



La décompression - la désaturation Modèles et ordinateurs de plongée

Thierry FALZONE

stage initial MF2 janvier 2017

Plan du cours

- Les origines de la décompression/désaturation
- La notion de modèle
- Quelques rappels de physiologie :
 - Perfusion/diffusion
 - Pression partielle/tension
 - Saturation : charge et décharge en gaz inerte
 - Tissus/compartiments
- Les MN90
- Le modèle Haldanien
- Les autres modèles (dits « néo-haldaniens »)
- Les ordinateurs de plongée et leurs spécificités
- Annales de sujets de déco MF2 (Mai 2002- sept 2016)

La préhistoire

- Au 17^{ème} siècle, Von Guericke invente une pompe à dépression permettant de modifier la pression atmosphérique : c'est la pompe à vide.
- En 1670 : Robert Boyle (Irlandais) observe un ADD sur une vipère brutalement dépressurisée (grâce à la pompe à vide de Von Guericke) avec présence de bulles de « gaz » dans diverses parties de son corps
- XIX^e siècle : le travail au sec en milieu hyperbare (piles de ponts, mines) entrain → « mal des caissons », bends : traitement à l'alcool avec frictions et ingestion !
- 1854 : la recompression soulage les symptômes
- 1861 : Le Dr Jules Bucquoy formule l'hypothèse que le gaz dissous dans le sang repasse en phase gazeuse quand la pression ambiante chute et occasionne des accidents comparables aux injections d'air dans les veines

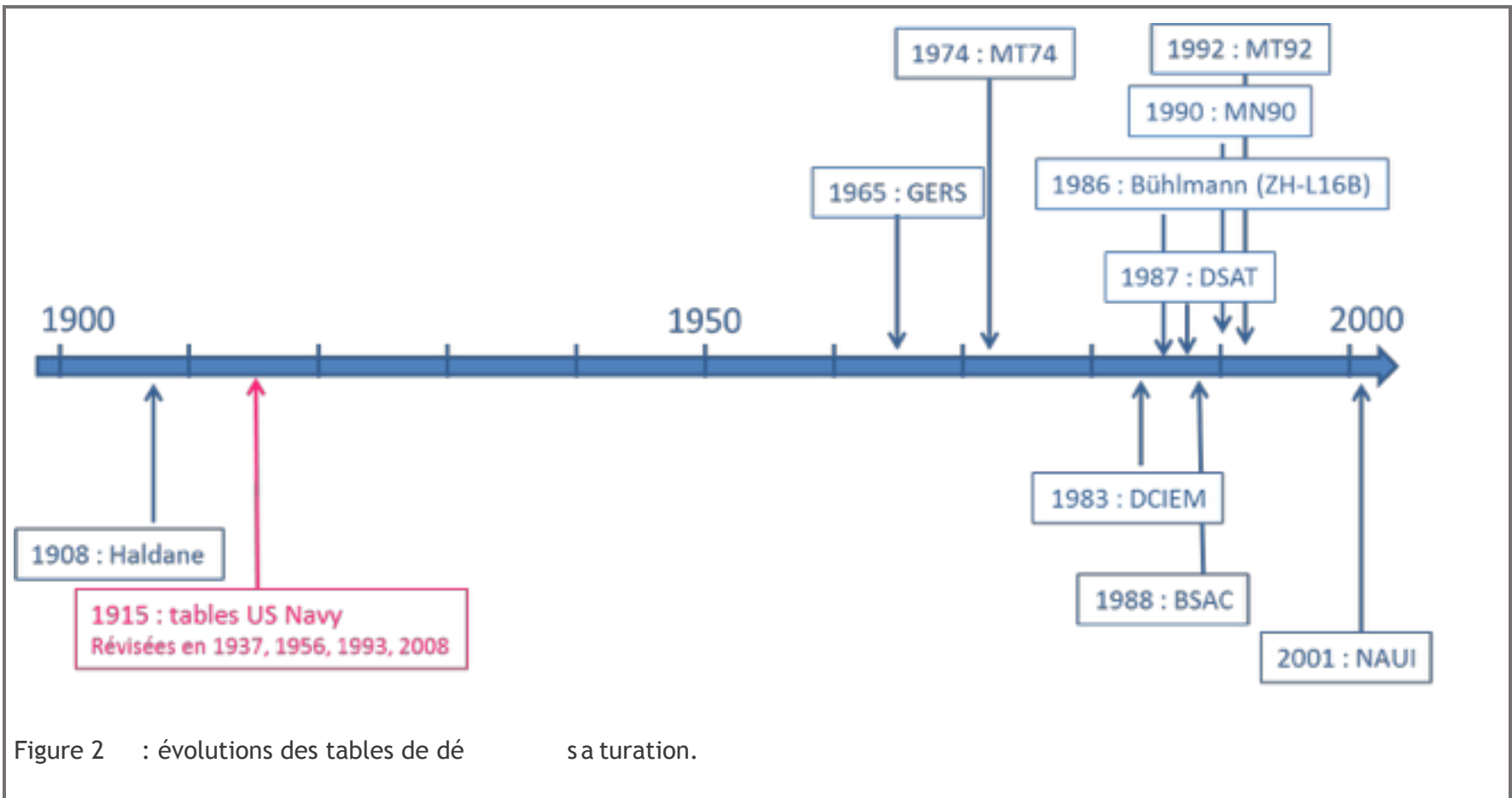
La préhistoire (suite)

- Paul Bert (physiologiste et homme politique français) :
 - Etudie sur des animaux la physiologie de la ventilation et de la respiration ainsi que les effets de l'altitude en plongée entre 1870 et 1890 → il met en évidence le rôle de la **pression partielle** d'oxygène
 - 1878 : il publie un ouvrage complet « La pression barométrique » (1800 pages)
 - Il met en évidence le rôle des bulles d'azote dans l'apparition des ADD et des décès lors des déco rapides (« les bulles qui tuent sont composées essentiellement d'azote avec 15 à 20% de CO₂ ») et propose comme traitement
 - **1 seule descente par jour pour les tubistes et les scaphandriers**
 - **Pour les tubistes** : 1 déco lente avec des temps de retour à la P.ambiante dépendants de la pression de travail
 - **Pour les scaphandriers** : 1 déco lente avec 15 min d'arrêt à mi chemin et la respiration d'O₂ pour améliorer la déco
 - Les travaux de Paul Bert orienteront d'autres thèmes de recherche notamment sur la toxicité de l'oxygène à des pressions élevées dite crise hyperoxique ou effet Paul Bert

La préhistoire (fin)

- John Scott Haldane (physiologiste écossais) :
 - Met en évidence le rôle du CO_2 sanguin dans les échanges gazeux et la décompression.
 - A cette époque, les bends représentent 89% des ADD (les 11% restants sont des ADD du système nerveux (central et médullaire))
 - En 1906 : il est chargé par l'amirauté britannique d'établir un protocole de déco jusqu'à 204 pieds (62m)
 - expérimentation animale (chèvre) → modélisation → validation
 - En 1908 : il publie les premières tables de décompression basées sur un modèle mathématique.
 - Ces travaux et ces tables sont les origines de notre décompression et serviront de base à la « modernisation » et publication d'autres tables et au développement des logiciels de déco que nous connaissons aujourd'hui.

L' évolution des tables de désaturation



L' évolution des modèles de désaturation

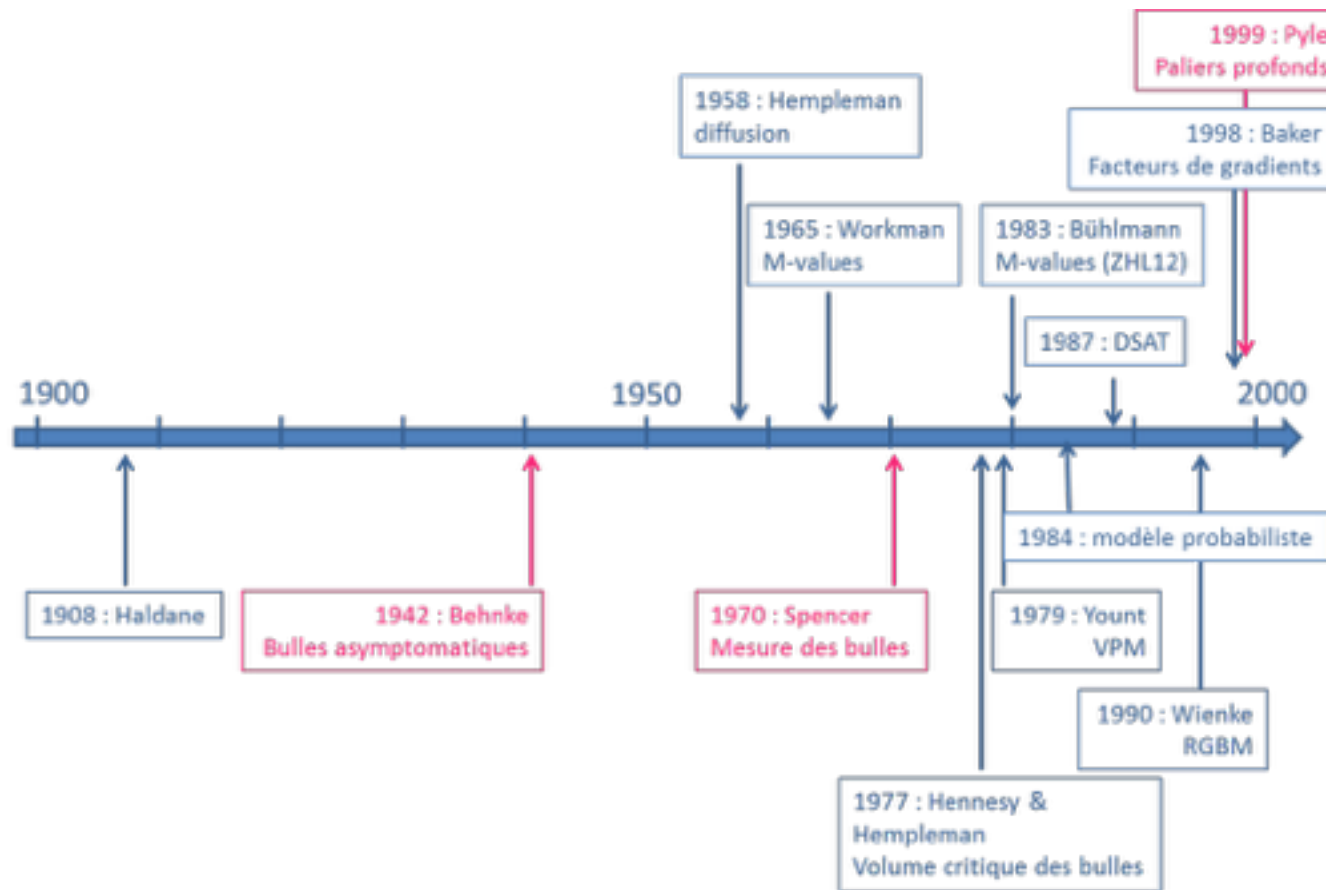


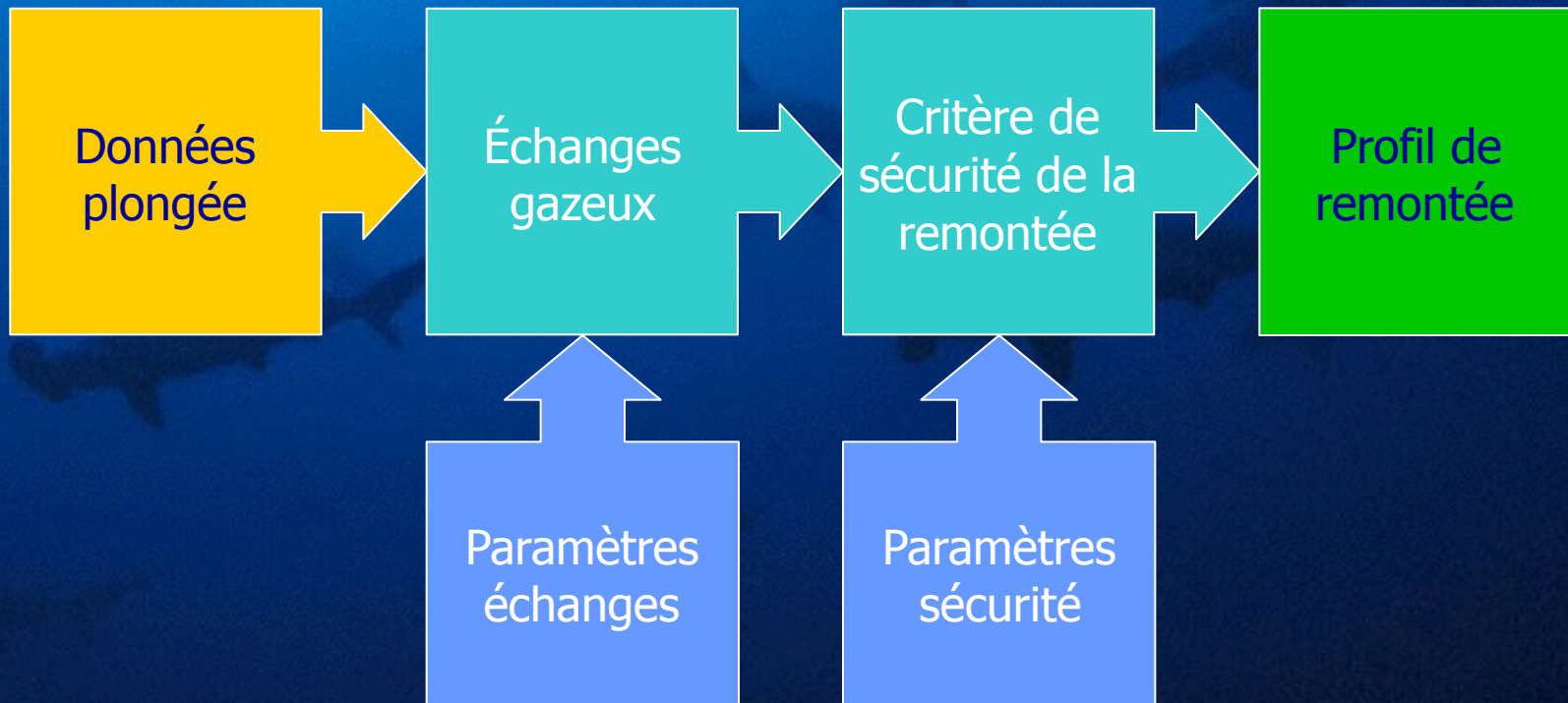
Figure 1 : principales évolutions dans les modèles de désaturation

La notion de « modèle »

- Représentation « simplifiée » de la réalité :
 - Hypothèses (simplificatrices) → théorie
 - Limites d'utilisation (validité des hypothèses)
 - Calibration
 - Validation expérimentale
- Simulation (plus facile et moins dangereux à mettre en œuvre que la réalité)

Structure d'un modèle de déco

(d'après JP. Imbert)

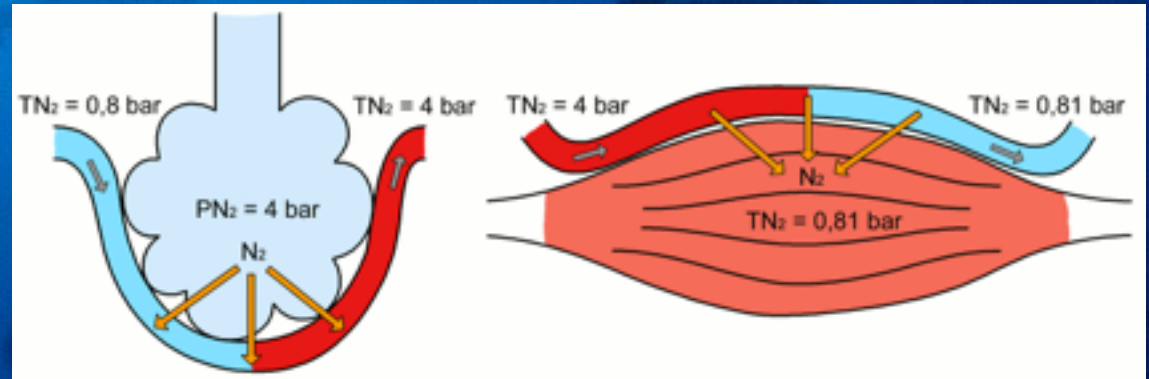


L'approche de Haldane

- Modèle basé sur les échanges gazeux
 - Approche théorique : solubilité de l'azote dans le sang (= perfusion) et dans les tissus adipeux (= diffusion)
 - Etudes basées sur le rapport masse grasse/masse maigre chez la chèvre puis chez le marin britannique
- Modèle de critères de remontée
 - Approche expérimentale (marin britannique analogue à une chèvre)

