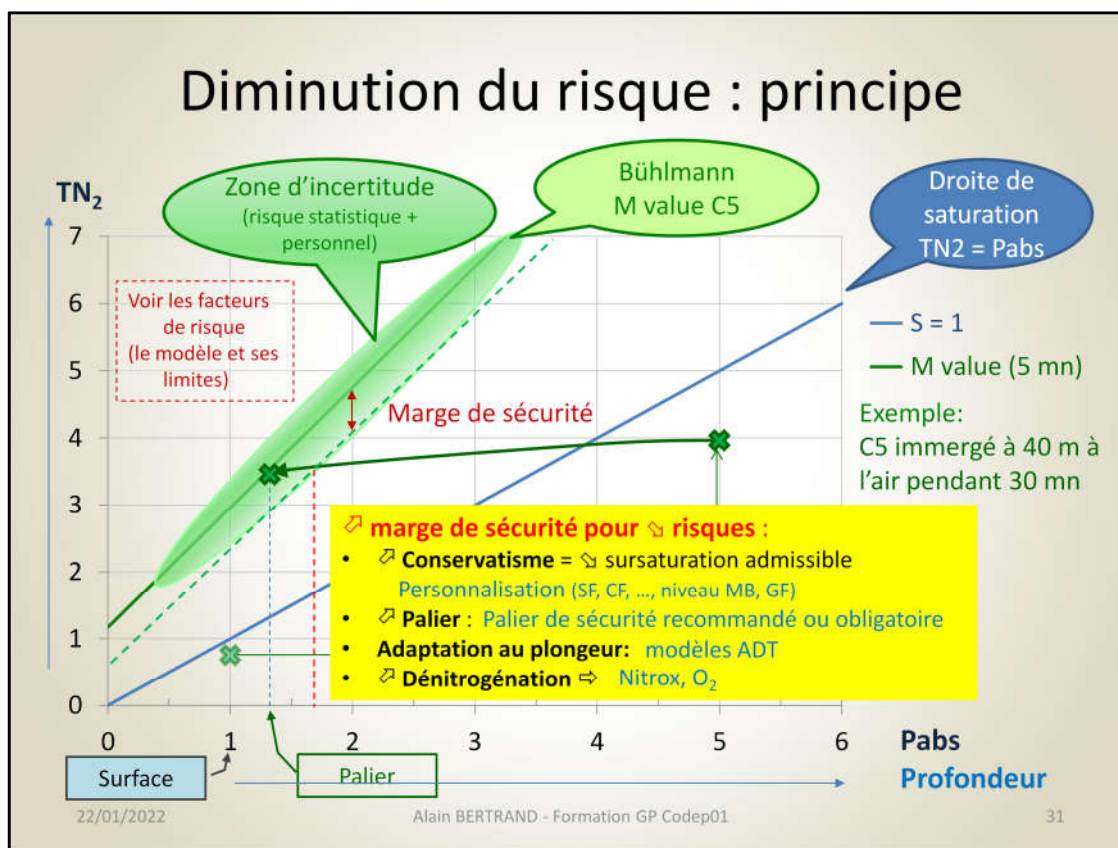
- Dissolution identique au modèle Haldanien de Bühlmann ZH-L16
- Prise en compte de noyaux gazeux préexistants:
les 16 compartiments Bühlmann sont « équipés » d'une micro bulle
- Critère de remontée: la bulle ne doit pas dépasser un volume critique



À 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 (logiciel V-planner)
- VdR lente, Paliers plus profonds \Rightarrow filtrage des bulles avant leur croissance



Les programmes de décompression des différents ordinateurs du marché permettent d'introduire des notions de conservatisme dans leurs calculs afin de diminuer le risque lié à la décompression.

