

# La décompression en plongée sous-marine



Note au lecteur : Ce document est une version complétée d'un travail fait en math spé (que l'on nomme le TIPE pour Travail d'Initiative Personnelle Encadré). Donc, ce document s'intéresse surtout à la partie modélisation, mise en équation puis utilisation des modèles. C'est pour cela que les parties consacrées à la physiologie sont à la fois brèves et banales. Les notions de mathématiques, physique et chimie sont de niveau licence pour les plus compliquées. On fait beaucoup appel à la thermodynamique chimique en utilisant les notions de potentiel thermodynamique d'équilibre, d'activité, de potentiel électrochimique. Il est donc bon de les avoir comprises (avec les notions sous jacentes d'énergie interne, d'enthalpie, d'entropie et d'enthalpie libre) avant de lire ce document. J'ai préféré essayer de présenter les calculs de manière assez formalisée en multipliant les indices et les exposants quitte à alourdir les notations, surtout dans le cas du VPM.

Si vous avez des questions, des remarques ou si vous avez vu des erreurs (malgré mes vérifications), n'hésitez pas à me contacter à l'adresse : [thomas.auphan@free.fr](mailto:thomas.auphan@free.fr)

<b>I. INTRODUCTION :</b>	<b>3</b>
<b>II. DÉFINITION ET EXPLICATION DE L'ACCIDENT DE DÉCOMPRESSION :</b>	<b>4</b>
<b>III. LE MODÈLE DE HALDANE :</b>	<b>7</b>
<b>A. Théorie du modèle de HALDANE :</b>	<b>7</b>
<b>B. Mise en œuvre pour le calcul de paliers :</b>	<b>10</b>
<b>IV. LE MODÈLE À PERMÉABILITÉ VARIABLE (VPM) :</b>	<b>13</b>
<b>A. Etude générale du VPM :</b>	<b>13</b>
<b>B. Application du VPM à la plongée sous-marine :</b>	<b>17</b>
1. Hypothèses et conséquences :	17
2. Mise en œuvre du VPM-B pour les calculs de paliers :	21
<b>V. COMPARAISON DES MODÈLES :</b>	<b>27</b>
<b>A. Comparaison des profils :</b>	<b>27</b>
<b>B. Comparaison avec des tables de plongées existantes :</b>	<b>28</b>
<b>C. Comparaison des comportements sur des profils à risques :</b>	<b>32</b>
<b>VI. CONCLUSION :</b>	<b>35</b>
<b>VII. ANNEXES :</b>	<b>36</b>
<b>A. Annexe 1 : La programmation du modèle de HALDANE :</b>	<b>36</b>
<b>B. Annexe 2 : Programmation du VPM-B avec les coefficients ajustés :</b>	<b>39</b>
<b>VIII. BIBLIOGRAPHIE COMMENTÉE :</b>	<b>48</b>
<b>IX. REMERCIEMENTS :</b>	<b>50</b>

## I. Introduction :

Tout d'abord, notons que le problème de l'accident de décompression n'est pas spécifique aux plongeurs sous-marins, il concerne aussi les tubistes (travailleurs sous gaz comprimés), les aviateurs (surtout les pilotes de chasse), les astronautes, le personnel de la médecine hyperbare, les sous mariniens (parfois, lors d'évacuations d'urgence, par exemple)... En effet, ces personnes peuvent être soumises à une diminution ample et rapide de la pression ambiante (je reste volontairement vague sur les notions de « ample et rapide »), éventuellement précédée par une augmentation de cette pression. Néanmoins, dans ce document, on se limite au cas de la décompression en plongée sous-marine.

Dans les conditions de température et de pression normale (à la surface de la Terre), il y a un équilibre entre les gaz dissous dans l'organisme humain et ceux contenus dans l'air. Lors d'un séjour en profondeur, l'homme respirant des gaz à la pression ambiante, l'équilibre est rompu. La pression étant plus élevée, les tissus humains vont se charger en gaz. A la remontée, une variation de pression trop rapide peut entraîner l'apparition de bulles pathogènes, c'est le fameux accident de décompression. Afin de les éviter, différentes modélisations ont été mises en place, on se propose ici d'en étudier deux. Ces modèles sont utilisés avec les tables de décompression et les ordinateurs de décompression.

Limites de l'étude :

On se restreindra au cas de plongées à l'air (sans oxygène pur au palier), simples, de courte durée (au maximum quelques heures, afin d'exclure le cas des plongées dites à saturation), et effectuées au niveau de la mer.

## II. Définition et explication de l'accident de décompression :

L'accident de décompression est un ensemble de symptômes dus à la formation de bulles dans le corps humain (la formation de bulles est provoquée par une diminution de la pression ambiante). Donc l'accident de décompression n'est pas un barotraumatisme (variations de volume et de pression dans des cavités naturelles du corps humain (comme l'oreille moyenne, les poumons, le système digestif) ou dans des cavités avec lesquelles le corps humain est en contact (comme l'intérieur du masque)).

Voici quelques-uns des symptômes principaux de l'accident de décompression : Puce et moutons sur la peau (ressemblant à de l'urticaire), douleurs aux articulations (les bends) ou musculaires, problèmes neurologiques (troubles de la vue ou de l'audition, troubles de l'équilibre, difficultés pour uriner, paralysies), problèmes cardiaques dans les cas les plus graves.

Si dans certains cas, peu graves, l'accident de décompression peut se résorber tout seul, il faut généralement recomprimer la victime pour traiter l'accident.

On a classé les accidents de décompression en deux grandes catégories :

- Le type 1 : essentiellement les puces, les moutons et les bends.
- Le type 2 : essentiellement les accidents neurologiques.

Une propriété remarquable de ces deux types d'accidents est qu'ils semblent avoir des mécanismes différents car ils sont souvent provoqués par des profils de plongée différents :

- Le type 1 se produisent surtout dans les plongées longues, et semblent surtout dû à une diminution brutale de la pression ambiante et la quantité de gaz dissous.
- Le type 2 se produit le plus souvent dans les cas de plongées à profil inversé (plongée dont la profondeur maximale est atteinte en fin de plongée), yoyo (plongée pendant laquelle le plongeur monte et descend de plusieurs mètres à plusieurs reprises) ou successives entre autres. Ainsi en plus des causes pour le type 1, il faut y ajouter la dépendance de cet accident avec le profil de la plongée.

On sait depuis longtemps que l'accident de décompression est dû essentiellement au gaz diluant (c'est à dire diazote pour les plongées à l'air, diazote et hélium pour les plongées au trimix) qui se dissolvent en grande quantité durant la phase de compression et durant le séjour à grande pression, avant de former des bulles lors de la remontée.

Avant d'aller plus loin, il faut savoir que les phénomènes de formation de bulles sont encore à l'heure actuelle des sujets de recherche en physique-chimie et ne sont qu'en partie expliqués même dans le cas de l'eau. En effet, l'inconnu en physique ne se résume pas à l'infiniment grand (cosmologie, big bang, relativité générale...) ou l'infiniment petit (quark, mécanique quantique...). Le problème est que, d'après les modèles théoriques, les bulles seraient très difficiles à former : avec les propriétés de l'eau pure, il faut une diminution de pression d'environ 1000 bars pour former des bulles. Pourtant même dans de l'eau distillée une variation de pression de quelques bars suffit pour provoquer la formation de bulles. Une des solutions utilisées pour expliquer cela consiste à supposer l'existence de noyaux gazeux (voir les travaux de

YOUNT et l'étude du VPM). Les noyaux gazeux sont des phases gazeuses de très petite taille (de l'ordre du micromètre) et qui ont un comportement particulier du fait de leur taille (réaction aux variations de pressions, ne flottent pas ou peu, effets de l'interface liquide/gaz qui est plus ou moins perméable à la diffusion). L'existence des noyaux gazeux semble avérée, au moins dans le cas de l'eau et de certains types de gélatine, puisque YOUNT a pu les observer au microscope. Pour l'homme, une variation de pression de moins de deux bars peut suffire à provoquer un accident de décompression. Il faut donc prendre en compte le fait que le corps humain est un milieu hétérogène et supposer l'existence des noyaux gazeux (ce qui n'est pas anormal car le corps humain contient énormément d'eau). De plus l'existence des noyaux gazeux dans les organismes vivants (crevettes, rats...) semble confirmée par le fait que faire précéder une plongée par une compression ample (plus ample que la plongée) et rapide (de manière à ce que la quantité de diazote dissous ne varie pas beaucoup) diminue le risque d'accident de décompression.

Un modèle a été présenté pour expliquer les accidents de décompression en 1988 par HENNESSY, ce modèle utilise l'hypothèse des bulles artérielles. En voici une version résumée et légèrement modifiée :

Il admet la présence de noyaux gazeux dans le corps humain.

Les noyaux gazeux sont produits essentiellement au niveau cardiaque par cavitation ou par tribonucléation.

Le phénomène de cavitation est la formation de bulles dans un liquide à l'intérieur d'une zone de dépression (et donc, dans le cas de gaz dissous, de plus grande sursaturation) provoquée par exemple par un écoulement rapide (le théorème de BERNOULLI dit que quand la vitesse d'écoulement augmente, la pression diminue).