Hypothèses de Haldane

- La diffusion alvéolaire instantanée
- La diffusion tissulaire instantanée



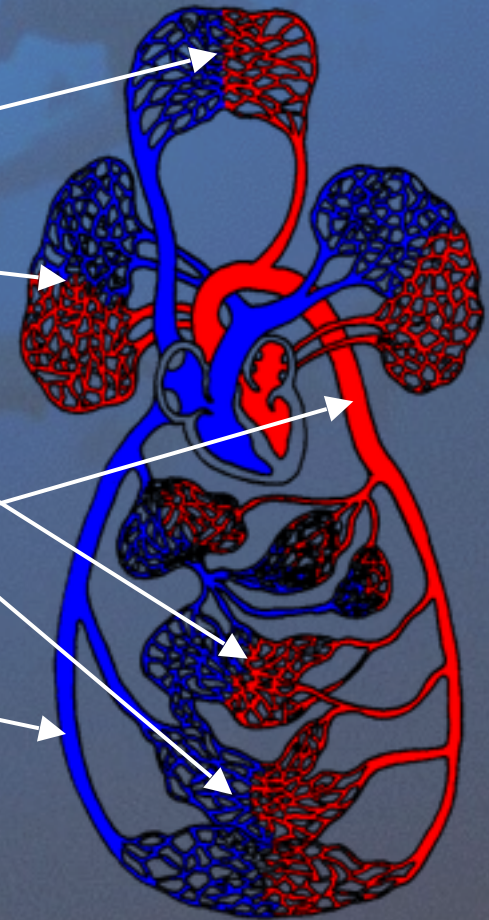
- Les tissus anatomiques sont représentés par des compartiments indépendants les uns des autres : pas de transferts et d'échanges entre eux
- La charge et la décharge en azote sont symétriques
- Le taux de perfusion est constant
- Tout le gaz est dissout (pas de transport de gaz fixé)
- Les bulles sont pathogènes
- 5 tissus pris en compte 5/10/20/40/75

⇒ Perfusion limitante

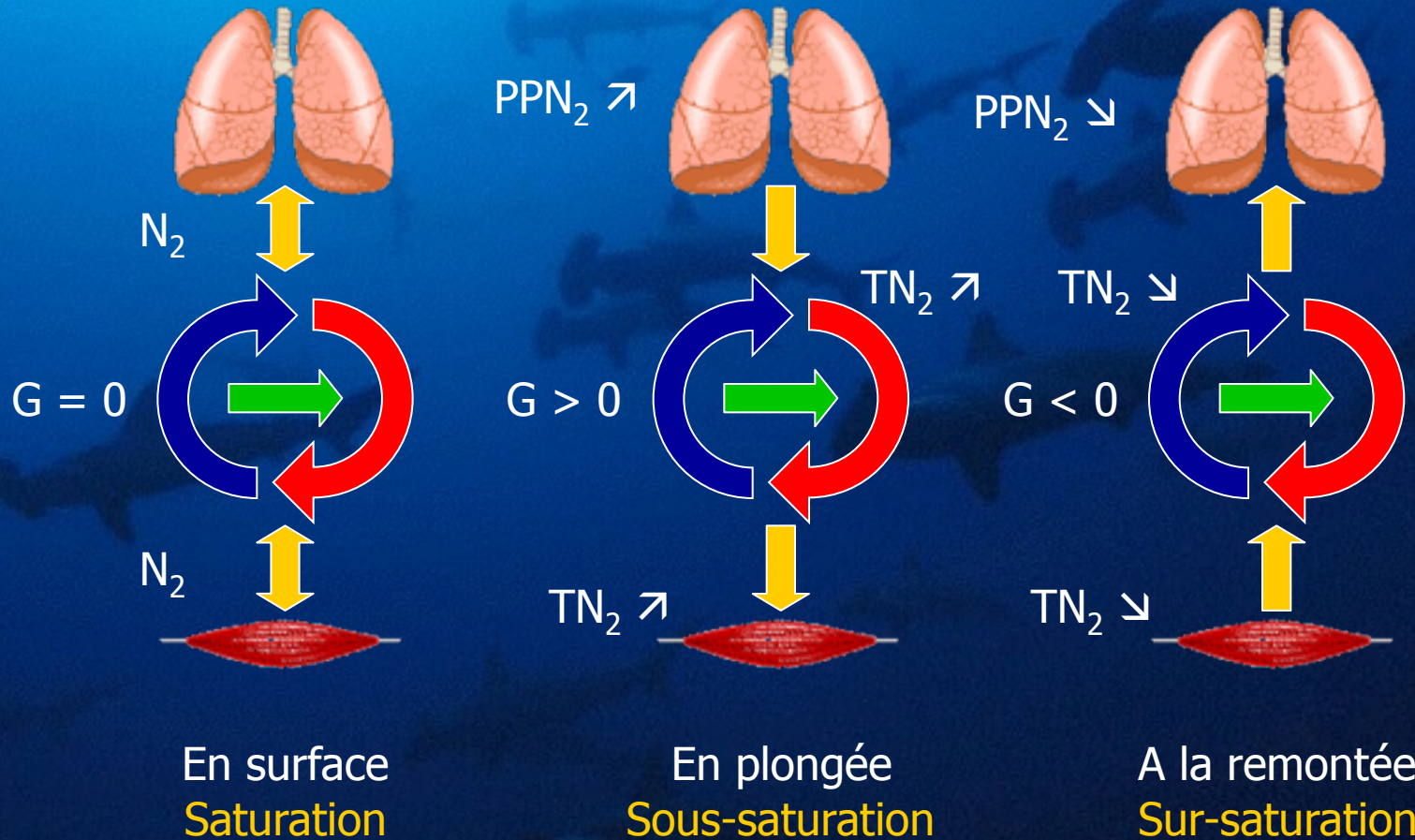
Pour infos : perfusion / diffusion

Diffusion
(cinétique de dissolution)

Perfusion
(cinétique de remplissage d'un tissu)



Les 3 états de saturation



Paramètres en jeu

- La diffusion dépend de :
 - la surface de contact
 - la taille des molécules
 - Gradient de pression
 - De la T°
 - De l'agitation

Capacité du tissu à stocker de l'azote

Quantité d'azote véhiculée par le sang jusqu'au tissu

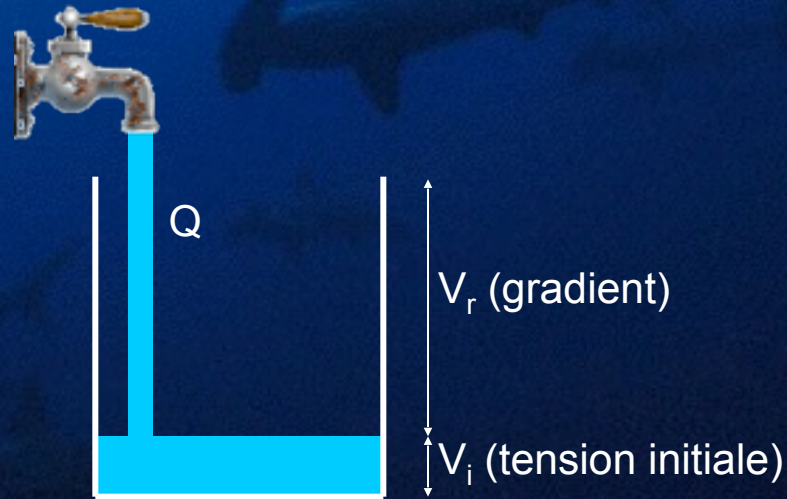
- Le taux de perfusion =

$$\frac{\text{Solubilité gaz-sang} \times \text{débit sanguin}}{\text{Solubilité gaz-tissu} \times \text{volume tissu}}$$

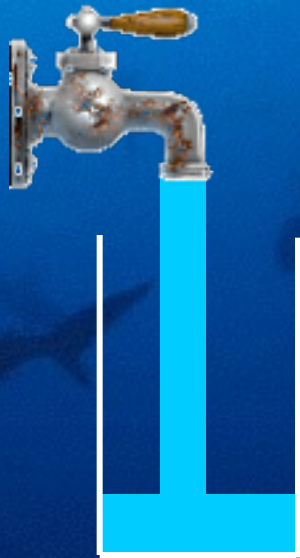
Les compartiments

- Ils représentent un ensemble de tissus anatomiques
- Ces tissus sont plus ou moins perfusés
- Ils ont une certaine capacité à stocker de l'azote en fonction de leur volume et de la solubilité de l'azote dans ce tissu

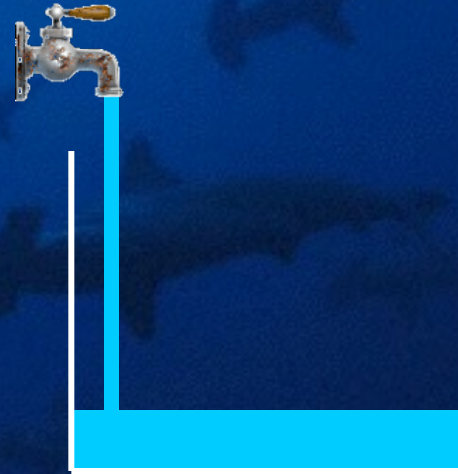
- $Q = Q_0 \times V_r$



Compartiments courts et longs



Compartiment court



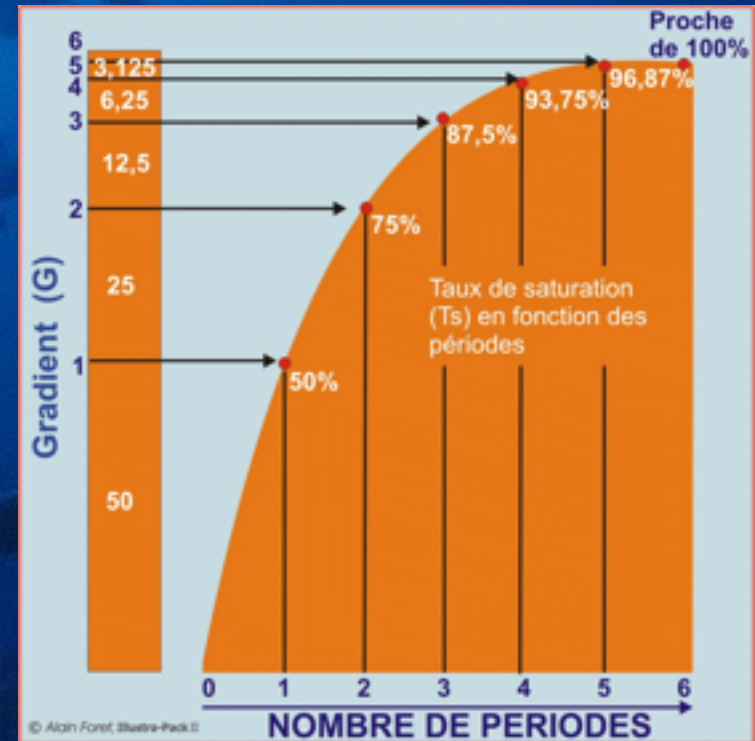
Compartiment long

Le calcul de Haldane

- Le corps humain peut fixer 35 fois plus d'azote que le sang (A saturation) :
 - 1/35 de l'azote total est dissous dans le sang
 - 34/35 dans les tissus
- 1^{er} cycle : le sang délivre 1/35^{ème} de l'excès de N₂
- 2^{ème} cycle : 1/35^{ème} de l'excès restant (34/35)
- 3^{ème} cycle : 1/35^{ème} de l'excès restant (33/35)
- Cumul n cycles : $1/35 \times \sum (34/35)^i$
⇒ fonction exponentielle du temps
- Demi-charge en 24 révolutions
- Environ 1 révolution sanguine par min → T=24 min
- Demi charge en azote au bout de 24 min

Méthodologie de calcul

- Tension initiale (T_i)
- Pression partielle d'azote respirée = P_{N_2}
- Gradient : $G = P_{N_2} - T_i$
- Durée \Rightarrow nombre de périodes \Rightarrow pourcentage de saturation (%sat)
- Tension finale :
 $T_f = T_i + \%sat \times G$



Nb T	1	2	3	4	5	6
%sat	50	75	87,5	93,75	96,87	98,43

Que nous dit le modèle de Haldane ?

- Les tissus sont représentés par des compartiments : 5 identifiés
- Chaque compartiment est caractérisé par sa période représentative de sa perfusion : 5, 10, 20, 40, 75min
⇒ la vitesse de charge = la vitesse de décharge
- En 1 période, le compartiment échange la moitié du gradient de pression ($G = \text{pression partielle} - \text{tension}$)
⇒ la charge et la décharge sont exponentielles
- La remontée est possible si P_2 (prof maxi admissible avant un ADD) divisée par P_1 (prof de séjour) ≤ 2
- $$P_2 / P_1 \leq 2$$
- Un Sc fixe = 1,58 pour tous les compartiments identifiés
⇒ critère imposant les paliers (tous les 10 pieds / 3m)

Rappels : compartiments et tissus

- 1 compartiment ne représente pas 1 seul tissu
- 1 tissu anatomique est un tissu « réel » de nature tel que le tissu osseux; le tissu musculaire; le tissu nerveux etc ...
- 1 compartiment est défini par un ensemble de tissus physiologiques de même nature, ou de nature différente, se comportant de la même manière en terme de charge et décharge en azote; de période et de Sc .
- Les différents tissus (dans leur ensemble) semblent se comporter comme un ensemble de compartiments
- La perfusion diminue des compartiment courts → longs
- Les 5 compartiments identifiés à l'époque sont :
 - le SNC; l'oreille interne; la peau; les muscles; les os

Stratégie de décompression

- Minimiser la durée de la décompression
- Optimiser la VDR (vitesse de remontée)
- Maximiser le gradient d'azote
- Remonter à la profondeur minimale admissible pour le compartiment directeur pour effectuer un palier :
 - Accélérer la décharge des tissus courts
 - Minimiser la charge des tissus longs

Application : les tables MN90

- 12 compartiments 5 à 120min
- 13^{ème} compartiment 240min pour la respiration d'O₂ en surface
- 1 Sc par compartiment : $TN_2 / Sc = P_{abs}$
- Population test : 1095 plongeurs d'âge moyen de 32 ans
- 2 plongées par 24h et 5 jours consécutifs maximum
- Plongée unique après 12h de surface au niveau de la mer (= 6 fois le compartiment 120min)
- Le compartiment directeur impose le 1er palier : le palier le plus bas

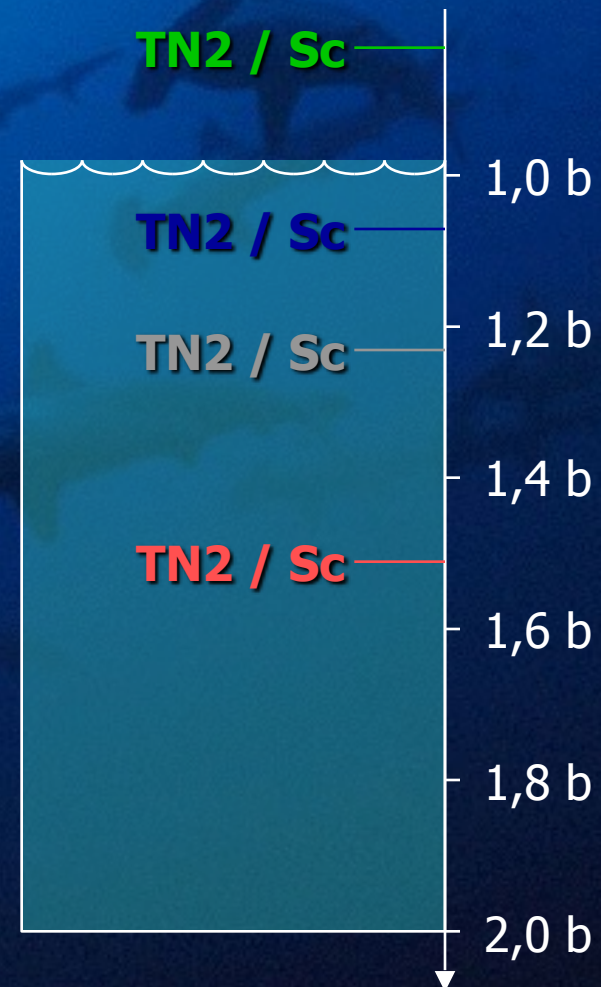
MN90 : les coefficients Sc

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

- Signification des Sc :
 - En surface : $TN2 / Sc < 1$ bar
 - ⇒ $TN2 < Sc$ en surface
 - Sc = TN2 maximale admissible en surface
 - C120 moins tolérant que C5