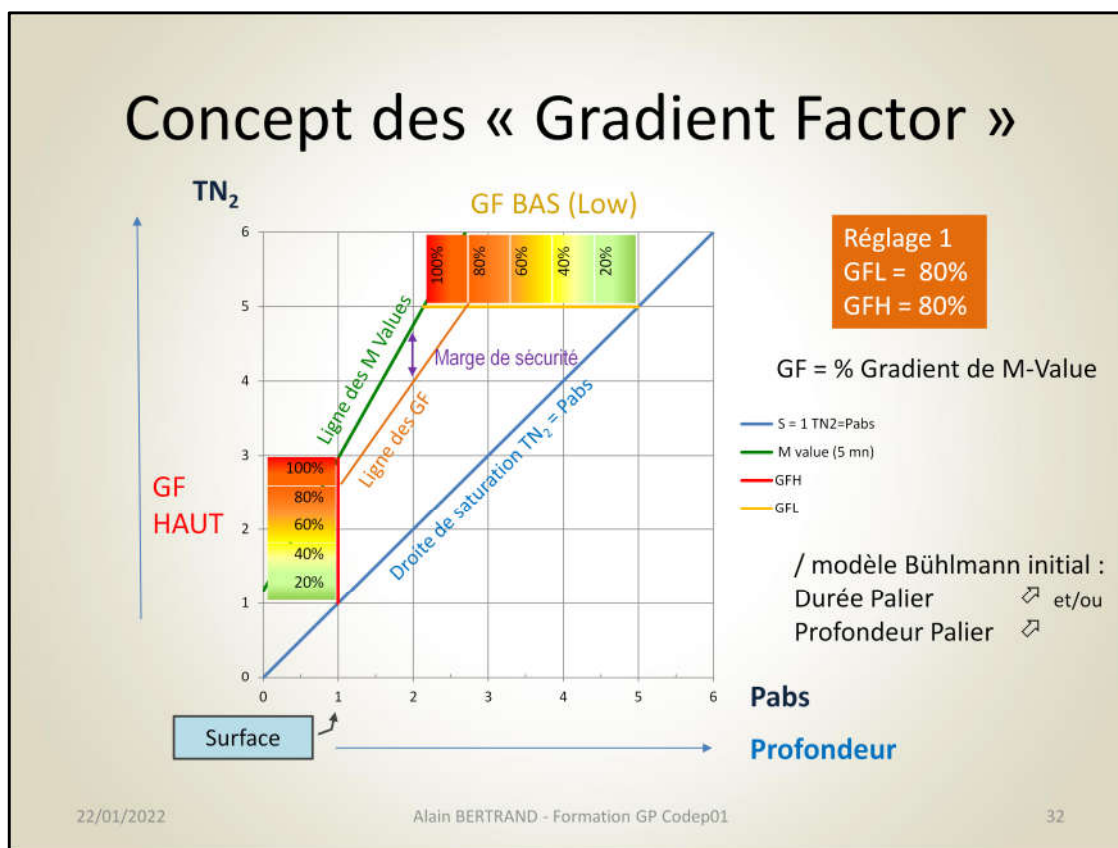
Ces réglages de personnalisation portent différents noms suivant les marques:

- Conservative Factor (CF)
- Safety Factor (SF)
- Facteur personnel, facteur de prudence
- Niveau de microbulles (MB)
- Facteur de gradient (GF)

Pour les modèles ADT: prise en compte de la Fc, de la conso, de la température de la peau...