Le phénomène de tribonucléation est un cas particulier de cavitation où la dépression est produite par l'éloignement de deux parois initialement proches ou par frottement. Les vitesses d'écoulements élevées au niveau des valves cardiaques (surtout les valves aortiques et pulmonaires) ainsi que leurs mouvements en font des sites propices à la formation des noyaux gazeux. La petite taille des noyaux gazeux leur permet de passer au travers du filtre pulmonaire. On a ainsi des noyaux gazeux qui sont initialement présents dans le sang et répartis dans tout le corps humain. La création de noyaux est d'autant plus aisée que le sang est sursaturé. Donc lors de la phase de décompression, le nombre de noyaux gazeux augmentent. De plus le passage à travers les tissus sursaturés permet aux noyaux gazeux de se développer et de devenir des micro-bulles. Grâce à la sursaturation et en fusionnant, les micro-bulles vont à leur tour grossir. Sauf si le filtre pulmonaire est saturé seules les plus petites micro-bulles ne seront pas stoppées lors de leur prochain passage dans le filtre pulmonaire. Cela est facilité par le fait que l'augmentation du nombre de micro-bulles diminue l'efficacité du filtre pulmonaire. Il faut généralement un délai avant que la quantité de micro-bulles soit suffisante pour forcer le filtre pulmonaire. Il se peut ensuite qu'une micro-bulle se fixe sur un tissu, il y a alors deux cas à envisager :

- Si le tissu n'est pas sursaturé, la micro-bulle va se résorber par diffusion du gaz qu'elle contient.
- Si le tissu est sursaturé, la micro-bulle va grossir par diffusion jusqu'à devenir une bulle et provoquer l'obstruction du vaisseau ou des lésions mécaniques (dues au volume trop important occupé par la bulle).

Ainsi pour les accidents de type 1 les tissus concernés sursaturés sont en général des tissus lents (sauf pour la peau qui est un tissu rapide) donc l'accident de décompression peut aussi se produire longtemps après le retour en surface. Il peut

aussi y avoir une formation de bulle dans le tissu même (sous la peau, dans l'articulation...). La formation de bulle étant facilitée par l'inhomogénéité du tissu et par l'existence de noyaux gazeux.

Pour les accidents de type 2 ce sont essentiellement les tissus nerveux qui sont atteints. Ces tissus sont en général rapides donc le délai d'apparition des symptômes est en général court.

Ce modèle a plusieurs avantages : Premièrement, il justifie le fait que les accidents de décompression puissent se déclarer après la fin de la plongée. Deuxièmement il peut expliquer le fait que certains profils soient plus dangereux que les autres :

- Plongées yoyos : Lors de chaque remontée la sursaturation des tissus crée des micro-bulles (à partir des noyaux gazeux), si on ne redescendait pas, les micro-bulles de grande taille seraient piégées par le filtre pulmonaire. Mais en redescendant les micro-bulles sont comprimées et même celles qui étaient initialement grosses deviennent suffisamment petites pour passer à travers le filtre pulmonaire pour éventuellement reprendre leur volume lors de la décompression suivante et peut être se fixer sur un tissu sursaturé (tissu nerveux, généralement). Il peut aussi y avoir des bulles, qui se forment dans des tissus capables de les supporter (dans une certaine mesure) sans provoquer de symptômes (tissus adipeux par exemple), et qui lors de la recompression peuvent être « détachées » pour se déplacer dans le corps humain et éventuellement se fixer lors d'une nouvelle décompression sur des tissus sensibles.
- Plongées à profil renversé (profondeur maximale atteinte en fin de plongée) : Les noyaux gazeux seraient moins comprimés que dans le cas où on atteindrait la profondeur maximale en début de plongée (voir l'étude du VPM).

Par contre, outre le fait que ce n'est qu'un modèle (et donc que c'est une explication imparfaite), il n'est pas actuellement possible de faire une étude quantitative du phénomène, ni de les mettre en équation. Ce modèle ne permet donc pas de générer des tables ou des algorithmes de décompression. Les modèles utilisables pour calculer une procédure de décompression les plus proches de cette explication sont les modèles dits à bulles (types VPM et RGBM).

Enfin, il faut noter que l'accident de décompression est un phénomène statistique (c'est à dire en partie aléatoire) : Sauf, peut être, dans les cas extrêmes, on ne peut prévoir à l'avance, avec certitude, la survenue (ou pas) d'un accident de décompression. Ce n'est pas parce que l'on a fait une plongée yoyo ou que l'on a pas tout à fait respecté la procédure de décompression que l'on aura forcément un accident de décompression. A l'inverse ce n'est pas parce que l'on a respecté toutes les règles de sécurité que l'on sera à coup sûr épargné. De plus certains spécialistes estiment désormais que l'accident de décompression n'est pas quelque chose de tout noir ou tout blanc : Par exemple, après une plongée on peut ressentir une légère fatigue liée à la décompression, sans pour autant avoir forcément besoin de déclarer un accident de décompression et d'appeler les secours. En plus des facteurs liés au profil de plongée, il y a d'autres facteurs qui peuvent augmenter le risque d'accident de décompression tels que l'effort physique avant et après la plongée, le froid, la fatigue, l'embonpoint, la présence d'un *Foramen Ovale* perméable (il s'agit d'une paroi perméable entre les oreillettes droite et gauche du cœur, cela n'est généralement pas grave, mais dans le cas de la plongée, cela peut mettre en court circuit le filtre pulmonaire pour les bulles et micro-bulles)...

### III. Le modèle de HALDANE :

Ce modèle a été développé en 1908 par HALDANE, c'est le plus utilisé de nos jours. En 1908, la plupart des accidents de décompression étaient des bends, c'est pourquoi la Royal Navy avait demandé à HALDANE de trouver une procédure de décompression permettant d'éviter surtout les bends. Le modèle de HALDANE représente le corps humain comme un ensemble fini de compartiment et il admet que l'on n'aura pas d'accident de décompression si, à tout moment, le rapport entre la tension de diazote (voir plus bas la remarque sur la loi de HENRY) et la pression ambiante reste inférieur à une valeur nommée coefficient de sursaturation critique (ici noté  $Sc$ ). Initialement, HALDANE utilisait peu de compartiments (cinq au total) et avec des coefficients de sursaturation critique assez grossiers ( $Sc = 2$  pour les cinq compartiments, à partir d'expériences menées sur des chèvres). Par la suite, le nombre de compartiments a été augmenté et le choix des coefficients de sursaturation critique a été affiné (en utilisant, pour certaines tables, des outils statistiques). Cela a permis de rendre le modèle de HALDANE suffisamment fiable pour être encore massivement utilisé de nos jours.

#### A. Théorie du modèle de HALDANE :

Remarque préliminaire :

Loi de HENRY : À une température donnée, pour de faibles pressions, l'activité d'un gaz dissous à saturation dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle de ce gaz exercée sur ce liquide (On rappelle aussi que dans ces conditions et pour de faibles concentrations, l'activité d'un élément dissous dans un liquide est proportionnelle à la concentration de cet élément).

Autrement dit, dans le cas du diazote :

On considère la réaction de dissolution  $N_{2(g)} = N_{2(dissous)}$  :

On note  $P_{N_2}$  la pression partielle de diazote dans le gaz

Soit  $a_{N_2 \text{ dissous}}$  l'activité du diazote à l'équilibre.

$$P_{N_2} = k \times a_{N_2 \text{ dissous}}$$

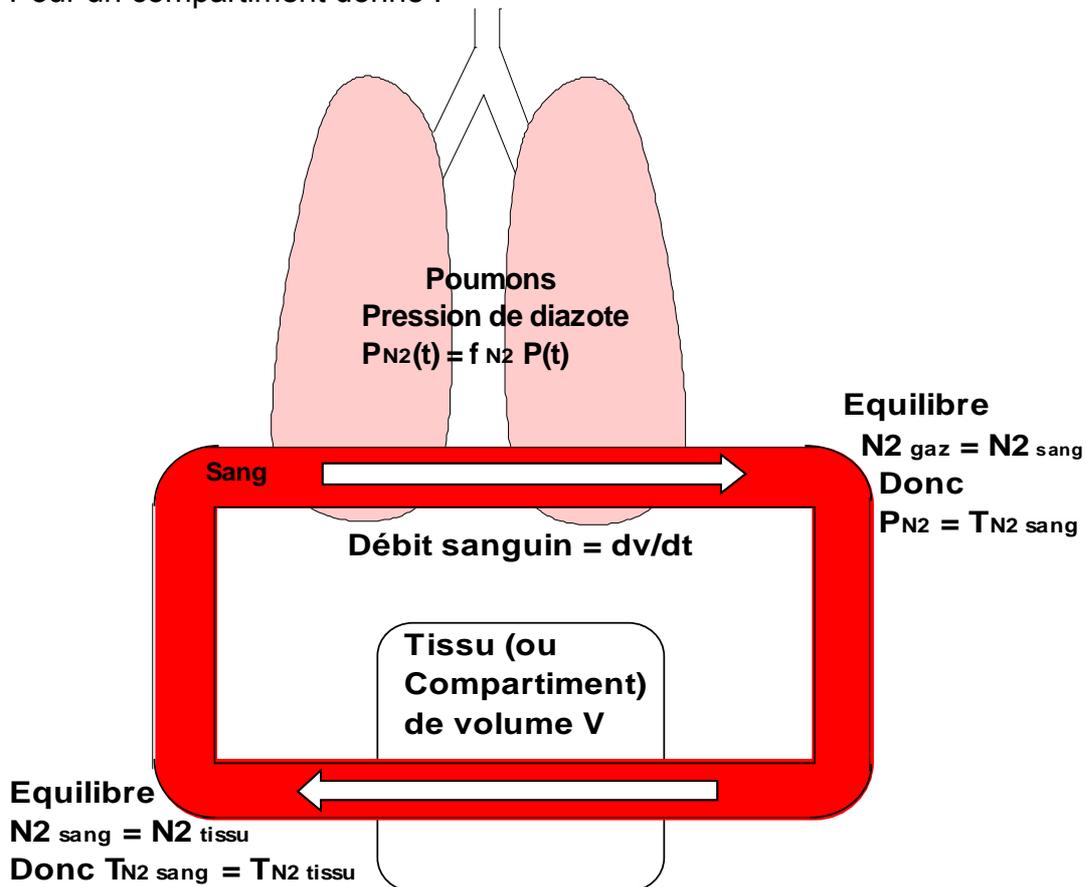
Donc l'activité du diazote dissous est assimilée à une pression appelée tension de diazote ( $T_{N_2}$ ). La tension de diazote dissous est définie par  $T_{N_2} = P_{N_2}$ .