MN90 : Compartiment directeur

- Pour chaque compartiment on calcule TN_2 / Sc qui représente la P_{abs} minimum autorisée
- Le compartiment directeur est celui qui impose le premier stop \Rightarrow valeur P_{abs} la plus grande
- $TN_2 \leq Sc \times P_{abs}$
 $TN_2 \leq Sc \times (1 + Prof/10)$
 $TN_2 \leq Sc + (Sc / 10) \times Prof$



MN90 : Compartiment directeur

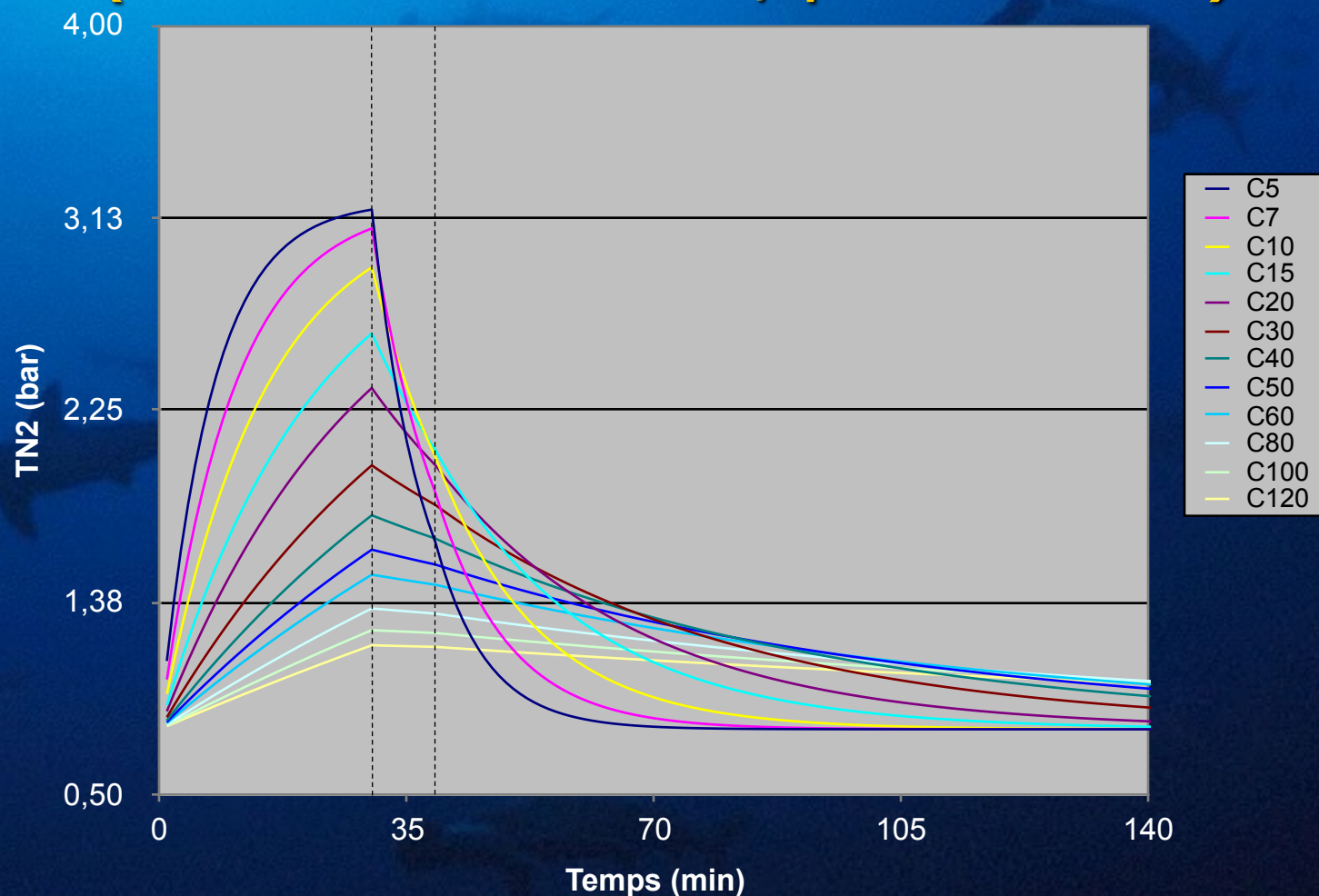
En pratique :

- Plongée profonde mais courte :
→ compartiment court
- Plongée peu profonde et longue :
→ compartiment long
- Plongée longue et profonde :
→ compartiment court → long
- Plongées répétitives :
→ compartiment très long !

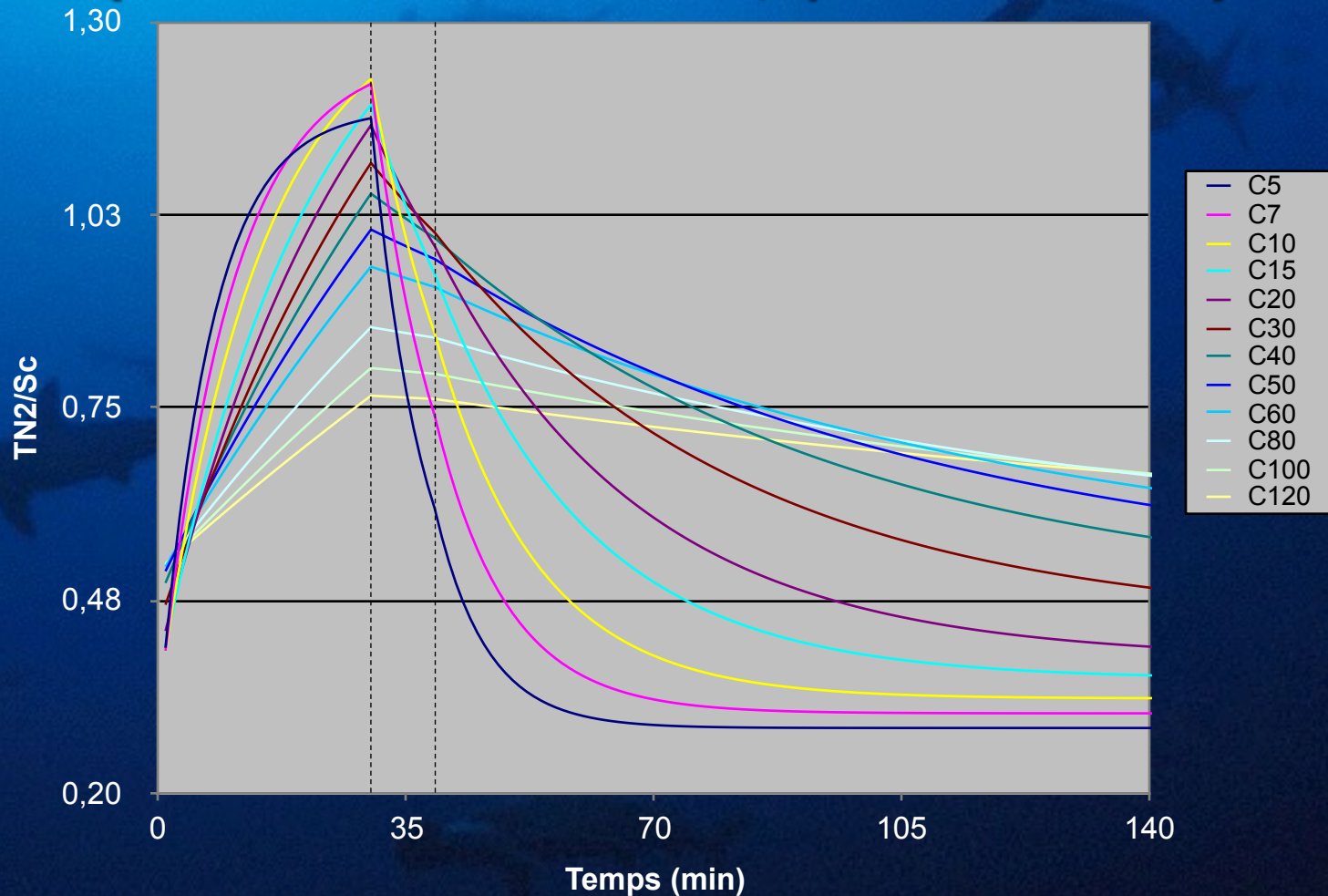


MN90 : Compartiment directeur

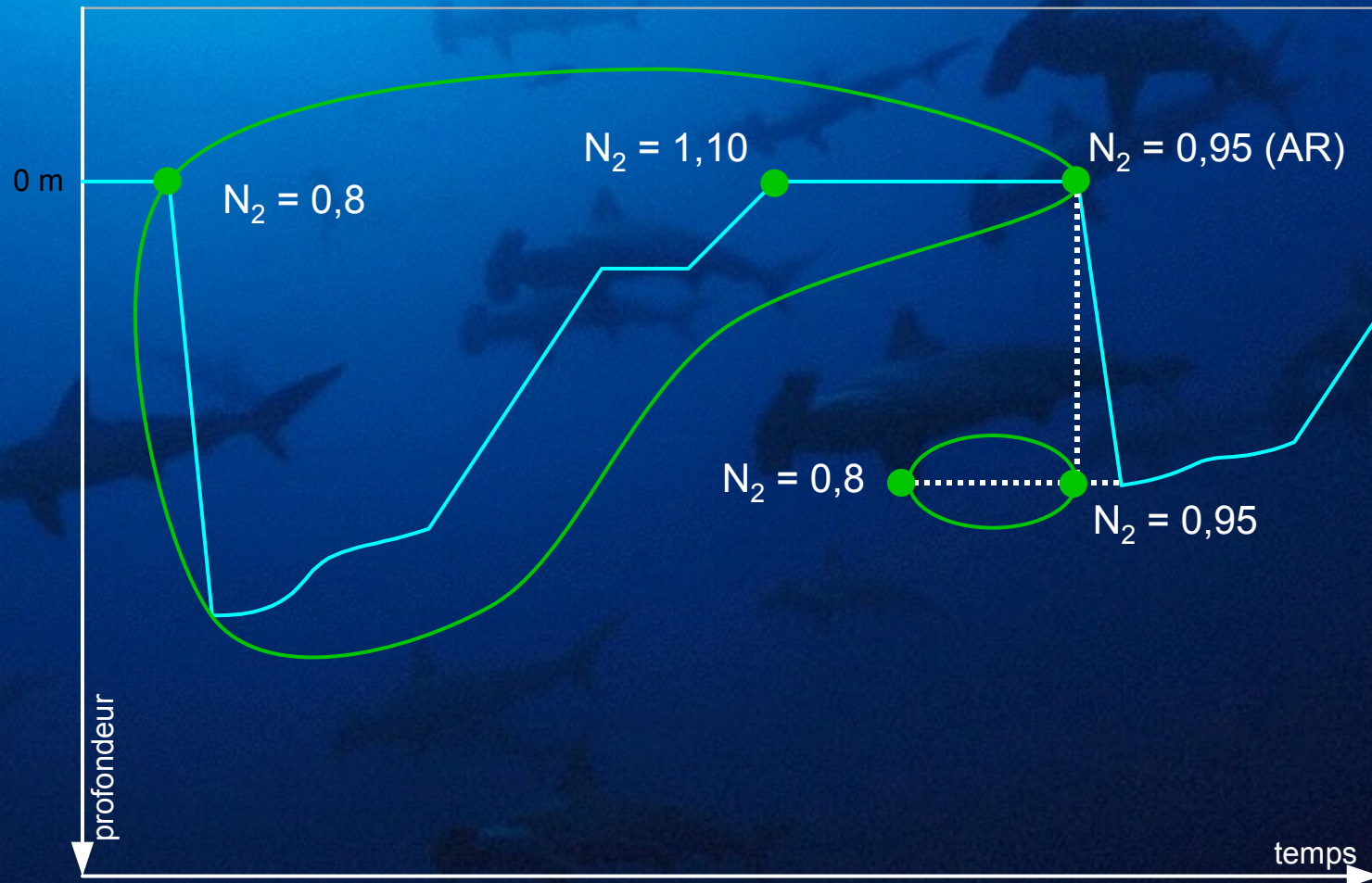
(ex : 30 min à 30m, palier 9 min)



MN90 : Compartiment directeur (ex : 30 min à 30m, palier 9 min)



Application à la majoration



Application à la majoration

- Le C120 devient directeur après 15 min d'intervalle de surface
- T_f = tension en fin de plongée
- $T_i = 0,8$
- $PN2 = PN2$ à la prof de la plongée successive
- $\%sat = (T_f - T_i) / (PN2 - T_i)$

- Rappel définition majoration = c'est le temps (fictif en réalité) qu'il aurait fallu passer à la profondeur de la seconde plongée pour avoir la même quantité d'azote dissous que l'on a au début de cette seconde plongée.

Le modele Haldanien : aujourd'hui un modèle à succès

- Flexibilité +++ :
 - Nb compartiments : 6 à 16
 - Périodes choisies : 3min à 720min
 - Coefficients Sc : fixes ou variables
- Simplicité : un seul paramètre facile à mesurer : la pression
- Facilité de mise en œuvre : ordinateurs

Mais aussi des limites !

- Présence de μ -bulles circulantes à la décharge (forme gazeuse)
 - Équilibre alvéolaire ralenti par les μ -bulles « silencieuses »
 - Décharge plus lente que la charge du fait des micro-bulles (\Rightarrow modèle sigmoïde, modèle à décharge linéaire)
 - Équilibre tissulaire non instantané notamment dans les tissus lents (cartilages articulaires)
 - Taux de perfusion variable à l'effort (augmentation de la température et de la perfusion)
 - Composition du gaz alvéolaire différente de celle du gaz respiré (vapeur d' H_2O et CO_2 sont indépendants de la pression subie)
 - Développé pour des plongées « carrées » (quid des yoyos, remontées rapide etc ...)
-
- Approfondissement de la recherche (militaires, plongée tech)
 - Utilisation de l'hélium (200 fois plus soluble que l' N_2 ; 2 gaz neutres)
 - Nouveaux modèles

Valery Hempleman (1952)

- Le constat : les bends sont consécutifs aux plongées courtes et profondes ou longues et peu profondes
- La cause : un seul tissu incriminé : le cartilage articulaire car non vascularisé mais entouré d'une membrane synoviale très vascularisée
⇒ **diffusion** limitante
- $T_{N_2} = k \cdot \text{prof} \cdot \sqrt{t}$ (Equation de Fick)
- Courbe de sécu NDL = $\text{prof} \cdot \sqrt{t} \leq 500 \text{ ft} \cdot \text{min}^{1/2}$
- Critère de remontée : $T_{N_2} - P_{\text{abs}} \leq 30 \text{ fsw}$
- (ft et fsw = unités de mesure en pieds)
- L'élimination du gaz est 1,5 fois plus lente que l'absorption.
- Tables BSAC de la Royal Navy (adaptation Hennessy)

Le Dr Robert Workman (1965)

- Au milieu des années 60, R.Workman (médecin et capitaine dans l'US Navy) emploie pour la 1ere fois le terme M-Value alors qu'il effectue des recherches pour le compte du NEDU (US Navy Expérimental Diving Unit)
- « M » pour Maximum et « Value » pour valeur
- Pour une pression ambiante donnée, une M-Value est définie comme étant la pression maxi qu'un compartiment hypothétique peut supporter sans présenter de symptôme de MDD ... En d'autres termes, c'est la limite de l'écart toléré entre la pression du gaz inerte (azote ou hélium) et la pression ambiante ... Et ce pour chaque compartiment (et pour chaque profondeur)
-
- C'est une généralisation du modèle de Haldane incluant l'He = modèle néo-Haldanien.
- Le seuil maxi de tension d' N_2 (ou d'hélium) dépend du compartiment et de la profondeur :
$$M = M_0 + \Delta M \cdot Prof$$
- M : valeur **M**axi d'azote tolérable à la profondeur courante ($M_0 \equiv Sc$)
- PS : l'ordinateur OSTC est aujourd'hui le seul permettant de régler manuellement les M-Values.