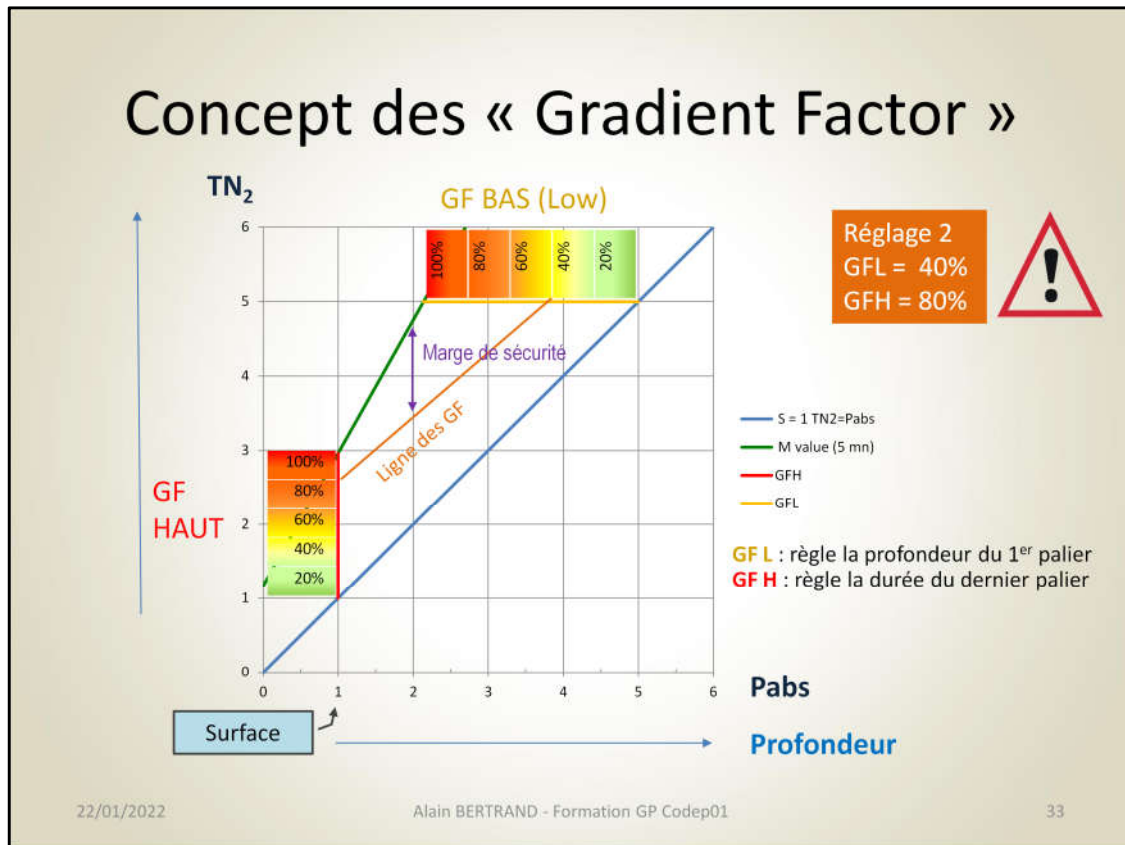
Après le retour en surface, « les jeux sont faits » !

Les notices d'ordinateur en général n'expliquent pas comment sont traités ces personnalisations mais les courbes de plongée sans palier sont de plus en plus conservatrice (diminution du temps sans palier).



Certains ordinateurs offrent la possibilité de régler les GF:

- En choisissant un réglage prédéfini ou
- En réglant le % GF bas et GF haut



Attention aux réglages pour les personnes non averties !

Pour les plongées à l'air préférer 90% / 90% ou 80% / 80%

Considérations sur la Vitesse de Remontée

- Fixée dans les tables de décompression par intuition et empirisme
- **Les modèles Haldaniens n'ont jamais prédit la VdR**
« Pour éviter les ADD, il semble judicieux de réduire la formation de bulles dans le système veineux ...
A cette fin, on conseille de remonter plus lentement ... »
- **Toute décompression est associée à la présence de bulles.**
Constat: ↘ **VdR** ⇔ **moins de bulles circulantes !**
- Actualisation MN90 en 1996: Vitesse inter-palier & palier-surface fixée à 6 m/mn
- ↘ VdR :
 - ↘ gradient et sursaturation
 - ↘ risque lié à la désaturation (mais la durée de décompression ↗)
- Modèles à microbulles => VdR ~ 10 m/mn
- Modèles Bühlmann: VdR variables [20 - 7] m/mn - récemment: [10 - 3] m/mn ou fixe ~ 10 m/mn
- **Remontée rapide - à lire :** <https://www.plongee-plaisir.com/fr/remontee-rapide-et-protocole-de-desaturation/>

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

34

Utiliser la procédure de remontée rapide (préconisée habituellement avec les tables MN90) avec un ordinateur de plongée ne constitue pas un mélange de procédure et est tout à fait acceptable faute de mieux !