Hypothèses :

- A la sortie des poumons, le sang artériel est complètement équilibré avec la pression des gaz de l'air alvéolaire.
- L'organisme est constitué d'un nombre fini de tissus (les compartiments) ayant chacun une période (durée caractéristique que l'on définira plus tard) qui lui est propre.
- La tension des gaz dissous à l'intérieur d'un tissu est uniforme.
- A la sortie du tissu, le sang veineux est complètement équilibré avec la concentration en gaz contenu dans le tissu.
- Un tissu est isolé (échanges de gaz qu'avec la circulation sanguine).
- Pendant la plongée et la décompression, le débit sanguin et la solubilité du diazote (dans le sang et les tissus) restent constants.

- Chaque compartiment peut accepter un rapport  $\frac{T_{N_2 \text{ tissu}}}{P_{\text{absolue}}}$  inférieur à une valeur déterminée par l'expérience et les statistiques (cette valeur est le coefficient de sursaturation critique).

Pour un compartiment donné :



Soit la réaction  $N_{2(g)} = N_{2(sang)}$

Soit  $a_{\text{sang } 1 N_2}$  l'activité du diazote dissous dans le sang à l'entrée dans le tissu

(donc à la sortie des poumons). On a alors :  $s_{\text{sang}} = \frac{a_{\text{sang } 1 N_2}}{P_{N_2}/P^0}$

Où  $s_{\text{sang}}$  est la solubilité du diazote dans le sang et  $P_{N_2}$  est la pression partielle de diazote dans les poumons (et donc en première approximation dans le gaz respiré).  $P^0$  est la pression standard ( $P^0 = 1 \text{ bar}$ )

$$\text{Donc } a_{\text{sang } 1 N_2} = s_{\text{sang}} \times \frac{P_{N_2}}{P^0} \quad (1)$$

Pendant  $dt$  il arrive un volume de sang  $dv$  dans un tissu de volume  $V$ . On suppose que  $\frac{dv}{dt}$  est constant.

Soit la réaction  $N_{2(sang)} = N_{2(tissu)}$

Soit  $a_{\text{tissu } 2 \text{ N}_2}$  et  $a_{\text{sang } 2 \text{ N}_2}$  les activités du diazote à l'équilibre après le passage du volume  $dv$  de sang à travers le tissu, respectivement dans le tissu et dans le sang

$$K = \frac{a_{\text{tissu } 2 \text{ N}_2}}{a_{\text{sang } 2 \text{ N}_2}} \quad \text{Où } K \text{ est la constante thermodynamique d'équilibre.}$$

Le diazote dissous dans le sang a initialement une activité  $a_{\text{sang } 1 \text{ N}_2} = s_{\text{sang}} \times \frac{P_{\text{N}_2}}{P^0}$  (celle à la sortie des poumons).

Comme dans tous les cas, les activités de diazote dissous sont faibles on a :

$$a_{\text{dissous } \text{N}_2} = \frac{[\text{N}_2]_{\text{dissous}}}{C^0}$$

$C^0$  est la concentration standard ( $C^0 = 1 \text{ mol.l}^{-1}$ ).

Grâce à la conservation de la matière on a :

$$dv \times da_{\text{sang } \text{N}_2} = dv \times (a_{\text{sang } 2 \text{ N}_2} - a_{\text{sang } 1 \text{ N}_2}) = -V \times da_{\text{tissu } \text{N}_2}$$

$$\text{Donc } dv \times da_{\text{sang } \text{N}_2} = dv \times \left( \frac{a_{\text{tissu } 2 \text{ N}_2}}{K} - a_{\text{sang } 1 \text{ N}_2} \right) = -V \times da_{\text{tissu } \text{N}_2}$$

D'où l'équation différentielle.

$$(2) : \frac{da_{\text{tissu } \text{N}_2}}{dt} = -\frac{1}{V} \frac{dv}{dt} \times \left( \frac{a_{\text{tissu } 2 \text{ N}_2}}{K} - a_{\text{sang } 1 \text{ N}_2} \right)$$

Or  $K = \frac{s_{\text{tissu}}}{s_{\text{sang}}}$ , où  $s_{\text{tissu}}$  = solubilité du diazote dans le tissu.

On « convertit » les activités en pression (et en tension) :

$$\text{On a } a_{\text{sang } 1 \text{ N}_2} = s_{\text{sang}} \times \frac{P_{\text{N}_2}}{P^0} \text{ et on note } a_{\text{tissu } \text{N}_2} = s_{\text{tissu}} \times \frac{T_{\text{tissu } \text{N}_2}}{P^0}$$

$$\text{D'où l'équation de HALDANE : (3) } \frac{dT_{\text{tissu } \text{N}_2}}{dt} = -\frac{1}{V} \frac{s_{\text{sang}}}{s_{\text{tissu}}} \frac{dv}{dt} \times (T_{\text{tissu } \text{N}_2} - P_{\text{N}_2})$$

Si on suppose que  $P_{\text{N}_2}$  est constant au cours du temps :

$$T_{\text{tissu } \text{N}_2} = P_{\text{N}_2} + (T_{\text{tissu } \text{ini } \text{N}_2} - P_{\text{N}_2}) \times e^{-\left(\frac{1}{V} \frac{s_{\text{sang}}}{s_{\text{tissu}}} \frac{dv}{dt}\right) \times t}$$

$$\text{On définit la période du compartiment par } \theta = \frac{\ln(2)}{\left(\frac{1}{V} \frac{s_{\text{sang}}}{s_{\text{tissu}}} \frac{dv}{dt}\right)}$$

En supposant que  $P_{\text{N}_2}$  est indépendant du temps la solution de l'équation de HALDANE s'écrit sous la forme :

$$T_{\text{tissu } N_2}(t) = T_{\text{tissu ini } N_2} + (P_{N_2} - T_{\text{tissu ini } N_2}) \times \left( 1 - \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{\theta}} \right)$$

En supposant que  $P_{N_2}$  varie en fonction du temps :

$P(t) = c t + P_0$  c'est à dire  $P_{N_2} = f_{N_2} \cdot (c \cdot t + P_0)$ , on a (en utilisant la solution générale puis la méthode de variation de la constante par exemple)

$$T_{\text{tissu } N_2}(t) = f_{N_2} P_0 + f_{N_2} c \left( t - \frac{1}{k} \right) - \left( f_{N_2} P_0 - T_{\text{tissu } N_2}(0) - \frac{f_{N_2} c}{k} \right) \exp(-kt)$$

$$\text{Où } k = \frac{1}{V} \frac{s_{\text{sang}}}{s_{\text{tissu}}} \frac{dv}{dt}$$

On sait donc calculer  $T_{\text{tissu } N_2}(t)$ .

Pour la remontée, on considère qu'il n'y aura pas d'accident de décompression si  $\frac{T_{\text{tissu } N_2}(t)}{P(t)} \leq Sc$  où  $Sc$  est le coefficient de sursaturation critique déterminé par

l'expérience et les statistiques.

Dans la pratique les périodes sont fixées plus ou moins arbitrairement.

Les tables de la marine nationale (tables MN 90) utilisent :

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

Avec une vitesse de remontée jusqu'au premier palier entre 15 et 17 m/min et une vitesse de remontée entre les paliers de 6 m/min.

### **B. Mise en œuvre pour le calcul de paliers :**

Une idée importante à noter est que les méthodes (programmes informatiques, le plus souvent) qui permettent de générer des procédures de décompression à partir d'une plongée donnée et d'un modèle simplifient le plus souvent les calculs (pour éviter d'avoir des temps de calculs trop longs pour les ordinateurs) généralement en effectuant des majorations (c'est à dire, ici, des simplifications rendant les procédures de décompressions plus strictes (pour un même jeu de coefficients) par rapports à l'utilisation des équations et hypothèses du modèle au sens strict). Ensuite, dans tous les modèles de décompression actuels il y a des paramètres qui ne peuvent être vraiment mesurés (comme les coefficients de sursaturation critique pour le modèle de HALDANE). Les valeurs de ces paramètres sont choisies de manière à ce que le programme effectuant ces majorations renvoie des profils de décompression corrects (suffisamment sécuritaires pour avoir un risque faible tout en évitant de faire des paliers inutilement longs). C'est pour cela que quand on se sert des valeurs utilisées pour une table ou un algorithme dans le but de créer son propre programme, il est essentiel de faire les mêmes majorations (ou éventuellement des majorations un peu plus fortes).

Dans le cas du modèle de HALDANE :

Si le programme de calcul de la saturation des tissus en fonction d'un profil de plongée est assez simple à élaborer, le programme de calcul de la décompression connaissant la profondeur doit respecter un schéma particulier.

Un mode de calcul de procédure de décompression le plus proche des hypothèses au sens strict du modèle de HALDANE semble être celui-ci :

1) Calcul de la saturation des tissus durant la plongée (on découpe le profil de plongée (un graphique de la profondeur ou pression en fonction du temps) en un ensemble de segments de droite).