Les M-Values

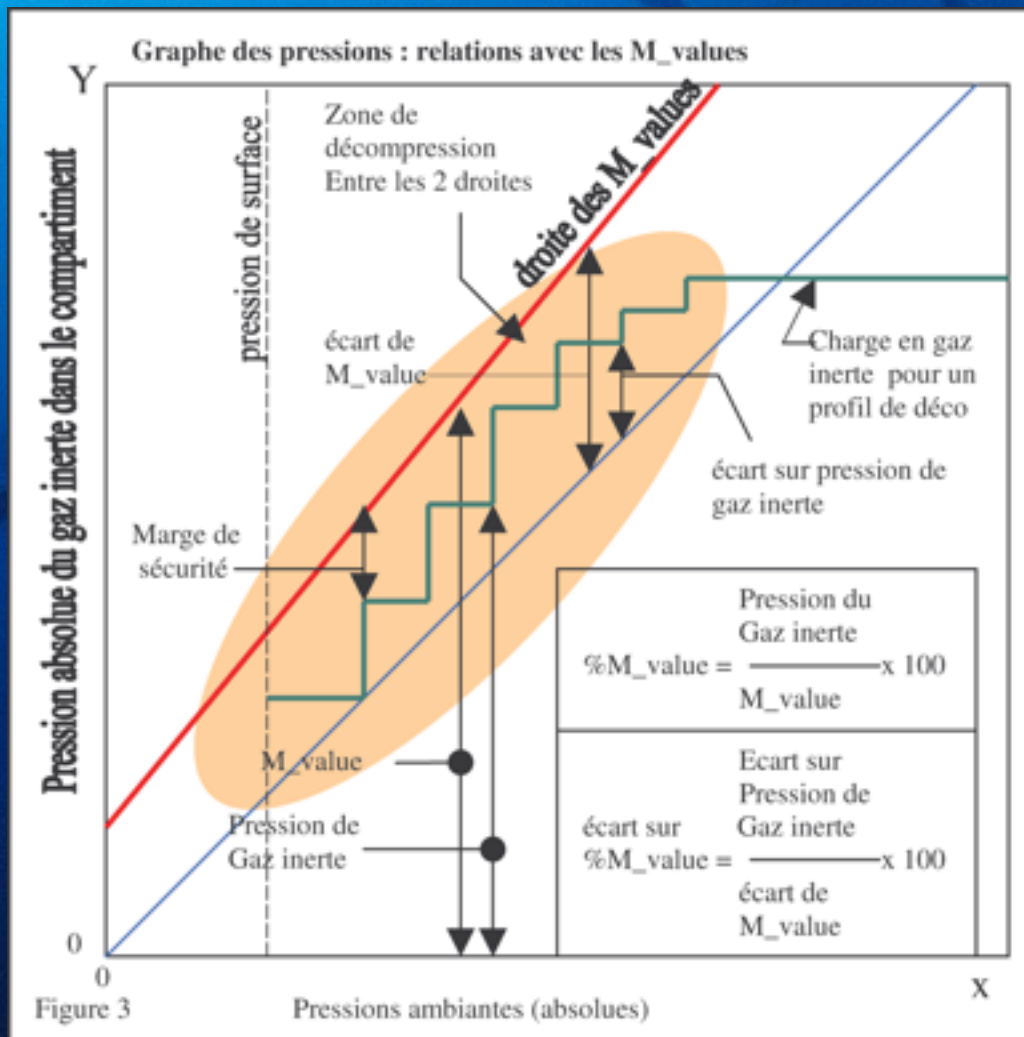


- « Une ligne noire dans une zone grise »
- Les M-Values sont la pression partielle maximale tolérable de l'azote et de l'hélium pour chaque compartiment et pour chaque profondeur.

Droite des M-values

Bulles symptomatiques	Symptômes massifs
Bulles silencieuses	Symptômes limités

Droite des M-values



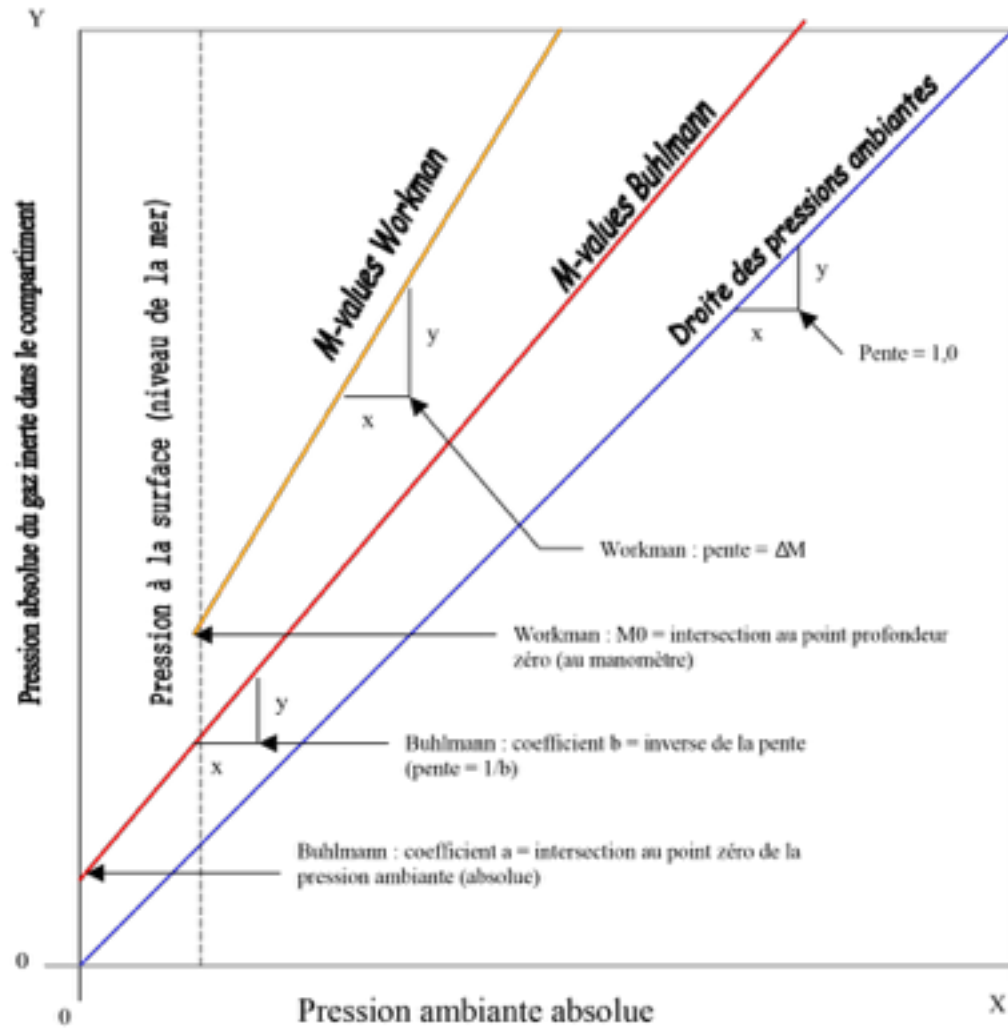
Le Pr Albert.A.Bühlmann (1983)

- Il entreprit ses recherches sur la déco en 1959 à Zurich en Suisse et poursuivit ses travaux durant 30 ans.
- En 1983, il publia la 1ere édition du Tauchmedizin qui est le seul ouvrage complet sur la décompression depuis celui de Paul Bert en 1878 et qui reprend la plupart des concepts et expériences réalisées.
- Il prend en compte la composition de l'air alvéolaire et non la composition de l'air ambiant. En effet, l'air alvéolaire ne suit pas la loi de Dalton et donc, lors d'une montée en altitude, la P_{CO_2} et P_{H_2O} sont constantes et la PO_2 chute de manière importante, bcp + que la loi de Dalton ne le laisse prévoir. Donc la PN_2 alvéolaire, est ce qu'il reste.
- Il va donc proposer différentes tables en fonction de l'altitude.
- Il calcule et publie 2 jeux de M-Values :
 - ZH-L12 en 1983 et
 - ZH-L16 en 1990 (ZH pour Zurich / L pour Limite et 12 et 16 le nombre de couple de coefficients (a ou b) établis pour chaque compartiment et pour chaque période (pour l'azote et pour l'hélium).
- Les M-Values de Buhlmann sont similaires à celles de Workman.

Droite des M-values

GRAPHE DE PRESSION

M-values style Worman
M-values style Buhlmann



Les facteurs de gradient (GF)

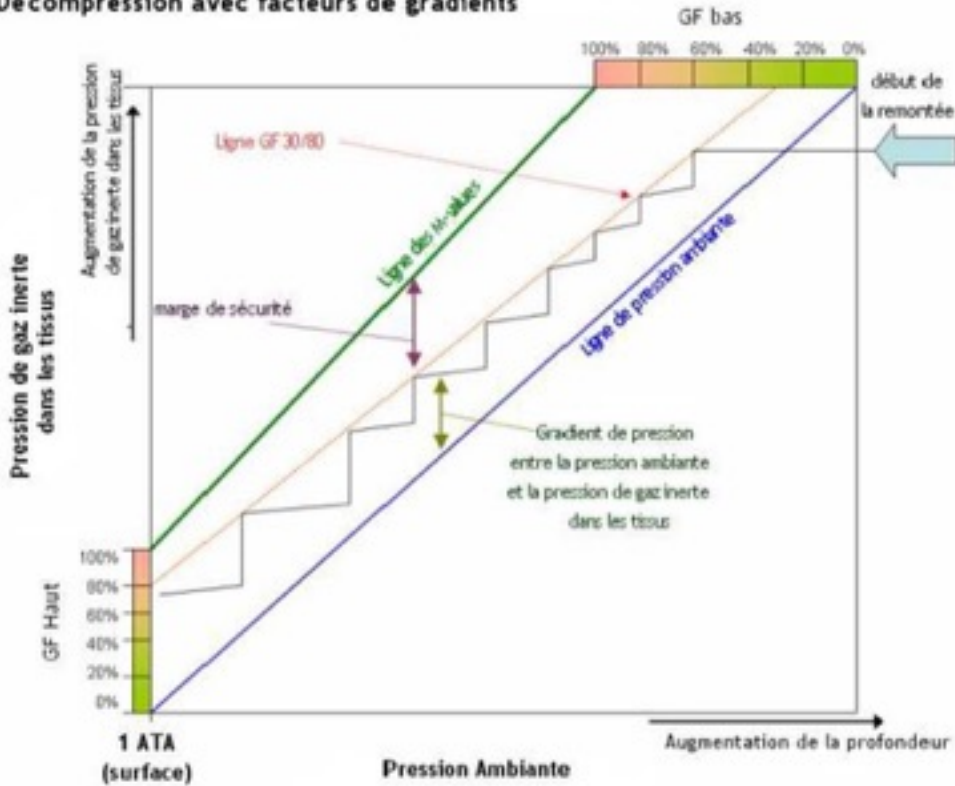
- C'est l'application d'un pourcentage permettant d'abaisser les M-values → sécurisation ++ de la desaturation
- Ce pourcentage varie au cours de la décompression entre 2 valeurs

GF_{l_0} fixe la profondeur du 1^{er} palier (low ou bas)

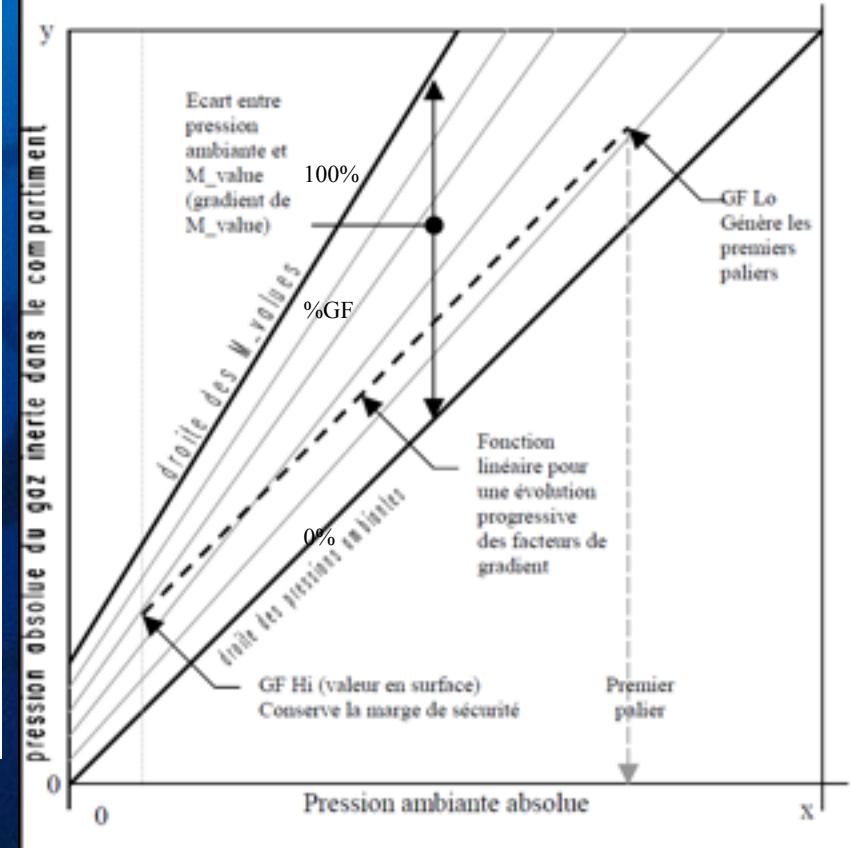
GF_{hi} fixe la durée de la décompression (high ou haut)

Les facteurs de gradient (GF)

Décompression avec facteurs de gradients



Graphes des pressions : Facteurs de gradient



$$\%GF = \frac{T_{N_2} - P_{amb}}{M - P_{amb}}$$

- GF 15/80 \approx VPM-B +2
- Logiciel déco : MV plan

Application des GF

- Plongée 60m, 15min à l'air

	MN90	100/100	50/100	50/50
3m	19	17	16	134
6m	4	3	3	9
9m	1	1	2	6
12m			1	3
15m			1	3
18m			1	1
Durée	44	40	42	174

Le Dr M.Spencer (1971)

- Détecte des bulles circulantes par doppler : les embolies de gaz veineuses (veinous gas emboli VGE) alors que les plongeurs ne présentent aucun symptôme
- Corrélation +++ entre VGE et bends
- Déco humide ≠ déco sèche → validation
- Modèle d'échanges gazeux type Haldanien
- Un protocole de remontée sans déco, (inspiré des résultats d'Hemplemann) est validé entre 6 et 60m : objectif 20% de VGE maxi et 5% des plongeurs ayant des douleurs articulaires semblent un compromis raisonnable :

$$\text{prof} \cdot \sqrt{t} \leq 465 \text{ ft} \cdot \text{min}^{1/2}$$

Hills : noyaux gazeux et bulles (1966)

- Les travaux de l'australien Hills en 1966 qui s'intéressa à la thermodynamique des bulles, et sa publication en 1971, mettent en évidence le fait qu'une simple modification du profil de remontée, peut induire une modification des symptômes d'ADD.
- En effet, il démontre qu'en ralentissant la décompression, il pouvait induire chez un cobaye animal un accident de type articulaire ou neurologique et ainsi classifié les ADD en 2 catégories :
 - Le type 1 (douleurs articulaires et bends) liés directement à la charge en azote reçue lors de la plongée donc reliés aux modèles déterministes type haldaniens.
 - Le type 2 (neurologiques) reliés à des mauvais profils de plongée et à un excès de production de bulles artérielles lors de la décompression
- S'il n'a pas engendré de tables de décompression, ce modèle a mis l'accent sur la notion de noyaux gazeux par opposition aux bulles ... Et sur le rôle de ces noyaux dans la production de bulles circulantes asymptomatiques ou pathogènes.
- Des études sur les conditions d'équilibre des bulles intra vasculaires furent menées par Clement en France puis par Yount à partir des années 80 et conduisirent au modèle VPM

Volume critique de bulle (1977)

- Dans la continuité des travaux de l'australien Hills en 1966 qui s'intéressa à la thermodynamique des bulles, Valery Hemplemann + Tom Hennessy étudient eux :
 - La compression à saturation
 - La décompression jusqu'à l'apparition de bends
 - La relation linéaire entre les 2 profondeurs → Mariotte ?!
 - Si la taille des bulles est responsable des bends
- Ils calculent la croissance des bulles et mesure leur circulation dans l'organisme en tenant compte de :
 - La pression
 - La diffusion
 - La tension de surface autour de la bulle
 - L'élasticité des tissus
 - De la perfusion
 - La tension de gaz dans le liquide
 - La loi de Mariotte
 - L'équation des gaz parfaits
 - Echanges bulle-tissu

→ le critère de remontée prise en compte est du type Workmann (M-values)