Considérations sur les paliers profonds

Paliers profonds	« Deep Stop » ou «paliers intermédiaires» (PDIS – Profile-Dependent Intermediate Stop chez Scubapro)
C'est quoi ?	Palier à durée courte (1 à 2 min) - Profondeur > paliers « haldaniens » : ½ profondeur et > à 12m.
Historique	L'origine des paliers dits « profonds » est attribuée à Richard Pyle, un biologiste marin qui collectait, au milieu des années 1990, des poissons par grande profondeur à Hawaï.
Intérêt	La pratique des « paliers profonds » trouve son origine dans les plongées au trimix . But: éliminer le plus possible de bulles en profondeur, avant de poursuivre sa remontée, afin de prévenir les risques d'accident de désaturation.
Paliers profonds et plongées à l'air	Pour les plongées à l'air, la pratique des paliers profonds semble contre productive voire dangereuse en l'état actuel des recherches. Voir article : https://www.plongee-plaisir.com/fr/paliers-profonds-point-question/
Conclusion	Pratique empirique ne reposant sur aucun modèle de désaturation. Le bon sens recommande de ne pas les utiliser (ou de ne pas en tenir compte) en plongée à l'air. Aucune pénalité de décompression ne s'applique si le palier profond DS est ignoré

Bibliographie

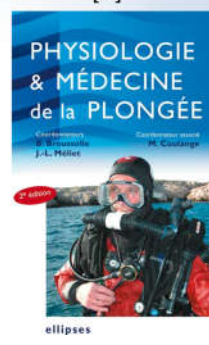
[1]



[2]



[3]



Merci pour votre écoute et votre participation !

Liens:

- Analyse des caractéristiques des ordinateurs de plongée (CTR AURA)
<http://ffesm-ctr-aura.fr/wp-content/uploads/2018/03/GTOrdinateurs-1.pdf>
- Le point sur les paliers profonds (Plongée plaisir)
<https://www.plongee-plaisir.com/fr/paliers-profonds-point-question/>
- Fiche info sur la vitesse de remontée (Plongée plaisir)
<https://www.plongee-plaisir.com/fr/vitesse-de-remontee/>

États de Saturation : rappels & définitions

- **Saturation** : État d'un liquide (compartiment) ayant dissous la quantité maximale de gaz (N_2) possible dans des conditions déterminées de température et de pression.

À saturation: $TN_2 = Pabs$ (loi de Henry)

Remarque: l'air respiré étant un mélange gazeux, la saturation en N_2 n'est jamais atteinte en phase de charge puisque la quantité de N_2 dissoute est limitée par la PpN_2 inspirée: à l'équilibre $TN_2 = PpN_2$.

La saturation ne sera atteinte que pendant la phase de remontée puis pendant la désaturation en surface.

- **Désaturation** : $TN_2 > PpN_2$ - élimination de l'azote en excès - débute pendant la phase de remontée et se termine en surface lors du retour à l'équilibre – se déroule majoritairement en surface
- **Sursaturation** : Correspond à la phase de désaturation pour laquelle: $TN_2 > Pabs$ ou ratio de sursaturation $(TN_2 / Pabs) > 1$
En plongée: État obtenu par diminution de la Pabs (phase de remontée) depuis l'état de saturation.
En surface: diminution de la TN_2 (phase de désaturation) jusqu'à l'état de saturation
- **Sursaturation critique**: État correspondant à la valeur maximale du ratio de sursaturation ou à la TN_2 maximale d'un liquide (compartiment) au-delà de laquelle se produit un dégazage anarchique (selon Haldane).
Pour ne pas franchir la limite il faut arrêter la diminution de Pabs (phase de remontée) donc faire un palier.
- **Coefficient de sursaturation critique (Sc)** : valeur maximale du ratio de sursaturation.
Sa valeur est fixe (dans le cas des MN90) et déterminée empiriquement pour chaque compartiment.
Il permet de calculer la profondeur des paliers ($Pabs = TN_2 \text{ max} / Sc$).
- **Sous saturation**: $TN_2 < Pabs$ - En plongée: phase de charge jusqu'à la saturation obtenue pendant la remontée.
En surface: État obtenu par diminution de la TN_2 (phase de désaturation) depuis l'état de saturation jusqu'à l'équilibre .