2) Début de la phase de décompression :

Tant que l'on n'a pas rejoint la surface, faire : (Pour le premier tour dans la boucle : remonter jusqu'à ce que la profondeur soit un multiple de trois mètres en respectant la condition de non-accident de décompression donnée dans le 2.a))

2.a) A l'aide d'un « profil fictif » (même profondeur et même saturation des tissus) : supposons que l'on remonte de trois mètres (la distance entre les paliers est fixée à trois mètres car elle ne doit pas être trop grande et qu'elle correspond à 10 pieds (facile pour les plongeurs anglo-saxons qui sont les premiers à avoir développé les tables)) avec une vitesse de remontée fixée. Pendant la remontée, à tout instant (toutes les demi-secondes ou tous les dixièmes de seconde semble amplement suffisant), on calcule la saturation des tissus et on vérifie alors que pour aucun des tissus les coefficients de sursaturation critique ne sont dépassés.

2.b) Si pour ce « profil fictif », les coefficients de sursaturation critique ne sont jamais dépassés alors on remonte effectivement de trois mètres puis on recommence à partir du 2.a).

2.c) Si pour ce « profil fictif », les coefficients de sursaturation critique ont été dépassés à un instant donné : faire une minute de palier puis recommencer à partir du 2.a).

Le problème est que, une fois programmé avec les mêmes périodes et les mêmes coefficients de sursaturation critique que pour les tables MN 90, les procédures de décompression renvoyées avaient des durées bien plus courtes que celles données par la lecture des tables MN 90 (bien évidemment, les comparaisons étaient faites à partir de plongée carrées figurants directement dans la table). Etant donnée que l'utilisation des tables MN 90 par les militaires a un taux d'accident de décompression faible mais non nul (Probabilité d'accident de décompression de  $\frac{1}{30000}$  pour les plongées entre 0 et 45 m de profondeur et de  $\frac{1}{3000}$  pour les plongées entre 45 et 60 m de profondeur, d'après un article co-écrit par BLATTEAU paru en 2005), on ne peut se permettre de diminuer significativement les temps de décompression.

La méthode de calcul de décompression utilisée pour les tables MN 90 remplaçait vraisemblablement le 2.a) par :

« 2.a) Vérifier que, avec la saturation actuelle des tissus, le corps humain peut accepter (sans dépassement des coefficients de sursaturation critique) d'être trois mètres plus haut ».

La « majoration » vient du fait que, quand on a des paliers à faire, les tissus se désaturent un petit peu lorsque l'on remonte entre les paliers.

En conclusion, voilà un algorithme qui renvoie des procédures de décompression proches des tables MN 90 :

1) Calcul de la saturation des tissus durant la plongée (on découpe le profil de plongée (un graphique de la profondeur ou pression en fonction du temps) en un ensemble de segments de droite).

2) Début de la phase de décompression :

Tant que l'on n'a pas rejoint la surface, faire : (Pour le premier tour dans la boucle : remonter jusqu'à ce que la profondeur soit un multiple de trois mètres en respectant la condition de non-accident de décompression donnée dans le 2.a))

2.a) Vérifier que, avec la saturation actuelle des tissus, le corps humain peut accepter (sans dépassement des coefficients de sursaturation critique) d'être trois mètres plus haut.

2.b) Si la réponse à la question du 2.a) est positive, alors on remonte effectivement de trois mètres puis on recommence à partir du 2.a).

2.c) Sinon, faire une minute de palier puis recommencer à partir du 2.a).

#### **IV. Le modèle à perméabilité variable (VPM) :**

Si le modèle de HALDANE permet dans la plupart des cas d'éviter l'accident de décompression, il est loin d'être parfait. L'explication par le modèle de HALDANE de l'accident de décompression est très imprécise puisque qu'il n'étudie pas un des points centraux du problème : la formation et l'évolution des bulles. De plus ses hypothèses sont contestées par l'expérience : charge des tissus en exponentielle limitée, symétrie entre la charge et la décharge des tissus, petit nombre de compartiments (que ce soit 5 ou 25 compartiments), tissus non homogènes et phénomènes de diffusion non négligeable, pas d'interactions entre les compartiments... A cela, il faut ajouter de nouveaux besoins de sécurité : Le nombre de plongées augmente (plongée professionnelle et plongée loisir), et les exigences en matière de sécurité se sont durcies depuis un siècle. Comme le modèle de HALDANE a été créé pour éviter les bends, le risque d'accident de décompression a fortement diminué mais une part plus importante des accidents sont neurologiques. Donc pour renforcer la fiabilité des procédures de décompression, il faut désormais s'intéresser aussi aux accidents de type 2. Pour cela de nouveaux modèles de décompression ont été étudiés depuis les années 1980 dont le VPM essentiellement développé par YOUNT et le Reduced Gradient Bubble Model (RGBM) de Bruce WIENKE. On se propose ici d'étudier le VPM et sa dernière version : le VPM-B. Une des particularités du VPM et du VPM-B est, comme nous le verrons dans la partie comparaison des modèles, que ces modèles introduisent des paliers profonds : l'espoir est qu'avec ces nouveaux profils on puisse limiter la formation de bulles (et donc améliorer la qualité de la décompression) sans avoir des durées de décompression trop longues.

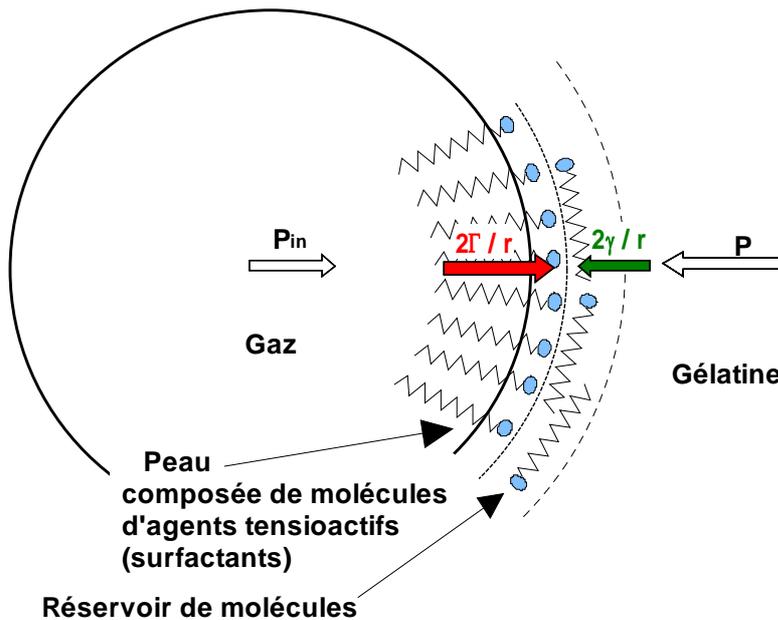
Le développement de ce modèle a commencé au début des années 1980, la dernière version, le VPM-B, a été créée en 2002 par BAKER à la suite de travaux effectués avec YOUNT et MAIKEN.

Le VPM est initialement un modèle développé par YOUNT dans les années 1980 dans le but d'expliquer les résultats des expériences formation de bulles dans la gélatine. C'est ensuite que son application à la décompression en plongée sous-marine a été proposée. Dans les années 1990, YOUNT a travaillé avec MAIKEN et BAKER pour développer l'utilisation du VPM en plongée sous-marine. La dernière version, le VPM-B, a été créée en 2002 par BAKER à la suite de cette collaboration.

##### **A. Etude générale du VPM :**

On considère ici un échantillon de gélatine plongé dans une atmosphère ne contenant que du diazote.

D'après les modèles théoriques, il est très difficile de former les bulles par décompression, et cela n'est pas du tout vérifié par l'expérience. D'autres résultats (non détaillés, ici) ont permis à YOUNT de penser que dans la gélatine, il y a des noyaux gazeux qui sont ici modélisés par des bulles sphériques entourées par une couche de molécules de tensioactifs (surfactant) dont la propriété est de s'opposer à la tension superficielle.



Le terme en  $\frac{2\gamma}{r}$  provient de la tension superficielle (pour plus de détails : voir la loi de LAPLACE dans un cours de mécanique des fluides) et le terme en  $\frac{2\Gamma}{r}$  est dû à la

couche de molécules de tensioactifs.  $P_{in}$  désigne la pression à l'intérieur de la bulle. Dans ce schéma les molécules de tensioactifs ont, une tête hydrophile et une queue hydrophobe (comme les molécules d'huile) or la gélatine étudiée est un milieu aqueux, ce qui explique l'orientation de ces molécules.

Si on comprime le noyau gazeux ci-dessus, son volume va diminuer et les molécules de tensioactif contenues dans la peau vont se resserrer (variations à petite échelle). Si la compression continue, comme les molécules ne peuvent se resserrer indéfiniment, certaines vont sortir de la peau pour aller dans le réservoir (variations à grande échelle). En temps normal les noyaux gazeux sont supposés parfaitement perméables à la diffusion. Mais quand les noyaux gazeux sont comprimés, l'épaisseur du réservoir augmente donc la diffusion est plus difficile.

Comme nous le verrons rapidement plus tard, YOUNT a supposé que les noyaux gazeux étaient soit parfaitement perméables à la diffusion, soit totalement imperméables à la diffusion.