L'objectif : calculer une taille critique pour le volume des bulles

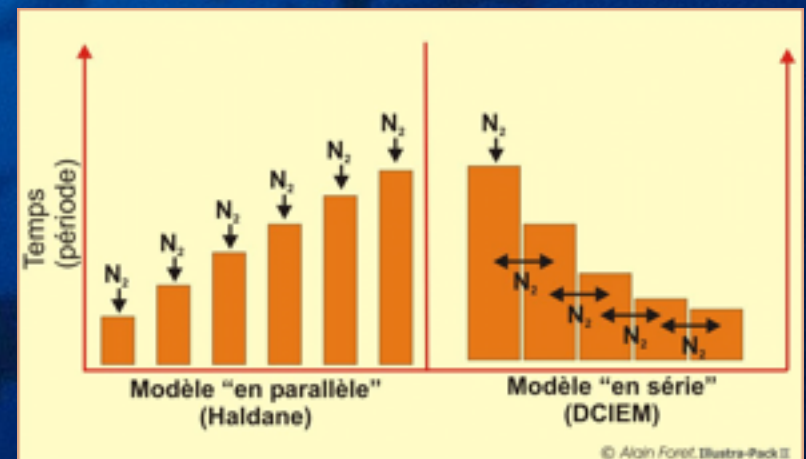
Les limites : On ne connaît pas la sensibilité individuelle à supporter ces embolies

On ne sait quantifier le nombre initial de bulles ni leur volume initial (ces données seront donc prises de manière empirique)

- Pas d'application de ce modèle seul, mais associé aux modèles haldaniens :
 - MT92 (JP. Imbert) issues d'une base statistique de la COMEX

Le modèle canadien DCIEM (Nishi 1979)

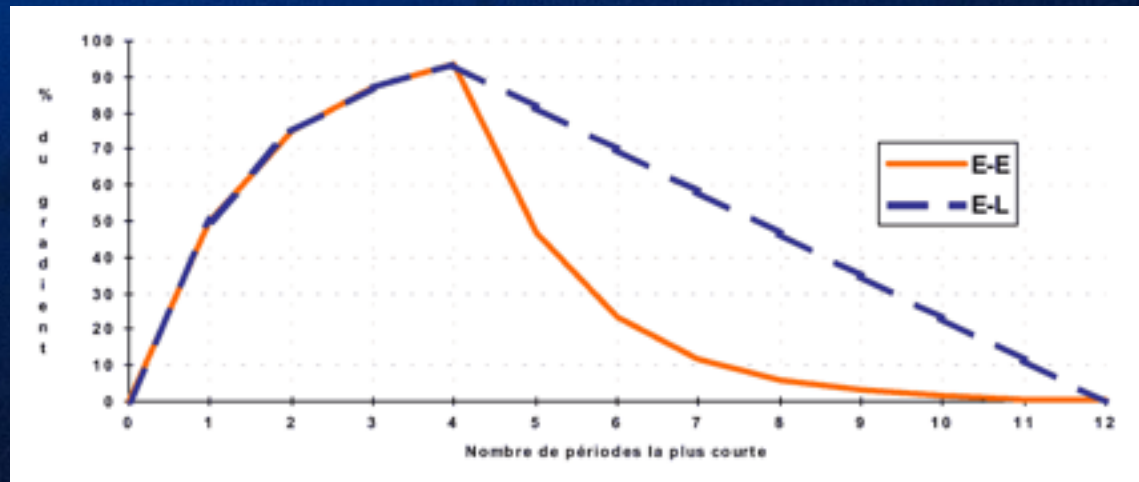
- Kidd & Stubbs (Canada 1962-1967) durcissent la table US Navy augmentation du conservatisme
 - Hypothèse des compartiments en série
 - 5000 plongées expérimentales de validation



- Nishi réévalue le modèle de K&S sous surveillance doppler
- Actuellement ce modèle est plus conservateur que les tables US navy; celles de la Royal Navy et les tables Buhlmann
- La courbe de sécurité (NDL) du DCIEM est proche des MN90

Thalmann (1985)

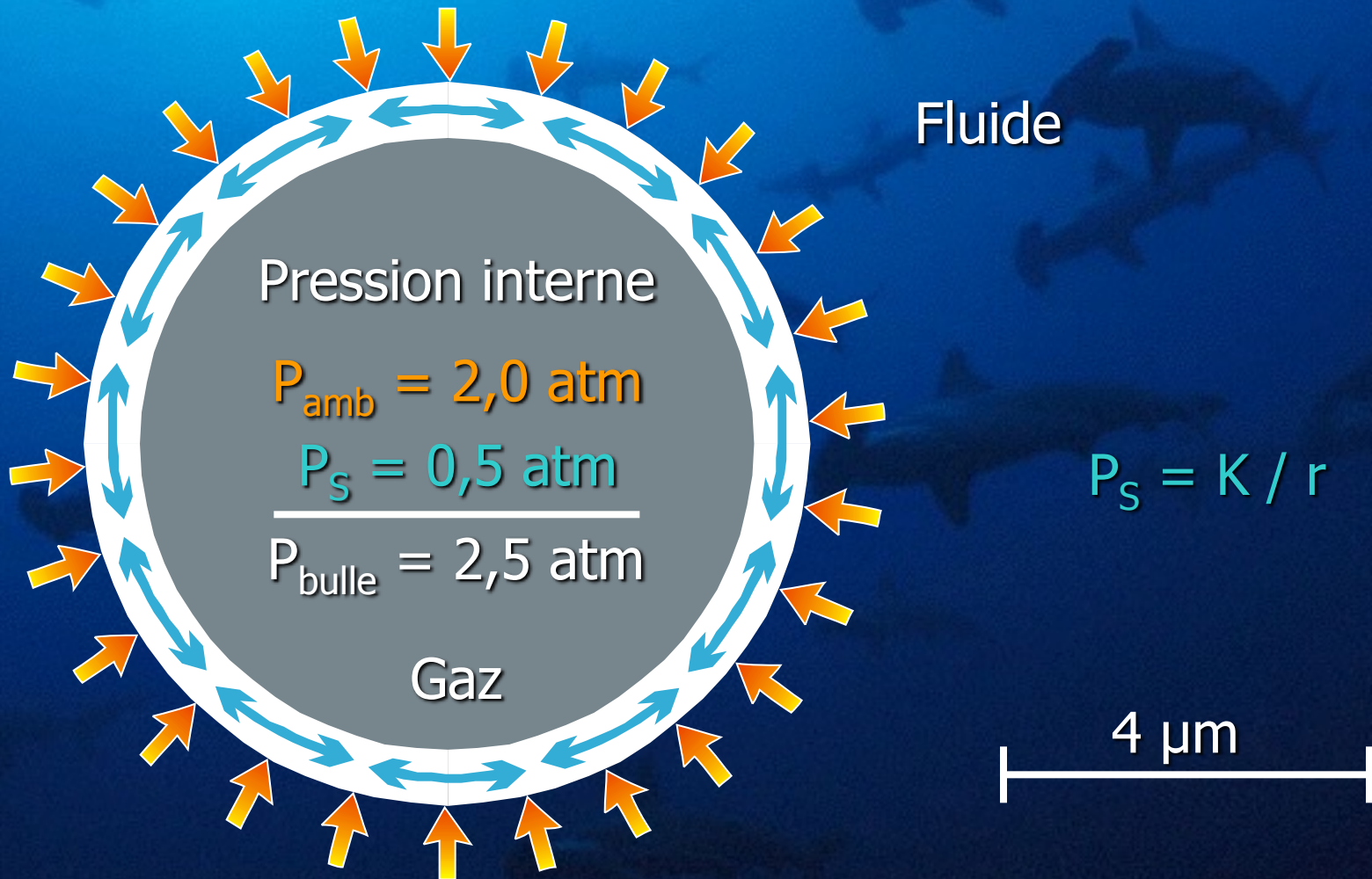
- Projet de tester à nouveau les tables US Navy pour les incorporer dans un ordinateur
- En 1984 : Test sur 850 plongées humides, (exercice modéré) dans le but de calculer en temps réel, les profils de déco à l'air.
- On observera dans la tranche 15-57m de tripler le tps total de déco pour les plongées longues et peu profondes et de doubler ce tps pour les plongées plus profondes mais plus courtes.
- Thalmann et le NEDU (Navy Experimental Dive Unit) proposent un modèle incorporable dans un ordinateur de plongée le modèle E-L Algorithm qui est proche du modèle de Haldane.
- L'absorption est exponentielle mais l'élimination est linéaire donc bcp plus lente





VPM = Varying Permeability Model (David Yount 1986)

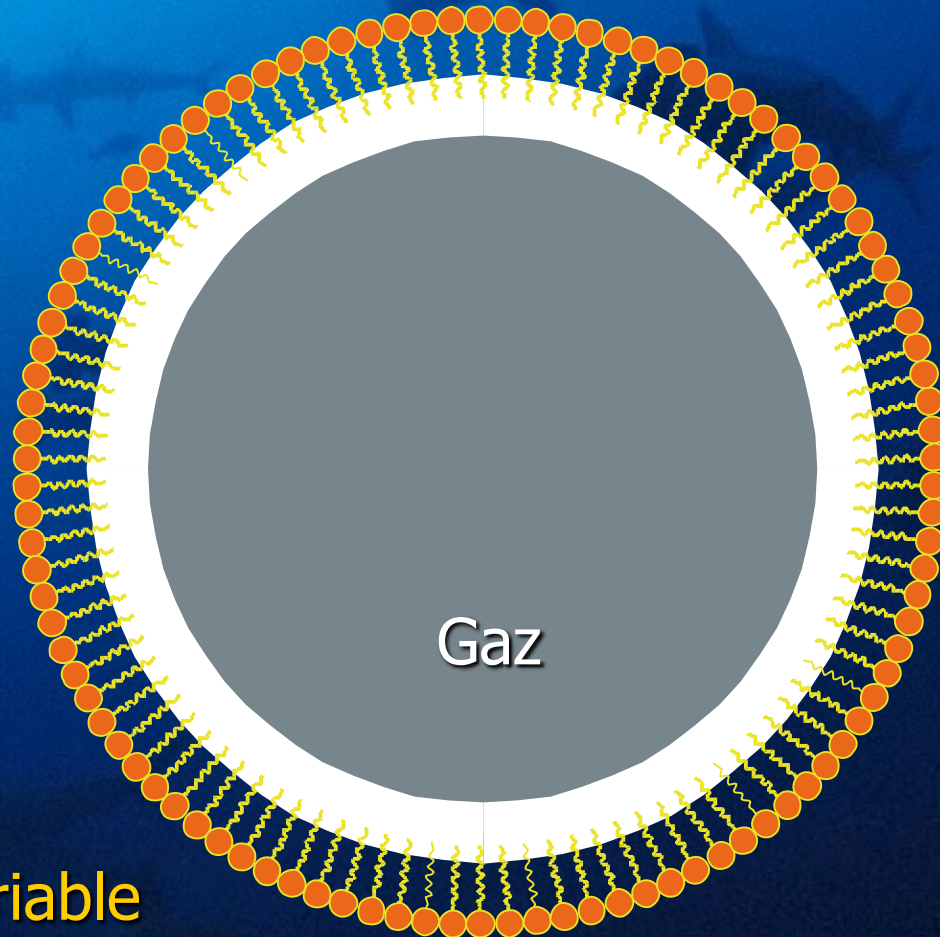
- Le VPM présume qu'il existe dans l'eau et dans les tissus, des vides microscopiques, des cavités et des noyaux qui contiennent du gaz avant même que nous commençons la plongée.
- les noyaux qui dépassent une taille « critique » spécifique (fonction de la profondeur maxi atteinte en plongée) vont grossir lors de la déco (loi de Mariotte). Ils servent d'amorce aux micro bulles. Le VPM vise à minimiser le volume total de ces bulles
- Préexistence de bulles dans les compartiments :
 - échanges gaz gazeux ↔ gaz dissout
- Prise en compte d'autres gaz dissous notamment le CO₂
- Modélisation du comportement des μ-bulles (tension superficielle, effet du surfactant, forces électrostatiques)

Effet de la tension de surface (tension superficielle)



Tensio-actifs

Hydrophile []
Hydrophobe []



→ Perméabilité variable

Que dit VPM ?

- La taille des « grosses » bulles tend à \searrow par diffusion car $P_{\text{bulle}} > P_{\text{amb}}$
- La diffusion bulle-tissu n'est pas constante (perméabilité variable) : elle augmente avec la taille (écartement des molécules tensio-actives)
- L'aptitude des bulles à grossir ou à se contracter dépend de leur taille et de la sursaturation = équation de non croissance des bulles

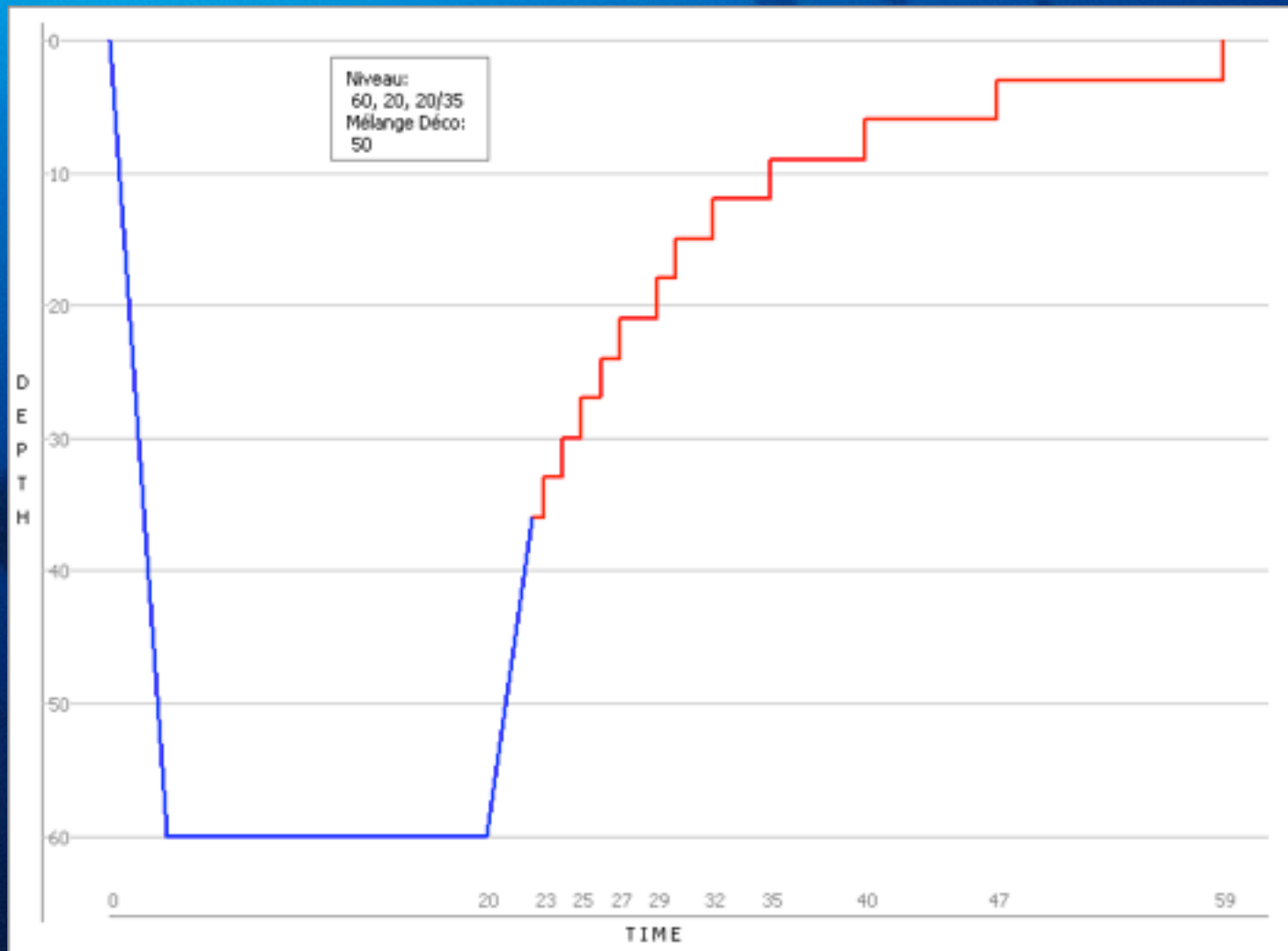
Évolutions de VPM

- Cette équation de non croissance des bulles, produit des décompressions très conservatives (donc longues et sécurisantes) pour les plongées peu saturantes et
- L'algorithme du volume critique (CVA) autorise la croissance des bulles jusqu'à un certain volume critique (travaux d'Hemplemann et Hennessy)
- Le modèle VPM-B : prend en compte la croissance des bulles par la loi de Mariotte à la remontée (Travaux d'Erik.C.Baker)

VPM en pratique

- Adapté à la plongée profonde et multi-gaz
 - Paliers + profonds
 - Paliers + courts près de la surface
 - Vitesse de remontée + lente permettant un filtrage des bulles avant leur croissance pathogène
 - Elimination ++ de l'Helium
- Pour des plongées de durée courte, la déco est plus longue qu'avec les autres modèles ... Mais le phénomène s'inverse dès que la durée des plongées devient significatif
- Importance de la vitesse de descente et de la profondeur maxi atteinte... En effet, le profil de descente affecte la valeur du gradient critique et plus la différence entre la tension des gaz dissous et la pression ambiante est importante, plus la réduction des noyaux gazeux sera importante : loi de Mariotte et diffusion de la bulle vers les tissus. D'où un rétrécissement du diamètre de la bulle, favorable au plongeur.
- Applications :
 - Ordinateurs plongée : RGBM (1991), V-Planner live
 - Logiciels de déco : V-Planner, HLPlanner,...