Exemples de question GP

Voir plongée plaisir N4 (10^{ème} édition) p 285

Sur quelle loi physique se basent les calculs de saturation dans les tables de décompression fédérales ?

Citez les principaux facteurs qui influent sur la dissolution d'un gaz dans un liquide. Pour chaque facteur donnez un exemple transposable en plongée.

Quel phénomène physique permet à un liquide de se charger ou se décharger d'un gaz.

Quel est le gaz qui nous impose la désaturation en plongée ? Expliquez pourquoi

Expliquez de manière simple, pourquoi la profondeur, la durée et les efforts peuvent influencer la charge en azote lors d'une plongée.

Quels sont les paramètres influant sur la loi de Henry variables en plongée? En tant que GP, quels sont alors vos moyens d'actions pour limiter la charge en azote de votre palanquée ?

Quels sont les paramètres influant sur la loi de Henry dépendants de la physiologie du plongeur ?

En relation avec l'étude de la table de plongée MN90, comment expliquez-vous que le temps de décharge en azote d'un compartiment soit toujours plus long que son temps d'exposition en charge ?

En partant d'une $TN_2 = 4\text{bars}$ avec une $PpN_2\text{ atmosphérique} = 0.8\text{ bar}$, dessinez une courbe de désaturation sur 3 périodes. Ce schéma doit être annoté (Tension initiale, Tension finale, gradient, nombre de période, pourcentage ou assimilé).

Que pouvez-vous dire lorsque le coefficient de sursaturation critique d'un compartiment est dépassé ?

Donnez les principales caractéristiques du modèle Haldanien.

Parmi les différents modèles de désaturation énumérez en 3, et donnez en les principales caractéristiques.

Quelle est la différence majeure entre le modèle Haldanien et le modèle RGBM ?

Expliquez pourquoi la procédure de remontée rapide de la table MN90, peut être compatible avec l'utilisation d'un ordinateur ?

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

38

GP = Responsable de la désaturation des plongeurs qu'il encadre !

Briefing GP (sous l'angle de la déco)

- Prend connaissance de l'expérience et des antécédents de sa palanquée
 - plongées récentes, Intervalle depuis dernière plongée, particularités à signaler ?
- Présente les consignes de déco prévues par le DP
 - peut les adapter (sens de la sécurité) en fonction de sa palanquée
- (Présente les consignes d'organisation prévues par le DP)
- Rappelle les consignes de sécurité
 - celles du DP: concernent toutes les palanquées - les siennes: concernent sa propre palanquée
- Revue de matériel: connaît les moyens de déco des plongeurs qu'il encadre
 - pas de Deep-stop, Personnalisation ?, VdR ?, Planification: courbe de plongée sans palier, paliers?
- Mets au point la communication (surveillance autonomie, gestion déco, ...)

Comportement GP (sous l'angle de la déco)

- Reste vigilant sur le respect des consignes de sécurité surtout avec les plongeurs débutant sans moyen de déco
- Surveille l'autonomie en air de ses plongeurs et s'assure qu'elle est compatible avec la déco prévue
- Veille à limiter les efforts et la consommation de ses plongeurs
 - adapte son palmage, facilite l'équilibre des plongeurs débutants, ...
- Adapte les paramètres de plongée (sens de la sécurité) en fonction des circonstances de la plongée
- Avant la remontée: vérifie la déco et l'autonomie de chacun !
- Ne peut pas imposer sa procédure si les plongeurs encadrés possèdent un ordinateur
- Fait en sorte que les plongeurs qu'il encadre respectent leur propre procédure
- Veille à la cohésion de la palanquée
- Propose un point d'appui pour réaliser les paliers
- Observe et surveille sa palanquée après la plongée

Anticipe les problèmes éventuels

- NB:**
 - Ne pas changer de procédure de déco lors d'une plongée successive
 - Prise en compte des plongeurs avec ordinateur et sans ordinateur = informations différentes ou complémentaires
 - Éviter de « jouer » avec les limites du modèle !