On va faire subir à cet échantillon de gélatine le profil de compression-décompression suivant (voir schéma plus bas) :

On part d'un état initial dans lequel le diazote dissous dans l'échantillon est en équilibre avec le diazote environnant (c'est à dire que l'on a saturation du diazote). On effectue une compression rapide (de manière à ce que le diazote dissous dans l'échantillon n'ait pas le temps de varier) jusqu'à ce que la pression ambiante soit égale à  $P_m$ . Puis tout de suite après on diminue la pression jusqu'à  $P_{sat}$  (donc la quantité de diazote dissous est encore celle du départ). On maintient la pression ambiante égale à  $P_{sat}$  suffisamment longtemps pour que l'échantillon puisse être à nouveau considéré comme saturé. Puis on décomprime (lentement ou rapidement) l'échantillon jusqu'à  $P_b$ .

L'objectif des calculs qui vont suivre est de déterminer les noyaux qui vont devenir des bulles à la suite de ce profil de compression et décompression.

Le potentiel électrochimique est défini par :

$$\tilde{\mu}_i = \mu_i + z_i \cdot F \cdot \varphi_i$$

$$\tilde{\mu}_i = \mu_i^0 + \int_{P^0}^P v_{mi} dp + z_i \cdot F \cdot \varphi_i$$

Où :

P = pression.

$$P^0 = 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$$

$\mu_i$  = potentiel chimique de l'espèce chimique i.

$\mu_i^0$  = potentiel chimique standard de l'espèce chimique i (à P = P<sup>0</sup> et Température = T = 298 K).

$v_{mi}$  = volume molaire de l'espèce chimique i.

$z_i$  = nombre de charges par molécules de l'espèce i.

$$F = 96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$\varphi_i$  = potentiel électrostatique.

On a par définition :  $\int_{P^0}^P v_{mi} dp = R \cdot T \cdot \ln(a_i)$  où  $a_i$  est l'activité de l'espèce chimique i.

Dans le cas des molécules de tensioactif, le VPM suppose que  $v_{mi}$  est indépendant

de P. Donc  $\int_{P^0}^P v_{mi} dp = (P - P^0) \cdot v_{mi}$  et  $\tilde{\mu}_i = \mu_i^0 + (P - P^0) \cdot v_{mi} + z_i \cdot F \cdot \varphi_i$

Soit  $\tilde{\mu}_S = \mu_S^0 + (P_S - P^0) \cdot v_{mS} + z_S \cdot F \cdot \varphi_S$  le potentiel électrochimique de la peau (S pour « Skin »).

Et  $\tilde{\mu}_R = \mu_R^0 + (P_R - P^0) \cdot v_{mR} + z_R \cdot F \cdot \varphi_R$  le potentiel électrochimique du réservoir.

Avec  $P_R = P + \frac{2\gamma}{r}$  (le réservoir ne fait que subir la pression à l'extérieur de la peau).

Avec  $r$  = rayon du noyau gazeux (la peau et le réservoir sont supposés être d'épaisseur négligeable).

On admet que, pour des variations à grande échelle,  $\Gamma$  est égal à sa valeur maximale notée  $\gamma_c$

On a, pour des variations à grande échelle :  $\Gamma = \gamma_c$  donc  $P_S = P_{in} + \frac{2\gamma_c}{r}$ .

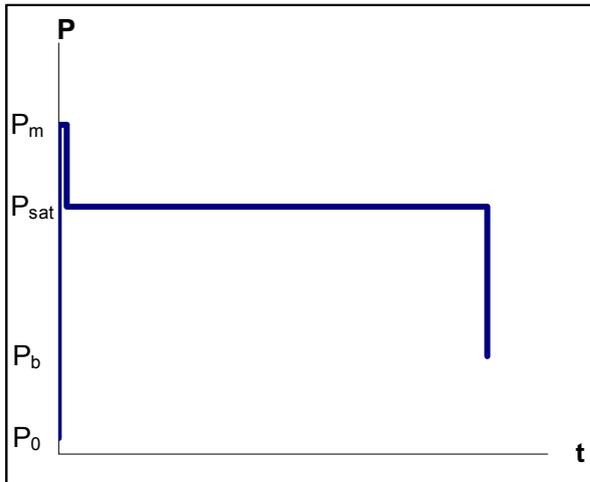
A l'équilibre, on a  $\tilde{\mu}_S = \tilde{\mu}_R$  et en supposant  $v_{mR} = v_{mS} = v_m$  (ce qui n'est pas anormal car dans la peau et dans le réservoir, il y a les mêmes molécules), on obtient :

$$P_{in} + \frac{2\gamma_c}{r} - \beta = P + \frac{2\gamma}{r} \text{ avec } \beta = \frac{\mu_R^0 - \mu_S^0 + z_R \cdot F \cdot \varphi_R - z_S \cdot F \cdot \varphi_S}{v_m}$$

On suppose que  $\gamma_c$  et  $\beta$  sont indépendants de l'évolution rayon d'un noyau gazeux donné durant la compression.

On rappelle que, ici, l'atmosphère ne contient que du diazote.

Initialement, on a  $P_0 + \frac{2\gamma_c}{r_0} - \beta_0 = P_0 + \frac{2\gamma}{r_0}$  d'où  $\beta_0 = \frac{2(\gamma_c - \gamma)}{r_0}$



On effectue une compression rapide jusqu'à  $P=P_m$  de manière à ce que la quantité de gaz dissous n'aie pas de temps de changer.

1<sup>er</sup> Cas : On suppose que l'on reste dans la région où les noyaux gazeux sont perméables à la diffusion. C'est à dire que  $P_m - P_0 \leq \Delta P_{imp}$ , où  $\Delta P_{imp}$  est le seuil d'imperméabilité (valeur de la compression au-delà de laquelle le noyau est considéré comme imperméable à la diffusion).

On a alors  $P_{in}(t_m) = P_0$ .  $t$  désigne bien

évidemment le temps donc, ici  $t_m$  désigne l'instant où  $P$  devient égale à  $P_m$  (on laisse le soin au lecteur d'étendre cela aux autres indices : 0, m ,sat, imp, b...).

On obtient  $P_m - P_0 = 2(\gamma_c - \gamma) \left( \frac{1}{r_m} - \frac{1}{r_0} \right)$  en admettant que  $\beta_m = \beta_0$ .

Après la phase de saturation,  $P_{sat} = P_{in}(t_{sat})$ , on admet d'après les expériences que  $r_{sat} = r_m$ .

Donc dans l'équation  $P_{in} + \frac{2\gamma_c}{r} - \beta = P + \frac{2\gamma}{r}$  il faut poser  $\beta_{sat} = \frac{2(\gamma_c - \gamma)}{r_m}$ .

2<sup>ème</sup> Cas : Si on passe dans la région où les noyaux gazeux sont imperméables à la diffusion. C'est à dire que  $P_m - P_0 > \Delta P_{imp}$ . On considère d'abord une compression rapide jusqu'à  $P = P^* = P_0 + \Delta P_{imp}$  (donc cette phase s'effectue dans la région où les noyaux gazeux sont perméables). Ainsi on a :  $P_{in}(t_{imp}) = P_0$ . Ensuite, la compression continue de  $P = P^*$  jusqu'à  $P = P_m$  et les noyaux gazeux sont imperméables à la diffusion. Etant donné que la température est supposée constante, la loi des gaz parfaits donne :

$$P_{in}(t_m) \cdot r_m^3 = P_{in}(t_{imp}) \cdot r_{imp}^3. \text{ Or } P_{in}(t_{imp}) = P_0.$$

On considère aussi que  $\beta_m = \beta^* = \beta_0$ . Cela permet donc de calculer  $r_m$ . Après la phase de saturation on admet aussi que  $r_{sat} = r_m$ . On a donc :

$$\beta_{sat} = P_0 \left( \frac{r_{imp}}{r_m} \right)^3 - P_{sat} + \frac{2(\gamma_c - \gamma)}{r_m}.$$

Donc, désormais, dans les deux cas, on sait calculer  $r_m$  et  $r_{sat}$ .

En généralisant cela, et d'après d'autres expériences de YOUNT (compression par « paliers » par exemple) on a :

$$\Delta(t) = \max\{P(ta) - P_{in}(ta); 0 \leq ta \leq t\} = 2(\gamma_c - \gamma) \left( \frac{1}{r(t)} - \frac{1}{r_0} \right)$$

$\Delta(t)$  sera par la suite nommé la compression effective (dans les articles de YOUNT : « crushing pressure » ou « effective crushing pressure », noté  $P_{\text{crush}}$ )

Critère de formation d'une bulle à partir d'un noyau gazeux :

On considère qu'un noyau gazeux devient une bulle quand la couche de surfactant n'a plus d'effet.

Pour tenir compte des variations à petite échelle, l'équilibre mécanique donne :

$$P_{\text{in}} + \frac{2\Gamma}{r} = P + \frac{2\gamma}{r}$$

Donc, pour des variations à grande échelle, on a :  $P_{\text{in}} + \frac{2\gamma_c}{r} - \beta = P + \frac{2\gamma}{r}$

Et pour des variations à petite échelle (le rayon  $r$  reste quasiment le même) :

$$P_{\text{in}} + \frac{2\Gamma}{r} = P + \frac{2\gamma}{r}$$

En soustrayant les deux équations et en les arrangeant :  $\Gamma = \gamma_c - \frac{\beta \cdot r}{2}$

Remarque : L'hypothèse  $r_{\text{sat}} = r_m$  implique que, lors de la phase de saturation, c'est  $\Gamma$  qui varie et non pas le rayon  $r$ . Donc, à la fin de la phase de saturation on doit avoir  $\Gamma = \gamma$ .