Profil de déco VPM



RGBM = reduced Gradient Bubble Model

(Dr Bruce Wienke 1991)

- Modèle commercial ++ → peu d'informations précises disponible et pas de publication scientifique.
- Ce modèle est la réponse aux plongeurs tech qui désiraient avoir des profils de plongée pouvant intégrer des variations de mélanges; des grandes profondeurs; des paliers profonds et de l'inhalation d'O₂ pure basée sur la fenêtre oxygène.
- Prise en compte de chaque gaz séparément dans le calcul de la désaturation par intégration des M-Values et leurs Sc.
- C'est une adaptation du modèle VPM.
- RGBM vs VPM :
 - Pas basé sur les propriétés de la gélatine (travaux de David Yount)
 - Persistance des noyaux gazeux calculée
 - Taux d'accident plus faible que VPM
 - Prise en compte de l'agrégation de bulles
- En 2002, le Dr Wienke collabore avec Mares à la mise au point du RGBM Mares-Wienke qui prend en compte toutes les dernières études dans le domaine de la déco. C'est le 1er algorithme à intégrer des paliers profonds permettant d'éliminer une partie des micro bulles à la remontée.

Le modèle sigmoïdal (Wald 1971)

- Etablit en 1971 par Wald pour rendre compte des transferts gazeux au travers des membrane de diffusion. Son idée était de découper le modèle en 1 quantité infinie de compartiments en série se déchargeant les uns dans les autres.
- En 1992, P.Giry et J.L.Meliet après études de gaz diluants (He et N2) sur des lapins à 4 ATA, observent

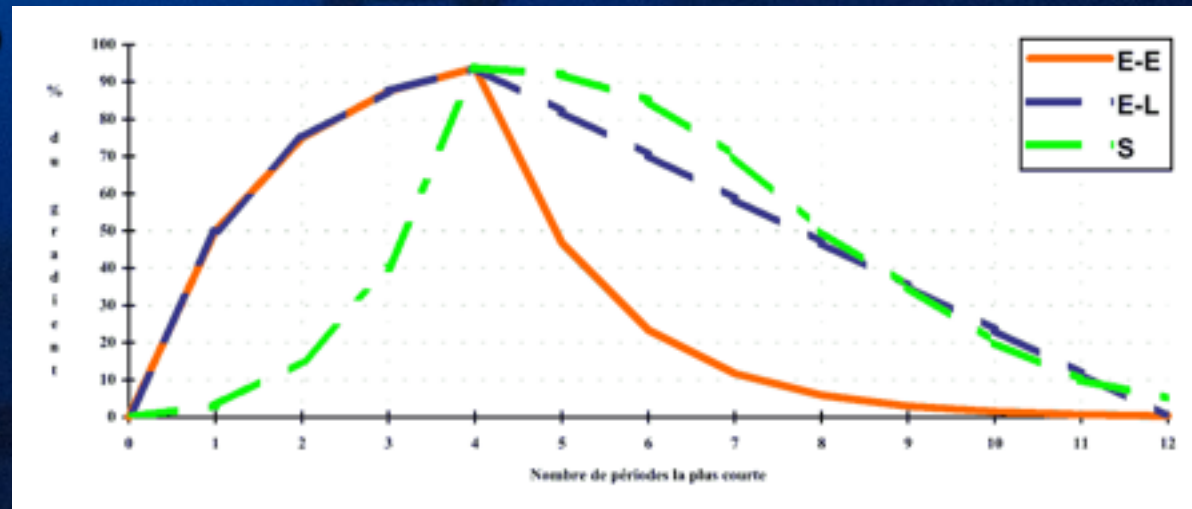
1/ Que la décharge en gaz démarre avec un tas de latence après diminution de la P.Ambiante

2/ Une stabilité des micro-bulles

3/ Une Réinjection de micro-bulles dans le versant artériel

→ Impact sur la majoration (successives)

→ La déco est plus courte pour les plongées courtes mais plus longues pour les plongées longues et les successives



Approche probabiliste (Années 80)

- Dans les années 80, toutes les analyses des bases de données (US Navy/GERS ...) montrent que les tables reflètent d'assez loin la réalité. Et que donc, le modèle mathématique n'a que peu d'importance. Ce qui compte c'est l'étude statistique du risque.
- L'ADD devient un événement aléatoire inéluctable dont on quantifie la probabilité et l'acceptabilité
- C'est une révolution dans l'approche de la décompression
- Tous les modèles connus sont qualifiés de déterministes : ils reposent sur des paramètres figés .
- Un modèle probabiliste, lui, va proposer l'évaluation du nombre de risques d'apparition d'un ADD. On admet que la table de déco parfaite n'existe pas.
- On prend donc des valeurs de S_c (ou autres critères) qui ne sont pas validées dans 100% des cas
- Analyse statistique des profils et des accidents (bases de données)
- L'ADD est un événement aléatoire dont on quantifie la probabilité et l'acceptabilité

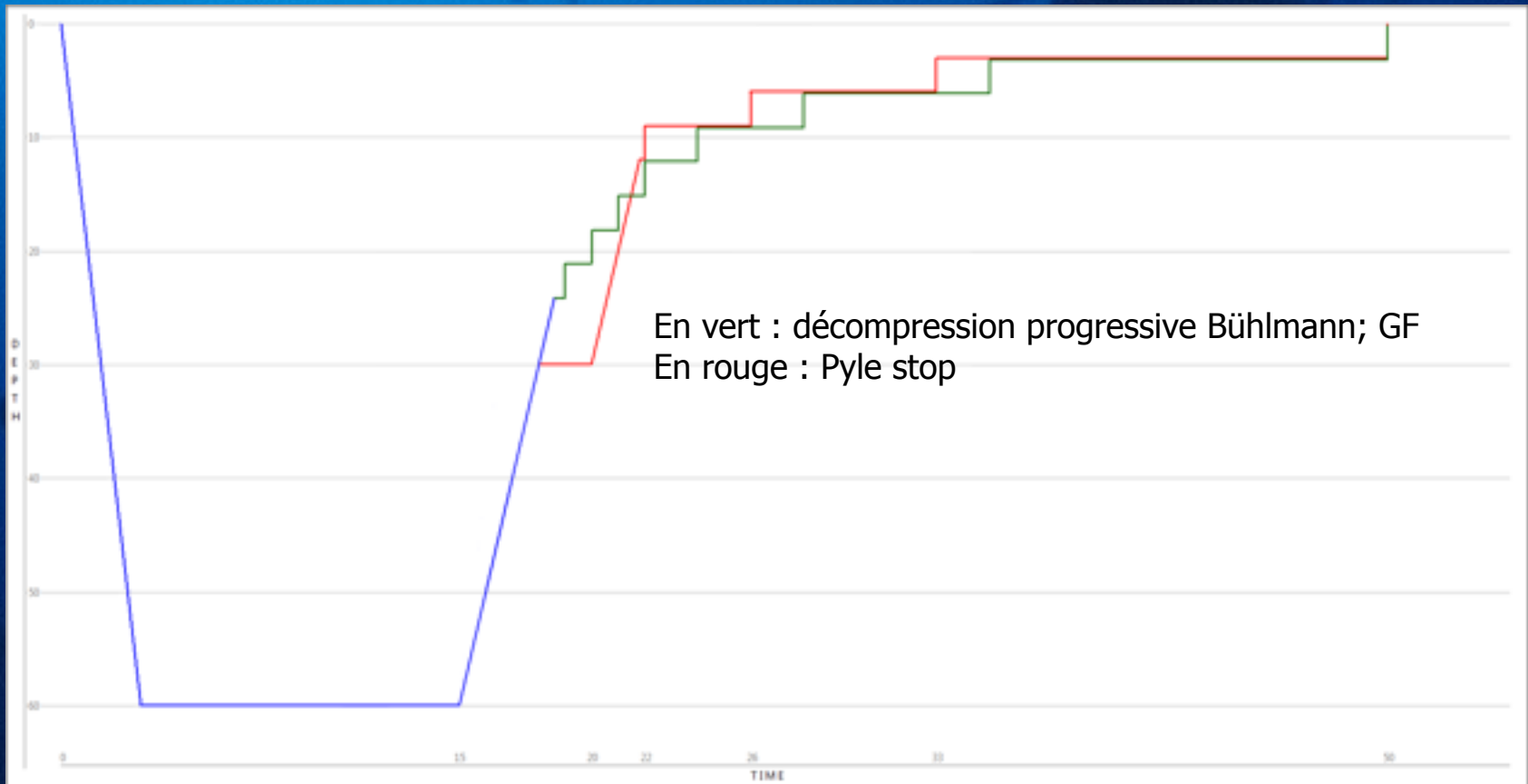
Validation statistique d'un modèle

- Banque de données (BDD) de référence (profils)
- Analyse statistique sur la BDD de référence
- Extrapolation probabiliste avec un intervalle de confiance (indépendant de la BDD de réf.) :
« Pour une plongée sans palier de 20 min à 40 m (courbe de sécurité des GERS 65), il y a 95% de chances que le risque d'accident soit compris entre 1,57% et 6,43% »
- Compromis risque accepté / durée déco

Les paliers profonds (Pyle stops)

- Richard Pyle et la physiologie des poissons...
- 2 min à mi-distance entre le fond et le 1^{er} palier « classique » : diminution de moitié de la quantité de bulles circulantes silencieuses (c'est très aléatoire attention)
- Implémentation sur certains ordinateurs
- Cependant les logiciels à paliers profonds « vrais » sont le VPM ou les GF

Les paliers profonds



Synthèse

- Les modèles par perfusion :
 - Le modèle de Haldane
 - Le modèle de Buhlmann
 - Le modèle de Workman (M-Values)
 - Le modèle de Thalmann
- Le modèle par diffusion :
 - Le modèle de Hemplemann
- Les modèles à micro bulles
 - Le VPM
 - Le RGBM (Wienke)
- Les modèles mixtes par perfusion et diffusion
 - Le modèle de Spencer
 - Le DCIEM de Nishi
 - Le modèle de Hennessy et Hemplemann
- Les autres approches et modèles :
 - Le modèle sigmoïdal de Wald
 - les modèles probabilistes
- Les critères de sécurité :
 - Théories classiques : gestion de la quantité de gaz neutre
 - Nouvelles théories : gestion de la quantité de gaz neutre et la gestion des bulles

Entre la théorie; les statistiques et les calculs : il y a les hommes, leur physiologie variable, la réflexion et surtout le bon sens.

Comparaison NDL (min)

Prof (m)	Hempl.	Spencer	DCIEM	RGBM	MN90	VPM
15	100	86	80	71	76	76
18	69	60	52	51	53	46
21	51	44	35	37	39	32
24	39	34	25	29	27	25
27	31	27	19	22	19	20
30	25	22	14	17	14	16
33	21	18	11	13	11	14
36	17	15	9	10	9	12
45	7	6	6	5	5	8

Logiciels de déco

- HL Planner (VPM) : <http://www.hlplanner.com/>
- V-Planner (VPM) : <http://www.hhssoftware.com/v-planner/>
- MultiDeco (VPM / Bühlmann GF) : <http://www.hhssoftware.com/multideco/>
- MV-plan (Bühlmann GF) : <http://www.users.on.net/~wittig/diving/mvplan.html>
- Decoplanner (VPM / Bühlmann GF) : <http://www.globalunderwaterexplorers.org/products/software/decoplanner>
- PastoDeco (VPM / Bühlmann GF) : <http://pastodeco.antonipastorelli.com/>
- GAP (Bühlmann GF) : <http://www.gap-software.com/>
- Voir MFT chapitre plongée trimix page 12





Les ordinateurs : l'ère moderne

- A partir des années 90 de + en + de plongeurs sont équipés d'ordinateurs (débutants inclus)
- Les options se diversifient :
 - Planification + complète
 - Prise en compte de la consommation d'air
 - Possibilité de plonger au nitrox puis avec plusieurs gaz/mélanges
 - Systèmes de « durcissement » qui reflètent la condition physique du plongeur
 - Prise en compte du rythme cardiaque
 - miniaturisation (ordinateurs montres)
 - Intégration des boussoles électroniques
 - Modernisation des outils de décompression/désaturation vers 3 axes principaux
 - 1/l'aspect maintenance : rechargeable; changement de pile...
 - 2/l'aspect mise à jour : option trimix; nouvel algorithme ...
 - 3/l'aspect gestion de la palanquée : nombre d'émetteurs admissible
 - Et bien d'autres options possibles

Les ordinateurs disponibles aujourd'hui sur le marché et leur logiciel de déco

- Voir copie feuille SVP
- Conseil avisé : se tenir informé chaque année des nouveaux venus et de leurs spécificités

Les ordinateurs dans le temps

<p>Les précurseurs (1955 & 1958)</p>	<p>Des instruments mécaniques à l'affichage analogique</p>	<p>Foxboro Decomputer Mark I décompressimètre Sos</p>	 <p>Sos</p>
<p>Les suiveurs (années 1970)</p>	<p>Idem</p>	<p>Decompression Meter de General Electric Decomputer Farallon</p>	
<p>Le progrès (1963)</p>	<p>Mesures électriques avec affichage analogique</p>	<p>Tracor</p>	
<p>L'innovation (année 1976)</p>	<p>Utilisation d'un microprocesseur avec affichage LED puis LCD</p>	<p>XDC Edge Cyberdiver II et III Decobrain</p>	 <p>Decobrain</p>
<p>Les révolutions (1986)</p>	<p>Mesures et calculs grâce à un microprocesseur avec affichage LCD en présentation compacte</p>	<p>Suunto SME-ML Aladin</p>	 <p>SME-ML</p>  <p>Aladin</p>

Les principaux ordinateurs sur le marché



Aladin Nitrox Pro

Ordinateur d'une conception ancienne, qui ne gère qu'un gaz il a été « relooké » et permet de gérer un NITROX comprenant entre 21 et 50% d'oxygène. Il peut être muni d'un transmetteur qui mesure la pression dans la bouteille et le débit ventilatoire. Modèle de décompression : Bühlmann ZHL8-ADT.

Prix : entre 600 et 900 euros suivant la configuration

<http://www.uwatec.com/french/SPEC-ER.htm>



Suunto Vytec

Cet ordinateur permet de gérer trois NITROX qui contiennent entre 21 et 99% d'oxygène. Il peut aussi être muni d'un transmetteur.

Prix : entre 550 et 950 euros suivant la configuration

<http://www.suunto.com/>



Suunto Vyper

Cet ordinateur permet de gérer un NITROX qui contient entre 21 et 50% d'oxygène. Il peut aussi être muni d'un transmetteur. Ordinateur basique qui convient bien au débutants

Prix : de l'ordre de 350 euros

<http://www.suunto.com/>



Mares M1 RGBM

Cet ordinateur permet de gérer un NITROX qui contient entre 21 et 50% d'oxygène. Il utilise l'algorithme RGBM qui permet de gérer en option des paliers profonds.

Prix : de l'ordre de 300 euros

<http://www.mares.com/>



Océanic Versa Pro

Cet ordinateur permet de gérer un NITROX qui contient entre 21 et 50% d'oxygène. Le design de l'écran est particulièrement convivial.

<http://www.oceanicworldwide.com>



VR2 & VR3

Ce sont deux ordinateurs multi-gaz en circuit ouvert ou recycleur (CCR – SCR) le VR2 (4 gaz) est axé sur le Nitrox tandis que le VR3 (10 gaz) intègre le NITROX, TRIMIX, HELIOS, HELIAIR.

Prix : VR2 de 750-800 euros VR3 : de l'ordre de 1200 euros

<http://www.vr3.co.uk/vr2.htm>

<http://www.vr3.co.uk/vr3.htm>



Buddy Nexus

Cet ordinateur est un peu particulier puisque cet appareil a été conçu au départ pour être utilisé avec les recycleurs en circuit fermé (CCR) mais il peut être utilisé en mode circuit ouvert. Il est prévu pour être utilisé avec deux gaz.