22/01/2022

Alain BERTRAND - Formation GP Codep01

39

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 caissons » 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 !

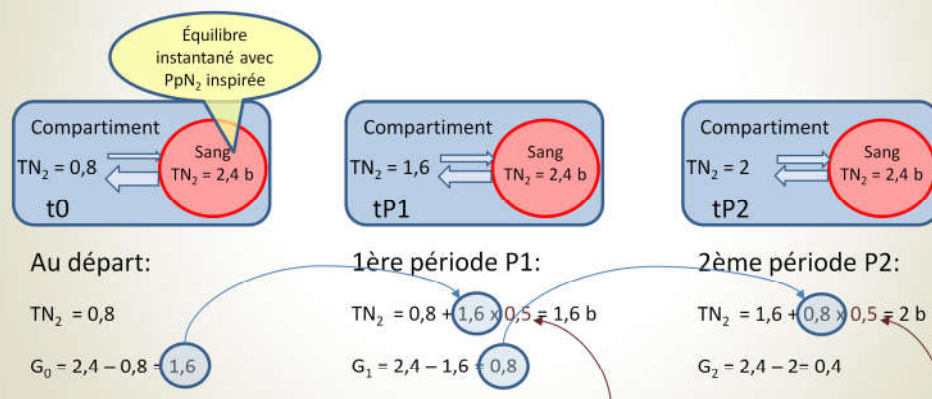
Nous allons voir au fil de la présentation quelles ont été les évolutions jusqu'à nos jours.



Charge d'un compartiment

Méthode itérative (utilisation des résultats du calcul précédent)

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



A chaque période : le compartiment absorbe la moitié du gaz qui lui manque pour atteindre l'équilibre

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 !

Taux de saturation T_s

Calcul Durée quelconque
(t en mn)

$$T_s = 1 - 0,5^{t/P}$$

Exemple: pour $t = 3 \text{ Pér}$

$$T_s = 1 - 0,5^3$$

$$T_s = 1 - 1/8 = 7/8$$

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 - GPS)**
Les autres compartiments, plus rapides, ont tous désaturé en dessous TN_2 du C120
- Jusqu'à quelle profondeur peut-on rester indéfiniment sans palier?
 $TN_2 \text{ max} = Sc \times Pabs \text{ surface} = PpN_2 = 0,8 \times Pabs \text{ fond} \Leftrightarrow Pabs \text{ fond} = Sc / 0,8 = 1,54 / 0,8$

Autres modèles Haldanien & concept des M-values

M-value = limite de sursaturation tolérée par un compartiment

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

Problématique **plongées longues et profondes** : modèle US-Navy de l'époque non satisfaisant pour chaque compartiment :

- Série de Sc fonction de la **Profondeur** (si Prof \neq : Sc \curvearrowright)
- **relation** linéaire entre Profondeur et Tension gaz inerte (N₂ et Hélium) tolérée
- M-value = droite limite de sursaturation **définie par coefficients (M₀, ΔM)** :
 $TN_2 \text{ max} = M_0 + \Delta M \times \text{Prof}$

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 CO₂) et de la **Pression absolue** – M-Values définies par $TN_2 \text{ max} = \text{Coeff A} + (1/\text{coeff B}) \times P_{\text{abs}}$

Publications de son modèle:

=> Utilisé par de nombreux ordinateurs du marché
16 compartiments dont le plus long est 635 mn !

Autres modèles:

Spencer (années 70): adapte les tables US-Navy après détection de bulles silencieuses par effet Doppler

En France: **COMEX** développe ses modèles pour travailleurs Hyperbare. Tables MT74 puis MT92

MN90

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