Après la phase de saturation :  $\beta = \beta_{\text{sat}} = \frac{2(\gamma_c - \gamma)}{r_m}$  donc  $\Gamma = \gamma_c - \frac{(\gamma_c - \gamma) \cdot r}{r_m}$

Donc on considère qu'une bulle se forme quand  $\Gamma = 0$  (la peau perd son effet), c'est-

à-dire que son rayon  $r_b$  vaut :  $r_b = \frac{\gamma_c \cdot r_m}{(\gamma_c - \gamma)}$

D'après le critère de LAPLACE de croissance d'une bulle :  $P_{\text{in}} - P \geq \frac{2\gamma}{r}$

En posant  $\Delta P_b = P_{\text{in}b} - P_b$  on a le critère de formation d'une bulle :

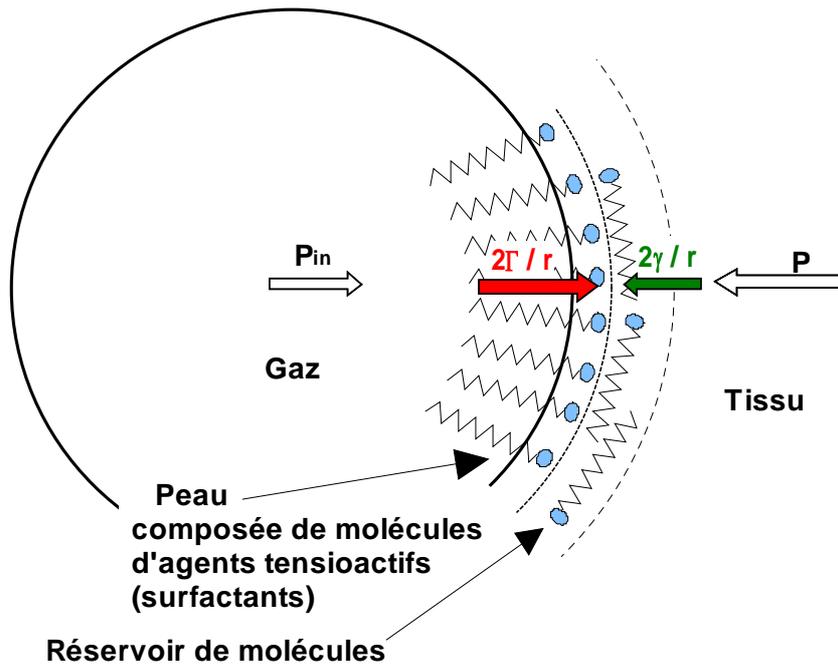
$$\Delta P_b \geq \frac{2\gamma \cdot (\gamma_c - \gamma)}{\gamma_c \cdot r_m}$$

On admet que ce critère se généralise au cas de la plongée bien que dans ce cas l'atmosphère ne contienne pas seulement du diazote.

**B. Application du VPM à la plongée sous-marine :**

1. Hypothèses et conséquences :

Schéma d'un noyau gazeux :



Soit un compartiment numéroté  $j$ .

- Hypothèse 1 : Pour déterminer la quantité de diazote dissous, on reprend l'équation de HALDANE (la différence principale entre le modèle de HALDANE et le VPM concerne la détermination du cas « critique » c'est à dire la sursaturation maximale que le corps humain peut tolérer). Dans ce calcul on tient compte de la présence de vapeur d'eau ( $P_{vapeur}$ ).

- Hypothèse 2 : Hypothèse de l'ordre des rayons des noyaux gazeux :

Soit deux noyaux gazeux (1) et (2) dont les rayons respectifs peuvent varier avec le temps  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$ , si à un instant  $t_d$  on a  $r_1(t_d) \geq r_2(t_d)$  alors :

A tout instant  $t$ , on a  $r_1(t) \geq r_2(t)$ .

- Hypothèse 3 : Les noyaux gazeux sont entourés de molécules de tensioactifs (surfactant) qui contre la tension superficielle (qui est à l'origine du terme  $\Gamma$  qui a pour des variations de pression à grande échelle la valeur maximale  $\gamma_c$ ).

Soit un noyau gazeux de rayon  $r_j(t)$  avec  $r_j(0) = r_{ini;j}$ . Les milieux dans lesquels évoluent les noyaux gazeux sont supposés isotropes (donc les noyaux gazeux sont sphériques).

Soit  $P_{in;j}(t)$ , la pression à l'intérieur de ce noyau gazeux.

**On définit la compression effective par :**  $\Delta_j(t) = \max\{P(ta) - P_{in;j}(ta); t \geq ta \geq 0\}$

**Les expériences indiquent que l'on a la relation :**

$$\Delta_j(t) = 2(\gamma_c - \gamma) \left( \frac{1}{r_j(t)} - \frac{1}{r_{ini;j}} \right)$$

Cette relation est très proche de la loi de LAPLACE pour les bulles.

- Hypothèse 4 : Les noyaux gazeux peuvent être perméables ou imperméables à la diffusion.

**Tant que la compression effective vérifie  $\Delta_j(t) < \Delta P_{imp}$  le noyau gazeux est perméable à la diffusion.**

Donc  $P_{in;j}(t) = T_{tissu j;N_2}(t) + P_{autres\ gaz}$  où  $P_{autres\ gaz}$  est une constante (empirique).

Dans les « autres gaz », il y a entre autres la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone. S'il existe un instant  $t_{imp;j}$  tel que  $\Delta_j(t_{imp;j}) = \Delta P_{imp}$ , alors pour tout  $t \geq t_{imp;j}$ , le noyau gazeux est imperméable à la diffusion. Il n'y a donc plus d'échanges de gaz entre l'intérieur et l'extérieur du noyau gazeux. Donc comme on suppose que la température est constante on peut appliquer la loi des gaz parfaits sous cette forme.

$$P_{in;j}(t) \cdot (r_j^{min}(t))^3 = P_{in;j}(t_{imp;j}) \cdot (r_j^{min}(t_{imp;j}))^3$$

$$\text{Donc } P(t) - P_{in;j}(t_{imp;j}) \cdot \left( \frac{r_j^{min}(t_{imp;j})}{r_j^{min}(t)} \right)^3 = 2(\gamma_c - \gamma) \left( \frac{1}{r_j^{min}(t)} - \frac{1}{r_{ini}^{min}} \right)$$

- Hypothèse 5 : Régénération des noyaux gazeux (important pour des durées de l'ordre de la journée) : A la suite d'une compression qui se termine à l'instant  $t_c$ , les noyaux reprennent lentement leur taille initiale (grâce à des processus aléatoires) en respectant la relation :

$$r_j(t) = r_j(t_c) + (r_{ini}^{min} - r_j(t_c)) \left( 1 - \exp\left(-\frac{t - t_c}{T_{régén}}\right) \right)$$

- Hypothèse 6 : On suppose que l'on a une répartition du nombre de noyaux en exponentielle décroissante du rayon (cette supposition est confirmée par des expériences sur la gélatine (mais pas sur le corps humain)). Le nombre noyaux de rayon supérieur ou égal à  $r_{ini;j}$  avant le début de la plongée est donné par :

$$N(r_{ini;j}) = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{\beta_0 S r_{ini;j}}{2kT}\right)$$

D'après l'hypothèse de l'ordre des rayons gazeux on a : Pour un instant  $t$  quelconque le nombre de noyaux gazeux de rayon supérieur ou égal à  $r_j(t)$  est égal à  $N(r_{ini;j})$  où  $r_{ini;j} = r_j(0)$ .

- Hypothèse 7 : Des considérations thermodynamiques (voir plus haut) donnent la condition de formation d'une bulle à partir d'un noyau gazeux de rayon  $r(t)$  :

$$P_{in}(t) - P(t) \geq \frac{2\gamma(\gamma_c - \gamma)}{\gamma_c r(t)}$$

- Hypothèse 8 : Pendant la remontée les noyaux sont supposés être perméables à la diffusion.
- Hypothèse 9 : Hypothèse du volume critique :

$$\text{Soit } \Delta P_{r;j}(t) = T_{tissu j;N_2}(t) + P_{autres\ gaz} - P(t).$$

**L'hypothèse du volume critique dit que l'on n'aura pas d'accident de décompression si, à tout instant t, on a :**

$$\int_0^t \max \left\{ \Delta P_{r,j}(t) \left( N(r_{ini;j}^{m\text{excit}}(t)) - N(r_{ini;j}^{\min}) \right) ; 0 \right\} dt \leq \alpha V_{\text{crit}}$$

Où  $r_j^{m\text{excit}}(t)$  est le rayon du plus petit noyau gazeux excité par la décompression (du début de la décompression jusqu'à l'instant t).

$N(r_{ini;j}^{\min})$  désigne le nombre maximal de bulles que le corps humain peut supporter indéfiniment.  $r_j^{\min}(t)$  désigne le rayon associé à  $N(r_{ini;j}^{\min})$ , à l'instant t.

On suppose que quelque soit j, on a :  $r_{ini;j}^{\min} = r_{ini}^{\min} = \frac{2(\gamma_c - \gamma)}{\beta_0}$ .

- Hypothèse 10 : Les modifications correspondant au VPM-B :

Ces modifications ne correspondent pas aux hypothèses initiales du VPM mais à un besoin d'augmenter la durée des paliers proches de la surface.

Durant la remontée, pendant et après le premier palier on suppose que les noyaux gazeux grossissent et la couche de molécules de surfactant devient inefficace.

Les noyaux sont aussi supposés imperméables à la diffusion.