Prix : de l'ordre de 500 euros

<http://www.apvalves.com/Nexus.html>

Références documentaires

Bibliographie :

- La plongée sous-marine à l'air – Ph. Foster – PUG (1993)
- Dossiers de CTN Info – FFESSM (1994 et 1995)
- Modèles de décompression : une présentation des concepts – JL. Blanchard – Actualités Sport et Médecine n°50 (mai 1996)
- Éléments de calcul de tables – M. Goret (avril 2000)
- Les dessous de la décompression – JM. Belin (juin 2002)
- Contenu des connaissances en physique dans le cursus fédéral – L. Savariello (octobre 2003)
- Physiologie et médecine de la plongée – B. Broussolle – Ellipse (2006)
- Code Vagnon N4 – E. Bernier, N. Seksik – Vagnon (2014)
- Mémoire d'IN : La désaturation pratiques et enseignements - Sophie Le Maout (2015)
- Mémoire d'IR : réflexions sur l'évolution de la VDR - Thierry Falzone (2005)

Web :

- <http://perso.orange.fr/aresub/>
- http://citizen.jp/cyber/qa/eng/ans/dciem_e.htm
- <ftp://ftp.decompression.org/>



Avez vous des questions ?

Thierry FALZONE dit TOTO !

0613506678

thierry.falzone@orange.fr

Thèmes d'examen MF2

- Utilisation des tables, planification
- Plongée en altitude (montée brusque ou lente de la mer vers un lac)
- Utilisation de l'oxygène (altitude)
- Plongée aux mélanges (altitude)
- Manipulation du modèle de Haldane (mélanges, altitude)
- Limites du modèle de Haldane
- Connaissance des autres modèles

Niolon : septembre 2016

1) L'un de vos stagiaires pédagogiques vous interpelle au sujet des « trois minutes de principe/sécurité » affichées par la plupart des ordinateurs actuels.

a) Expliquez, en quelques lignes, sur quel principe est basé ce « palier de sécurité » ? (1 pt) b) Exposez quels en sont les avantages, mais aussi les possibles inconvénients. (3 pts)

2) Ce même stagiaire, décidément curieux, vous demande de lui expliquer :

a. Comment sont calculées les majorations des plongées successives ? En utilisant vos connaissances en

éléments de calcul de tables, vous prenez deux exemples :

– Calcul de la tension d'azote après 2h, 4h, 6h quand GPS = I (2 pts)

– Calcul de la majoration à 12m quand la tension d'azote = 1.28 bar (2 pts)

b. Pourquoi la règle des plongées successives ne peut-elle s'appliquer qu'à partir de 15mn d'intervalle à la surface ? (1 pt)

(Tables fédérales MN90 fournies)

Hendaye : Juillet 2016

QUESTION 2 – Différents modèles de désaturation (9 points)

a) Afin d'expliquer les modèles de désaturation les plus courants, vous expliquerez pour les modèles Haldanien (1908), Bühlmann 1980, VPM (1986), RGBM (1991) (6 points) :

1. Le nombre de compartiments
2. Le principe (loi) de charge/décharge du modèle
3. Les critères de détection de l'ADD

b) Citer un à plusieurs exemples d'ordinateurs vendus dans le commerce correspondant aux (ou inspirés des) modèles précédents (1 point)

c) Comment certains ordinateurs tentent de prendre en compte des paramètres physiologiques dans leur calcul de désaturation? (1 point)

d) Sur un stage préparation au GP de 12 jours que vous organisez, quels moyens de désaturation proposez-vous à vos encadrants ? (1 point)

Niolon : Mai 2016

QUESTION 2 : modélisation de l'organisme (4 points)

Compte tenu de l'extrême complexité de l'organisme, le calcul de la désaturation impose qu'on utilise une modélisation mathématique.

- a) Justifiez cette affirmation (1 pt)
- b) Définissez la notion de compartiment et donnez les paramètres qui le caractérisent (2 pts)
- c) Quelles différences faites-vous entre un compartiment et un tissu biologique (1 pt)

QUESTION 3 : procédures de désaturation (6 points)

- a) Comment justifiez-vous auprès de votre stagiaire pédagogique l'utilité de l'enseignement des tables fédérales dans un cursus de formation de plongeurs FFESSM alors que la plus part d'entres eux n'utilisent plus qu'un ordinateur ? (2 pts)
- b) Quels sont les principaux paramètres pris en charge par les ordinateurs « nouvelle génération » ? (2 pts)
- c) Quel est l'impact de la prise en compte de ces paramètres sur les procédures de désaturation? (2 pts)

Niolon : septembre 2015

Utilisation des procédures de décompression (6 pts)

Question 4 (2 pts)

Vous et votre binôme, plongez avec deux ordinateurs RGBM. En vacances en Egypte vous avez fait hier 3 plongées : matin (30m, 45' dont 3' de palier de sécurité), après-midi (après un intervalle de 3h, 18m, 45' sans palier) et nuit (après un intervalle de 4h, 12m, 30' sans palier, sortie de l'eau 21h). Ce matin, votre ordinateur ne démarre pas... la plongée prévue à 10h00 est une plongée carrée sur une épave à 38m, qu'il ne faut surtout pas rater. Quelle plongée faites vous et quel moyen de décompression utilisez-vous ? Quelles recommandations pour le restant de votre séjour ?

Trébeurden : aout 2015

Question N°2 (11 pts) : Afin de mieux préparer leurs cours sur la décompression, vos stagiaires vous posent des questions auxquelles vous répondez le plus clairement possible :

- a) Y a-t-il une durée maximum pour une plongée Nitrox dans le mode d'emploi des tables de plongée FFESSM ? Si oui, quelle est cette durée.
- b) Lors des plongées successives, plus la deuxième plongée est profonde, moins la majoration est importante. Pourquoi ?
- c) Définir ce qu'est une M-Value.
- d) Que signifie « NO DEC TIME » sur un ordinateur de plongée ?
- e) A quelle profondeur peut-on s'immerger en mer pendant une durée illimitée en respirant de l'air sans faire de palier (on considère que l'air est composé de 80% de N₂ et de 20% d'O₂ et que $SC_{120'} = 1,54$) ?
- f) Quelles étaient les principales hypothèses du modèle de Haldane ?
- g) En cas de plongée profonde (60 m), quels éléments prenez-vous en compte pour déclencher la remontée ?
- h) Quels sont les quatre effets mécaniques produits par les bulles non pathogènes et pathogènes lors de la désaturation ?

Niolon : Mai 2015

Décompression

Question 2. Les modèles de désaturation (7 pts)

- a) Définissez la notion de seuil de sursaturation critique (Sc) dans les tables fédérales b) Donnez une définition des M-Values. En quoi diffèrent-elles des Sc de Haldane ?
- c) Décrivez brièvement le modèle RGBM utilisé par certains ordinateurs.
- d) Quelles améliorations Bühlmann a-t-il apportées aux modèles de type Haldanien ?

Question 3 L'utilisation des ordinateurs de plongée (6 pts)

A) Vous partez pour une croisière en Egypte d'une durée de 15 jours. Des plongeurs de chez PADI effectuent 4 plongées par jour. Vous interpellez leur dive master à ce sujet. Il vous répond que cela ne pose aucun problème, car les plongées sont toutes effectuées dans la courbe de sécurité, tous les clients sont équipés d'ordinateurs et ceux-ci n'affichent jamais de palier.

- a) Qu'en pensez vous ? Argumentez votre réponse en vous appuyant sur vos connaissances en matières de décompression
- b) Alain et Hervé, clients PADI, ont entendu votre conversation, et sont un peu inquiets quant aux risques de survenue d'un accident de désaturation. Quels conseils leur donnez-vous concernant leur planning de plongée ?

B) Vous êtes délégué par votre CTR pour participer à un examen de guide de palanquée. Tous les candidats et encadrants sont équipés d'ordinateurs de plongée. Lors de la réunion préparatoire du jury, les organisateurs proposent de mettre en place un pendeur pour permettre aux palanquées ayant dépassé la vitesse de remontée maximale d'effectuer un palier de 5 minutes à mi-profondeur.

Qu'en pensez-vous ? Argumentez votre réponse en vous appuyant sur vos connaissances en matière de décompression

C) Lors de la présentation des épreuves du MF2, le directeur de votre stage a demandé aux candidats équipés d'ordinateurs permettant d'effectuer des paliers profonds de désactiver cette fonction. Expliquez- en les raisons en vous appuyant sur vos connaissances en matière de décompression

Tahiti : novembre 2014

Décompression

Modèle de désaturation, éléments de calculs et définition (10pts)

De nombreuses procédures de désaturation sont basées sur le modèle de Haldane. En conséquence, dans ses cours théoriques, un moniteur est quasiment contraint d'exposer les principes de ce modèle afin que les plongeurs puissent comprendre et appréhender les limites de ce modèle.

Quels conseils donneriez-vous à un stagiaire pédagogique pour aborder ce thème sur les points suivants :

Eviter la confusion fréquemment faite entre un tissu et un compartiment. (2 pts)

Définissez précisément ces deux termes.

Précisez l'importance de l'utilisation du vocabulaire adéquat dans un cours de plongée.

La majoration. (2 pts)

Définissez cette notion.

Justifiez pour quelle raison utilise-t-on le compartiment C120 avec un Sc de 1.54 pour la calculer.

Profondeur supérieure ou inférieure pour déterminer la majoration. (2 pts)

Monitorat Fédéral 2ème degré

Les militaires utilisent la table MN90 comme moyen de décompression mais leur protocole prévoit que lorsque la profondeur de la seconde plongée n'est pas indiquée, ils doivent prendre la profondeur immédiatement inférieure contrairement au protocole fédéral.

- A partir de vos connaissances, justifiez le choix fédéral en prenant un exemple.

Calculs de la TN2 dans le compartiment 120 (4 pts)

- Calculez la valeur de TN2

Première plongée 2H00 à 40 m ; Intervalle surface de 2H00 ; Seconde plongée : 2h à 30 m.

- Représentez graphiquement son évolution pour deux plongées successives, au niveau de la mer et à l'air.

- Représentez sur ce schéma la majoration en azote.

La réunion : octobre 2014

2. Harmonisation de procédures de décompression (2 pts)

Vous êtes directeur de plongée, vous constituez une palanquée avec deux plongeurs niveaux 3 qui utilisent un moyen de décompression différent. L'un utilise la table fédérale et l'autre un ordinateur (RGBM – vitesse de remontée : 10 m/m - palier profond activé).

- Quelle (s) consigne (s) donnez-vous sur la procédure de décompression à adopter ?

La réunion : octobre 2014

1. Connaissances des procédures de décompression (8 pts)

Complétez ce tableau en comparant les paramètres indiqués pour les tables fédérales et les ordinateurs

Monitorat Fédéral 2ème degré La Réunion – Oct 2014

Tables fédérales

Paramètres

Ordinateurs « en général »

Courbe de plongées sans palier
Début de plongée

Durée de plongée

Vitesse de remontée

Durée de la remontée

Paliers

Fin de plongée

Intervalle surface

Température de l'eau
Fatigue/Stress/Effort

Palier profond

Plongée en altitude

Plongée aux mélanges

Remontée rapide

Paliers à l'O2

Inhalation d'oxygène en surface

Niolon : septembre 2014

3. Remontée rapide et redescente à mi profondeur. (6 points)
 - a) Pourquoi la procédure de la Table MN90 impose-t-elle de redescendre à mi-profondeur pendant 5 mn moins de trois minutes après une remontée rapide ? (4 points)
 - b) Quelles sont les limites de cette procédure. (2 points)

Hendaye : juillet 2014

QUESTION 3 : Microbulles et ordinateurs (7 points)

Différents concepts modélisent le corps humain en compartiments afin de définir des procédures de décompression.

- a) Définissez ce qu'est un « compartiment »
- b) Comment les microbulles se forment-elles ?
- c) Décrivez les principaux modèles de décompression et leurs hypothèses.

Niolon : mai 2014

Question 2 (6 pts)

Vos élèves ont des difficultés à effectuer un cours sur la saturation / désaturation.

- Mettez en place les définitions nécessaires pour comprendre les concepts de saturation et de désaturation. (2pts)
- En vous basant sur une plongée de 30 minutes à 40 m de profondeur, faites leur la démonstration jusqu'à l'explication du calcul du premier palier et du compartiment directeur.
(On donne : $SC_{10'} = 2,38$; $SC_{30'} = 1,82$ et on considère que l'air est composé de 20% d'O₂ et de 80% de N₂) (3 pts)
- Après la plongée quelle sera la tension d'azote dans ces 2 compartiments au bout de deux heures passées en surface ? (1 pt)

Question 3 (1 pt)

Dans le cadre des tables fédérales lors des plongées successives, quel est le compartiment considéré comme directeur

Question 4 (4 pts)

Connaissez-vous d'autres modèles que celui décrit par Haldane ?

Si oui lesquels ?

Parmi ceux-ci, décrivez en deux succinctement en insistant sur le différentiel par rapport à celui de Haldane

Martinique : octobre 2013

- 1° (8 pts)) Lorsque la pression ambiante augmente, les tissus de notre organisme se chargent en azote.
- . a) Quels sont les deux principes physiques permettant d'expliquer comment se produit le transfert de l'azote dans l'organisme ?
 - . b) Reconstituez le trajet de l'azote depuis l'alvéole jusqu'à sa fixation dans les tissus.
 - . c) En vous appuyant sur vos connaissances en physiologie, expliquez pourquoi notre organisme ne réagit pas de façon homogène à la charge d'azote.
 - . d) En vous appuyant sur vos connaissances sur la théorie de Haldane, expliquez simplement comment la réponse de l'organisme a été mathématiquement modélisée (les formules mathématiques ne sont pas attendues)
 - . e) Comparez alors la réponse d'un tissu réel au cours d'une plongée avec celui d'un compartiment.
 - . f) Listez les variables susceptibles de placer le plongeur réel dans des conditions qui ne sont plus conformes à la modélisation.

Martinique : octobre 2013

2° (5 pts)) Les tables de Bühlmann et MN90 sont basées sur un modèle haldanien. Pourtant les deux modes de calcul de la tension dans les compartiments diffèrent quelque peu. Les MN90 calculent la tension dans un compartiment en utilisant la pression partielle d'azote dans l'air ambiant, alors que Bühlmann se réfère à la Pression partielle dans l'air alvéolaire.

Nous allons étudier la différence entre ces deux approches. Le tableau suivant vous donne la composition de l'air alvéolaire.

Composants de l'air alvéolaire	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O (vapeur)
Exprimés en pourcentages		5,3 %	75,4 %	
Pressions partielles En hectopascals. En mm de Hg		52,5 40	754,3 573	62 47

- a) On sait que les pressions partielles de CO₂ et de H₂O dans l'air alvéolaire ne dépendent pas de la pression absolue, que ce soit au niveau de la mer, en altitude ou en profondeur : Donnez les explications physiologiques de ces deux faits admis.
- b) Calculez la pression partielle d'azote dans l'air alvéolaire pendant une plongée en mer à la profondeur de 40m. Pour cela, on admettra que le rapport O₂/N₂ est constant quelque soit la profondeur.
- c) Calculez la tension d'azote dans un compartiment de période 10 min pour une immersion de 20 min en utilisant tout d'abord la méthode classique de la MN90 (Air : 20% O₂, 80% N₂), puis en utilisant la pression partielle dans l'air alvéolaire.
- d) Comparez les résultats obtenus par les deux méthodes. Ces approches différentes aboutissent-elles obligatoirement à des résultats différents en termes de processus de décompression ?

Martinique : octobre 2013

3° (7 pts) Aujourd'hui l'utilisation des calculateurs d'aide à la décompression (« ordinateurs ») est banalisée. Il devient donc indispensable d'apprendre à nos plongeurs quelles sont les situations que l'ordinateur ne gère pas avec une fiabilité suffisante, tant par défaut que par excès, bien que le plus souvent il continue d'afficher un résultat.

Proposez trois de ces situations et indiquez à chaque fois une méthode tenant compte des limites des possibilités de l'ordinateur.

Niolon : septembre 2013

Sujet 1 - Ordinateur de plongée et microbulles.

Certains ordinateurs de plongée récents, font apparaître comme étant une avancée technologique, la prise en compte, dans leur algorithme de décompression, de l'existence des microbulles dans l'organisme.

1/ Pour déterminer ce que signifie le terme microbulle dans le champ d'application de la décompression en plongée, expliquez comment celles-ci sont formées et comment elles interagissent dans les phénomènes de décompression des gaz. (2 points)

2/ Vous expliquerez comment les ordinateurs de plongée peuvent prendre en considération ce phénomène dans les procédures de calcul de décompression. (2 points)

Treburden : juillet 2013

Question 1 : Connaissances des procédures de décompression (6 pts)

Parmi les paramètres suivants, choisissez-en douze et pour chacun d'eux, effectuez la comparaison entre :

- les tables fédérales

- l'ordinateur de votre choix (indiquez en le modèle)

Courbe de sécurité - fin de plongée - début de plongée - durée de plongée - paliers -
durée des paliers - vitesse de remontée - remontée rapide - intervalle de plongée -
paliers à l'oxygène - intervalle de surface à l'oxygène - température de l'eau -
organisation de palanquée - fatigue/stress/effort

Question 2 : plongées « yoyos » et gestion de la décompression à l'ordinateur (2 pts)

Expliquez physiologiquement pourquoi on déconseille (ou on proscrit ?), les plongées « yoyo » lorsqu'on gère sa décompression à l'ordinateur ?

Niolon : mai 2013

QUESTION 2 A faire en 1 heure (12 points)

Lors de la 2^{ème} semaine d'un stage de niveaux 4, des plongées profondes sont organisées tous les matins malgré des conditions difficiles (houle, tramontane et eau à 14°C). Christine, 50 ans, très fatiguée par le rythme du stage, stresse suite au manque de visibilité à 40 mètres et à son mal de mer récurrent.

Jeudi matin, après une plongée à 40 mètres intensive avec beaucoup d'interprétations de situations problématiques à réaliser, elle a beaucoup de mal à remonter à l'échelle du bateau (sensation de jambes molles) et se plaint sur le pont d'une violente douleur lombaire.

- . a) Mettez en rapport les symptômes observés avec leur explication physiologique. (2 pts)
- . b) Quels sont tous les facteurs favorisants, avant, pendant et après la plongée ? (1 pt)
- . c) Quelle est la conduite à tenir immédiatement ? (1 pt)
- . d) Quels sont les effets de l'O₂ : normobare sur le bateau, puis hyperbare au caisson ? (2 pts)
- . e) Quelles sont les hypothèses physiopathologiques à l'origine de ce type d'accidents ? (3 pts)
- . f) Les premiers ordinateurs mis sur le marché étaient de simples calculateurs utilisant le modèle de Haldane. Les appareils de dernière génération ont intégré dans leur algorithme des nouveaux paramètres : Quels sont-ils, et quels sont leurs impacts sur les procédures de décompressions préconisées par ces ordinateurs de nouvelle génération.

Tahiti : octobre 2012

Question 2 : Comparatif des procédures de décompression (5 pts)

Pour les paramètres suivants, effectuez sous forme de tableau la comparaison entre tables fédérales et ordinateurs de plongée :

- courbe de sécurité, - début de plongée,
- fin de plongée,
- durée de plongée,

- vitesse de remontée, - durée des paliers,
- remontée rapide,
- intervalles de plongée, - paliers à l'oxygène,

- température de l'eau,
- fatigue, stress, efforts,
- organisation de la plongée (avec ordinateurs différents).

Listez les conseils d'utilisation à donner aux plongeurs qui s'initient à l'utilisation d'un ordinateur.

Question 3 : Éléments de calculs de tables (5 pts)

1°- Trois compartiments sont étudiés au cours d'une plongée de 30 minutes à 30 mètres.

a - Quelles sera la tension d'azote dans les compartiments : 10 min, 15 min, 30 min ?

b - sachant que S_c : 10 min = 2,38 ; 15min = 2,2 ; 30min = 1,82, lequel sera le compartiment directeur et quelle sera la profondeur?

2°- Lorsqu'on consulte un ancien ouvrage traitant de la théorie de la plongée (ex "la plongée de Guy Poulet et Robert Barincou"), on constate que le terme de compartiment n'est pas utilisé dans le chapitre sur les éléments de calculs de table : ils ont utilisé uniquement celui de tissu.

Expliquez les raisons de ce changement de dénomination.

Niolon – septembre 2012

Actuellement, les ordinateurs de plongée rencontrés sur le marché utilisent un modèle mathématique de type « Bühlmann » ou de type « VPM ».

- Quelles sont les principales différences entre le modèle de Haldane et celui de Bühlmann en ce qui concerne :
 - Les hypothèses physiologiques utilisées pour la modélisation du comportement du corps humain.
 - Le(s) critère(s) qui déclenchent l'apparition d'un palier de décompression.
- Quelles sont les principales différences entre le modèle dit « de Bühlmann » et ceux de type « VPM » en ce qui concerne :
 - Les hypothèses physiologiques utilisées pour la modélisation du comportement du corps humain.
 - Le(s) critère(s) qui déclenchent l'apparition d'un palier de décompression. (2 points)

En pratique, certains ordinateurs indiquent des paliers « obligatoires » et des paliers « non obligatoires ».

- Expliquez à quoi servent ces paliers « non obligatoires ».
- Dans quel(s) cas peut-on conseiller à des plongeurs de réaliser ces paliers « non obligatoires ».

Hendaye – juillet 2012

- La plupart des procédures de décompression utilisées actuellement sont dérivées du modèle de Haldane. Citez, sans les développer, les principales hypothèses ayant servi à son élaboration.
- Définissez la notion de seuil de sursaturation critique (Sc) dans les tables fédérales.
- WORKMAN a introduit la notion de M-Value :
 - donnez une définition simple de ce terme
 - expliquez les différences par rapport au seuil de sursaturation critique utilisé pour les tables fédérales.
- Donnez les avantages annoncés par le concepteur du modèle RGBM. Par quels moyens pratiques sont-ils obtenus ? Justifiez cette réponse.

Niolon – mai 2012

Plongée et ordinateur (7 pts)

L'ordinateur de plongée, s'est vulgarisé dans les années 80. Depuis, beaucoup d'appareils ont été commercialisés, avec des différences plus ou moins marquées. Néanmoins, ils fonctionnent tous selon une base commune : une modélisation mathématique de la dissolution des gaz dans les liquides.

- Qu'est ce qu'un modèle mathématique ?
- Les tables MN90, adoptées par la FFESSM, ont été conçues d'après le modèle de Haldane, également utilisé dans beaucoup d'ordinateurs de plongée.
 - Définissez la notion de compartiment par opposition à celle de tissus.
 - Sur quelles hypothèses est construit le modèle haldanien ?
- Depuis, d'autres modèles mathématiques ont été élaborés, ils apportent une approche complémentaire ou différente (non Haldanienne) de la saturation-désaturation.
 - Quels nouveaux paramètres principaux ont été intégrés à la modélisation du phénomène de dissolution des gaz ?
- Au vu de la diversité des procédures (tables, ordinateurs différents), en plongée, dans une même palanquée, il peut apparaître plusieurs profils de décompression. Précisez quelles règles simples sont à définir pour sécuriser la décompression de ce groupe ?

Niolon – mai 2011

- Si l'on se place dans les conditions de la plongée à l'air en mer, quelle est la TN2 finale du compartiment 5 min (C5) après 25 min de plongée à 41 m ? On suppose que les plongeurs étaient à saturation du bord de mer avant la plongée.
Dans ces conditions, est-il possible de remonter ce compartiment C5 directement à la surface au bout de 25 min et si non, jusqu'à quelle profondeur ? $Sc\ C5 = 2,72$ (2 pts)
- Au début du siècle dernier J. S. HALDANE, le précurseur de l'analyse de la décompression du plongeur, est l'un des premiers à faire référence à cette notion de « compartiments ». Sur quelles hypothèses fonde-t-il sa modélisation de la décompression ? (3 pts)
- Les progrès de la connaissance de la décompression amènent à remettre en cause les hypothèses de Haldane.
Citez les données qui ont amené à prendre d'autres hypothèses de modélisation. (2 pts)

Niolon – septembre 2010

Différents modèles sont utilisés pour construire les méthodes de désaturation. Ces modèles n'ont pas l'ambition de représenter le fonctionnement physiologique du corps humain, ils proposent un mode de calcul dont on espère que les résultats seront le plus proche de la physiologie réelle. Les tables ou les ordinateurs sont des outils permettant de gérer la désaturation et chacun d'entre eux possède ses caractéristiques.

- Indiquez dans le tableau en annexe les paramètres pris ou non en compte par les tables et ordinateurs.
- Indiquez les principales caractéristiques de 3 modèles de décompression.
- Quelles sont les limites du modèle de décompression de Haldane ?

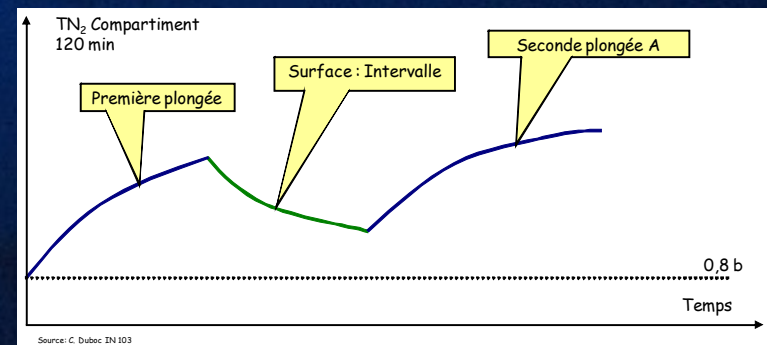
Niolon – septembre 2010 (suite)

Afin de mieux préparer un cours sur l'utilisation fédérale des tables MN90, des stagiaires pédagogiques MF1 vous posent ces questions :

- Comment sont calculées les majorations des plongées successives ? Répondez en prenant les 2 exemples suivants et en indiquant comment visualiser le résultat dans les tables MN90 :
 - Calculez la tension d'azote après 2h et 4h quand GPS = H.
 - Calculez la majoration à 15 mètres pour une TN2 = 1,4 b.
- Comment calculer la profondeur précise à laquelle il est possible de s'immerger en mer pendant une durée illimitée sans faire de palier ? (air = 20% d'O₂ et 80% de N₂ et densité de l'eau = 1).
- Pourquoi la règle des plongées successives ne s'applique qu'à partir de 15 min d'intervalle à la surface ?

On représentera à travers le schéma ci-après l'évolution de la tension dans le compartiment 120 min pour deux plongées.

- Visualisez la notion de majoration en utilisant ce schéma (répondez sur l'annexe).
- Montrez que l'exploitation d'un tel document pourrait permettre d'expliciter le fait que la majoration augmente quand la profondeur de la seconde plongée diminue (répondez sur l'annexe).



Hendaye – Juillet 2010

Pour établir les procédures de décompression, on utilise des modèles, dont le plus connu est celui de Haldane. Ce concept, comme les autres, modélise le corps humain en compartiments.

- Définissez ce qu'est un compartiment.
- Dans l'hypothèse de ce modèle d'Haldane, on immerge les compartiments 5 min, 10 min et 15 min à une profondeur de 40 mètres durant 30 minutes.

Sachant que : $SC\ 5 = 2,72$, $SC\ 10 = 2,38$, $SC\ 15 = 2,20$

- Indiquez quelle sera la tension d'azote dans ces compartiments
- Indiquez quel sera le compartiment directeur et déterminez la profondeur du premier palier.
- Listez les hypothèses du modèle de Haldane et justifiez les raisons pour lesquelles il ne peut donc être totalement prédictif. En conséquence, pourquoi convient-il de rester critique devant toute procédure de décompression. Argumentez votre réponse.
- Citez l'autre modèle de décompression le plus couramment utilisé par les ordinateurs et précisez les différences avec le modèle de Haldane ?

Niolon – mai 2010

- Les nouveaux ordinateurs de plongée « Reduced Gradient Bubble Model » (RGBM) introduisent la notion de paliers profonds.
- Afin de montrer la différence avec les ordinateurs conçus selon le modèle Haldanien, décrivez pour chacun des deux modèles, les hypothèses de base qui ont abouti à ces deux modélisations.

Niolon – septembre 2009

Deux modèles de décompression sont largement utilisés par nos ordinateurs de plongée :

Certains sont basés sur un modèle de type "Haldanien" alors que d'autres utilisent le principe dit "des microbulles".

- a) Quelles sont les hypothèses de base utilisées pour la conception de ces deux modèles.
- b) Exposez les conséquences de l'utilisation d'un ordinateur basé sur l'une ou l'autre de ces deux approches pour le plongeur.
- c) Expliquez pourquoi les différents modèles ne correspondent pas exactement à la physiologie du plongeur.

Trébeurden – juillet 2009

- A. Compte tenu de l'extrême complexité de l'organisme, le calcul de la décompression impose qu'on utilise une modélisation mathématique.
- 1) Justifiez cette affirmation
 - 2) Définissez la notion de compartiment et donnez les paramètres qui le caractérisent
 - 3) Etablissez les différences entre un compartiment et un tissu biologique
- B. Pour une plongée de 2 heures à 30 mètres, en considérant exclusivement les compartiments 30 min et 60min (S_c respectifs 1,82 et 1,58)
(Evidemment, ce cas n'a aucune correspondance avec la réalité. Il n'est destiné qu'à expliciter le processus de calcul)
- 1) Déterminez la profondeur du premier palier
 - 2) En imaginant une remontée instantanée, Déterminez la TN2 des deux compartiments après 1 h d'élimination **à l'air**
 - 3) En imaginant une remontée instantanée, Déterminez la TN2 des deux compartiments après 1 h d'élimination **à l'O₂**

Niolon – mai 2009

Trois compartiments sont étudiés au cours d'une plongée de 30 minutes à 35 mètres.

- 1) Quelles sera la tension d'azote dans les compartiments : 10 mn, 15 mn, 30 mn ?
- 2) Sachant que $Sc_{10\text{ mn}} = 2,38$; $15\text{mn} = 2,2$; $30\text{mn} = 1,82$, lequel sera le compartiment directeur et quelle sera la profondeur du premier palier ?

Martinique – octobre 2008

- A quelles limites de conception des modèles déterministes tentent de répondre les modèles de décompression dits « probabilistes » ?

Niolon – septembre 2008

Vous devez expliquer aux stagiaires MF1 les principes de calcul de la saturation et des paliers du modèle de Haldane, ainsi que celui de la majoration des MN90. Vous vous appuyerez pour cela sur l'équation simplifiée du modèle (durées multiples entières de la période) en abordant les points suivants :

- 1) Donnez la définition du concept de majoration et illustrez-le graphiquement.
- 2) Imaginez un modèle Haldanien ignorant les plongées consécutives et dans lequel l'organisme serait réduit au seul compartiment de période 5 minutes, doté pour la circonstance d'un $Sc = 2,4$. Préalablement saturé à l'air à 1 bar, calculez sa TN2 au bout de 15 min d'immersion à 40 m.
- 3) A quelle profondeur peut-il alors être remonté sans risque ? Que représente cette profondeur ?
- 4) Combien de temps doit-il rester à cette profondeur avant de pouvoir rejoindre la surface ? Que représente cette durée ?
- 5) Il remonte immédiatement en surface à l'issue de cette durée. En accord avec votre définition, calculez sa majoration après 5 minutes en surface s'il veut redescendre à une profondeur de 20 m ?

On considère que l'air est composé de 20% d'O₂ et 80% de N₂.

Niolon – septembre 2007

- 1) Très souvent, les termes de tissu et de compartiment sont confondus et utilisés l'un pour l'autre quand il s'agit de traiter des notions liées au calcul des tables. Etablissez la différence entre ces deux termes et justifiez pourquoi ils ne doivent en aucun cas être confondus.
- 2) Listez les différents paramètres physiologiques qui peuvent varier au cours d'une plongée, ou d'une plongée à l'autre, susceptibles de modifier la quantité d'azote fixée dans différentes parties de l'organisme et qui rendent celui-ci très hétérogène, donc en réalité très complexe.
- 3) Construisez un tableau comparatif entre les paramètres de plongée utilisés par la table MN 90 et ceux qui sont pris en compte dans l'utilisation des ordinateurs.
- 4) Dans quelques cas particuliers, les ordinateurs sont susceptibles de fournir des indications qu'on doit pourtant considérer comme peu fiables. Citez deux cas possibles et justifiez les raisons pour lesquelles vous évaluez les indications fournies par l'appareil avec circonspection.
- 5) En pareil cas, quel comportement adoptez-vous ?
- 6) L'utilisation des tables serait-elle pour autant une meilleure garantie ?

Niolon – septembre 2004

- 1) Vous désirez approfondir les connaissances de vos stagiaires pédagogiques sur les différents modèles de décompression. Afin de diversifier leurs connaissances, citez trois modèles de décompression en donnant brièvement leurs caractéristiques. (2 points)
- 2) Votre stagiaire MF1 désire affiner son cours sur la décompression. Il vous demande quels sont les paramètres pris en compte pendant l'immersion :
 - a) au cours d'une plongée avec utilisation d'une table.
 - b) une plongée avec utilisation d'un ordinateur.
 - c) les facteurs non pris en compte par les deux procédures de décompression ?Rédigez vos réponses ? (2 points)
- 3) Listez les arguments qui permettent d'affirmer que l'organisme ne se comporte pas comme le modèle de Haldane. (3 points)