Condition de formation d'une bulle à partir d'un noyau gazeux de rayon  $r(t)$  devient :

$$P_{in}(t) - P(t) \geq \frac{2\gamma}{r(t)}$$

Donc, au premier palier, commençant à l'instant  $t_{p1}$ , le rayon correspondant à

$$r_j^{m\text{excit}}(t_{p1}) \text{ devient : } r_j^{m\text{excit}}(t_{p1}) = \frac{2\gamma}{\Delta P_{r;j}^m(t_{p1})}.$$

Où  $\Delta P_{r;j}^m(t_{p1}) = \max \left\{ \Delta P_{r;j}(t_r) ; t_{p1} \geq t_r \geq 0 \right\}$  et  $\Delta P_{r;j}(t) = T_{\text{tissu } j; N_2}(t) + P_{\text{autres gaz}} - P(t)$ .

Pour les paliers suivants on utilise :  $P_{in;j}(t) = P(t) + \frac{2\gamma}{r_j(t)}$  et le fait que la bulle est imperméable à la diffusion.

Les valeurs des coefficients utilisés pour le VPM-B (dans le cas du logiciel de calcul de décompression HLPlanner) sont :

On utilise 16 compartiments dont les périodes sont (en minutes): 5 ; 8 ; 12.5 ; 18.5 ; 27 ; 38.3 ; 54.3 ; 77 ; 109 ; 146 ; 187 ; 239 ; 305 ; 390 ; 498 ; 635

$$P_{\text{vapeur}} = 4995 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{\text{imp}} = 8,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{autres gaz}} = 1,36 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$

$$\gamma = 0,0179 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\gamma_c = 0,257 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$r_{ini}^{\min} = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$T_{\text{régén}} = 20160 \text{ min} = 1209600 \text{ s}$$

$$\lambda = 199,6 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{min} = 3,326 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

La vitesse de remontée (jusqu'au premier palier et entre les paliers) est fixée à 10m/min.

2. Mise en œuvre du VPM-B pour les calculs de paliers :

**On considère une plongée  $t \in [0; t_{\text{fin plongée}}]$  (la phase de décompression est considérée comme ne faisant pas partie de la plongée).**

**Le but est de déterminer le rayon critique à la fin de la plongée.**

Calcul du rayon des noyaux gazeux dans le compartiment j :

On reprend l'équation de la charge des tissus du modèle de HALDANE :

$$\frac{dT_{\text{tissu } j; N_2}}{dt} = -k_j \times (T_{\text{tissu } j; N_2} - P_{N_2})$$

Soit P(t) la pression ambiante  $P_{N_2}(t) = f_{N_2} \cdot (P(t_i) - P_{\text{vapeur}})$ . Où  $f_{N_2}$  est la fraction molaire de diazote.

**Tant que le noyau gazeux est perméable c'est-à-dire  $\Delta_j(t) < \Delta P_{\text{imp}}$  :**

Soit  $\Delta_j(t)$  la compression effective à l'instant t.

$$\Delta_j(t) = \max \{ P(t_a) - T_{\text{tissu } j; N_2}(t_a) - P_{\text{autres gaz}} ; t \geq t_a \geq 0 \}$$

On va considérer que P(t) varie (on découpe la plongée en plusieurs segments) :

$$P(t) = c_i (t - t_i) + P_i \text{ pour } t_i \leq t \leq t_{i+1} \text{ ou } P(t_i) = P_i$$

$$\text{Avec } c_i \text{ une constante } c_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{t_{i+1} - t_i}$$

On a donc (résolution de l'équation sans second membre puis méthode de variation de la constante) : Pour  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$

$$T_{\text{tissu } j; N_2}(t) = f_{N_2} (P(t_i) - P_{\text{vapeur}}) + f_{N_2} c_i \left( t - \frac{1}{k_j} \right) - \left( f_{N_2} (P(t_i) - P_{\text{vapeur}}) - T_{\text{tissu } j; N_2}(t_i) - \frac{f_{N_2} c_i}{k_j} \right) \exp(-k_j(t - t_i))$$

$$\text{Soit } \Delta_j(t_i) = \max \{ P(t_a) - T_{\text{tissu } j; N_2}(t_a) ; t_i \geq t_a \geq 0 \}.$$

On constate que

$$\Delta_j(t_{i+1}) = \max \{ \Delta_j(t_i) ; P(t_{i+1}) - T_{\text{tissu } j; N_2}(t_{i+1}) - P_{\text{autres gaz}} \}$$

$$(\text{Si } c_{i+1} \leq 0, \Delta_j(t_{i+1}) = \Delta_j(t_i))$$

**Si, à un instant  $t_{\text{imp}; j}$  on a  $\Delta_j(t_{\text{imp}; j}) = \Delta P_{\text{imp}}$  :**

On a  $P_{\text{in}; j}(t_{\text{imp}; j})$  qui est connu.

$$\text{Soit } P_{\text{max}} = \max \{ P(t) ; t_{\text{imp}; j} \leq t \leq t_{\text{fin plongée}} \}$$

On résout une équation du 3<sup>ème</sup> ordre pour trouver  $r^{\min}(t_{\text{fin plongée}})$  :

$$P_{\max} - P_{\text{in};j}(t_{\text{imp};j}) \cdot \left( \frac{r^{\min}(t_{\text{imp};j})}{r^{\min}(t_{\text{fin plongée}})} \right)^3 = 2(\gamma_c - \gamma) \left( \frac{1}{r^{\min}(t_{\text{fin plongée}})} - \frac{1}{r_{\text{ini}}^{\min}} \right)$$

$$\text{Et on a } \Delta_j(t_{\text{fin plongée}}) = P_{\max} - P_{\text{in};j}(t_{\text{imp};j}) \cdot \left( \frac{r^{\min}(t_{\text{imp};j})}{r^{\min}(t_{\text{fin plongée}})} \right)^3$$

**Prise en compte de la régénération (éventuellement).**

A la fin de la plongée  $r^{\min}(t_{\text{fin plongée}})$  prend la valeur

$$r_j^{\min}(t_{\text{fin plongée}}) + (r_{\text{ini}}^{\min} - r_j^{\min}(t_{\text{fin plongée}})) \left( 1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{fin plongée}}}{\tau_{\text{régén}}}\right) \right)$$

$$\text{Puis } \Delta_j(t_{\text{fin plongée}}) \text{ prend la valeur } 2(\gamma_c - \gamma) \left( \frac{1}{r_j^{\min}(t_{\text{fin plongée}})} - \frac{1}{r_{\text{ini}}^{\min}} \right)$$

**Remontée**

**Calcul du volume :**

L'étape fondamentale consiste à calculer le gradient de pression maximum autorisé (ici, noté  $\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}}$  mais dans les documents de YOUNT cette quantité est notée  $P_{\text{ss}}^{\text{new}}$ ).

On suppose que durant la remontée :

$$P_{\text{in};j}(t) - P(t) \geq \frac{2\gamma(\gamma_c - \gamma)}{\gamma_c r_j^{\min}(t)}$$

(sinon le volume de bulle dégagé est nul)

$$\text{On note } \Delta P_{r;j}^{\text{ss min}} = \frac{2\gamma(\gamma_c - \gamma)}{\gamma_c r_j^{\min}(t)} = \frac{\gamma}{\gamma_c} \Delta_j(t) + \frac{2\gamma(\gamma_c - \gamma)}{\gamma_c r_{\text{ini};j}^{\min}}$$

On pose :

$$\Delta P_{r;j}^{\text{m}} = \max\{\Delta P_{r;j}(t_r); t \geq t_r \geq 0\}$$

$$\text{On a } \Delta P_{r;j}^{\text{m}}(t) = \frac{2\gamma(\gamma_c - \gamma)}{\gamma_c r_j^{\text{m excit}}(t)}$$

$$\text{Or } \Delta_j(t) = 2(\gamma_c - \gamma) \left( \frac{1}{r_j^{\text{m excit}}(t)} - \frac{1}{r_{\text{ini};j}^{\text{m excit}}(t)} \right)$$

$$\text{Donc } r_{\text{ini};j}^{\text{m excit}}(t) = \frac{2\gamma(\gamma_c - \gamma)}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^{\text{m}}(t) - \gamma \Delta_j(t)}$$

$$\int_0^t \Delta P_{r;j}(t) \left( N(r_{ini;j}^{m\text{ excit}}(t)) - N(r_{ini;j}^{\min}) \right) dt$$

$$N(r_{ini}) = N_0 \cdot e^{-\frac{\beta_0 S r_{ini}}{2kT}}$$

On suppose que  $r_{ini;j}^{m\text{ excit}}(t) \ll \frac{2kT}{\beta_0 S}$  et  $r_{ini}^{\min} \ll \frac{2kT}{\beta_0 S}$

$$N(r_{ini;j}^{m\text{ excit}}(t)) - N(r_{ini;j}^{\min}) \approx N_0 \frac{\beta_0 S r_{ini}^{\min}}{2kT} \left( 1 - \frac{r_{ini;j}^{m\text{ excit}}(t)}{r_{ini}^{\min}} \right)$$

$$N(r_{ini;j}^{m\text{ excit}}(t)) - N(r_{ini;j}^{\min}) \approx N_0 \frac{\beta_0 S r_{ini}^{\min}}{2kT} \gamma_c \left( \frac{\Delta P_{r;j}^m(t) - \Delta P_{r;j}^{ss\min}}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^m(t) - \gamma \Delta_j(t)} \right)$$

On rappelle que :  $r_{ini}^{\min} = \frac{2(\gamma_c - \gamma)}{\beta_0}$

$$\text{Donc : } N(r_{ini;j}^{m\text{ excit}}(t)) - N(r_{ini;j}^{\min}) \approx N_0 \frac{S(\gamma_c - \gamma)}{kT} \gamma_c \left( \frac{\Delta P_{r;j}^m(t) - \Delta P_r^{ss\min}}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^m(t) - \gamma \Delta_j(t)} \right)$$

$$\text{Soit } \lambda = \frac{\alpha \cdot V_{\text{crit}} \cdot \gamma_c \cdot k \cdot T}{\gamma \cdot N_0 \cdot S \cdot (\gamma_c - \gamma)}$$

$$\frac{\gamma_c^2}{\lambda \cdot \gamma} \int_0^t \Delta P_{r;j}(t) \cdot \left( \frac{\Delta P_{r;j}^m(t) - \Delta P_r^{ss\min}}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^m(t) - \gamma \Delta_j(t)} \right) dt \leq 1$$

C'est à dire :

$$\frac{\gamma_c^2}{\lambda \cdot \gamma} \int_0^{+\infty} \Delta P_{r;j}(t) \cdot \left( \frac{\Delta P_{r;j}^m(t) - \Delta P_r^{ss\min}}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^m(t) - \gamma \Delta_j(t)} \right) dt \leq 1$$

(L'intégrale converge bien car on a une décroissance exponentielle de  $\Delta P_{r;j}(t)$  après le retour en surface)

On rappelle que  $\Delta P_{r;j}(t) = T_{\text{tissu } j; N_2}(t) + P_{\text{autres gaz}} - P(t)$

On fait une majoration : On suppose que durant toute la décompression (jusqu'au retours en surface), le gradient,  $\Delta P_{r;j}(t)$ , est toujours égal au gradient maximum

permis pour une décompression sans accident (noté  $\Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}}$ ). C'est à dire que,

pendant la remontée :

$$\Delta P_{r;j}(t) = \Delta P_{r;j}^m(t) = \Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}}$$

On rappelle que il s'agit ici de calculer  $\Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}}$ .

L'inégalité devient alors une égalité :

$$\frac{\gamma_c^2}{\lambda \cdot \gamma} \left( \int_{t_{\text{fin plongée}}}^{t_{\text{surface}}} \Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}} \left( \frac{\Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}} - \Delta P_r^{ss\min}}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}} - \gamma \Delta_j(t)} \right) dt + \int_{t_{\text{surface}}}^{+\infty} \Delta P_{r;j}(t) \left( \frac{\Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}} - \Delta P_r^{ss\min}}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}} - \gamma \Delta_j(t)} \right) dt \right) = 1$$

Or, lors de la remontée, la compression effective des noyaux ne varie pas : Donc durant la décompression et après le retour en surface, on notera :  $\Delta_j(t) = \Delta_j$ .

On note  $t_{\text{deco}}$  le temps de la décompression. C'est à dire  $t_{\text{deco}} = t_{\text{surface}} - t_{\text{fin plongée}}$

D'où :

$$\frac{\gamma_c^2}{\lambda \cdot \gamma} \left( \frac{\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} - \Delta P_{r;j}^{\text{ss min}}}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} - \gamma \Delta_j} \right) \left( t_{\text{deco}} \cdot \Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} + \int_{t_{\text{surface}}}^{+\infty} \Delta P_{r;j}(t) dt \right) = 1$$

Après avoir fait surface, on fait une nouvelle majoration : On évalue  $\Delta P_{r;j}(t)$  en négligeant la présence des autres gaz et en supposant que l'air en surface ne contient que du diazote (ce qui est bien évidemment impossible dans la réalité). On a alors, après le retour en surface :

$$\Delta P_{r;j}(t) = \Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} \exp(-k_j(t - t_{\text{surface}}))$$

L'équation devient alors :

$$\frac{\gamma_c^2}{\lambda \cdot \gamma} \left( \frac{\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} - \Delta P_{r;j}^{\text{ss min}}}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} - \gamma \Delta_j} \right) \left( t_{\text{deco}} + \frac{1}{k_j} \right) \Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} = 1$$

$\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}}$  vérifie donc l'équation du second degré suivante :

$$\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}^2} - \Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} \left( \Delta P_{r;j}^{\text{ss min}} + \frac{\lambda \cdot \gamma}{\gamma_c \left( t_{\text{deco}} + \frac{1}{k_j} \right)} \right) + \frac{\lambda \cdot \gamma^2 \cdot \Delta_j}{\gamma_c^2 \left( t_{\text{deco}} + \frac{1}{k_j} \right)} = 0$$

On rappelle que :  $\Delta P_{r;j}^{\text{ss min}} = \frac{2\gamma(\gamma_c - \gamma)}{\gamma_c r_j^{\text{min}}(t)} = \frac{\gamma}{\gamma_c} \Delta_j(t) + \frac{2\gamma(\gamma_c - \gamma)}{\gamma_c r_{\text{ini};j}^{\text{min}}}$

Le discriminant de cette équation est positif (strictement). Cette équation a donc deux solutions. Or physiquement, on a :  $\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} \geq \Delta P_{r;j}^{\text{ss min}}$ . Cela nous permet d'éliminer une solution (celle qui a la plus petite valeur).

D'où :

$$\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} = \frac{\left( \Delta P_{r;j}^{\text{ss min}} + \frac{\lambda \cdot \gamma}{\gamma_c \left( t_{\text{deco}} + \frac{1}{k_j} \right)} \right) + \sqrt{\left( \Delta P_{r;j}^{\text{ss min}} + \frac{\lambda \cdot \gamma}{\gamma_c \left( t_{\text{deco}} + \frac{1}{k_j} \right)} \right)^2 - 4 \frac{\lambda \cdot \gamma^2 \cdot \Delta_j}{\gamma_c^2 \left( t_{\text{deco}} + \frac{1}{k_j} \right)}}{2}$$

On sait donc calculer  $\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}}$ . La connaissance de  $\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}}$  va nous permettre de calculer le profil de décompression (en utilisant les données de l'hypothèse 10, si on veut avoir un VPM-B) à effectuer et de connaître la durée de la décompression.

Il y a tout de même un problème : le calcul de  $\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}}$  nécessite de connaître la durée de la décompression ( $t_{\text{deco}}$ ).

Il y a plusieurs façon de résoudre le problème :

Première méthode :

Cette méthode est basée sur le fait que l'on recherche un profil de décompression sécuritaire dont la durée est minimale.

- 1) Calculer durant la plongée la saturation des tissus et la compression des noyaux gazeux. Puis, éventuellement, calculer la régénération des noyaux gazeux.
- 2) Remonter jusqu'à que l'un des compartiments ait un gradient de sursaturation égal ou à peine inférieur à  $\Delta P_{r;j}^{ss\min}$ .
- 3) Définir une variable locale appelée « temps\_total\_palier » et l'initialiser à 0 minute.
- 4) Tant que trouvé\_profil\_décompression = faux, faire :  
(La question est : Peut-on remonter sans risque d'accident de décompression avec un temps total de paliers égal à « temps\_total\_palier » ?)

4.a) Calculer  $\Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}}$  en prenant :

$$t_{\text{deco}} = \text{temps\_total\_palier} + \frac{\text{Profondeur à la fin de la plongée}}{\text{vitesse de remontée}}.$$

4.b) Déterminer le premier palier et sa durée.

4.c) Déterminer les autres paliers de décompression les durées de chaque palier (éventuellement en utilisant les modifications du VPM B : Hypothèse 10).

Si le temps total de paliers dépasse « temps\_total\_palier »

Alors on remplace « temps\_total\_palier » par « temps\_total\_palier » + 1 minute (et on recommence à partir du 4.a)).

Sinon (On a alors le profil de décompression de plus courte durée), trouvé\_profil\_décompression prend la valeur vraie.

Fin de la boucle.

Cette méthode est celle qui a été utilisée dans la programmation du VPM-B donnée dans l'annexe 2. Mais cette méthode nécessite beaucoup de calculs (complexité élevée). C'est pourquoi une autre méthode a été utilisée dans les programmes de YOUNT, BAKER et MAIKEN :

Seconde méthode :

Cette méthode ne recherche pas un profil de décompression fiable de durée minimale mais cherche à s'en approcher : elle utilise la notion de « schéma convergeant » (« converging schedule » dans les documents de YOUNT BAKER et MAIKEN).

- 1) Calculer durant la plongée la saturation des tissus et la compression des noyaux gazeux. Puis, éventuellement, calculer la régénération des noyaux gazeux.
- 2) Monter jusqu'à que les compartiments deviennent sursaturés.
- 3) Calculer  $\Delta P_{r;j}^{ss\min}$  et trouver un profil de décompression en utilisant  $\Delta P_{r;j}^{ss\min}$  comme gradient maximal. Soit  $t_D$  la durée de ce profil de décompression.
- 4) Tant que l'on a pas un « profil de décompression correct » faire :
  - 4.a) Calculer  $\Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}}$  en prenant  $t_{\text{deco}} = t_D$ .
  - 4.b) Calculer un nouveau profil de décompression en utilisant  $\Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}}$  comme gradient maximal (On constate que sa durée (notée  $t_{D1}$ ) est inférieure à  $t_D$ ).
  - 4.c) Pour chaque compartiment, calculer le « Phase\_volume\_time<sub>j</sub> » :

$$\text{Phase\_volume\_time}_j = t_{D1} + \frac{\int_{t_{\text{surface}}}^{+\infty} (T_{\text{tissu } j; N_2}(t_{\text{surface}}) - P_{N_2 \text{ surface}}) \exp\left(-\frac{t - t_{\text{surface}}}{k_j}\right) dt}{T_{\text{tissu } j; N_2}(t_{\text{surface}}) - P_{N_2 \text{ surface}}}$$

On remarque que  $\frac{\alpha \cdot \gamma_c^2}{\lambda \cdot \gamma} \left( \frac{\Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} - \Delta P_{r;j}^{\text{ss min}}}{\gamma_c \Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} - \gamma \Delta_j(t)} \right) \Delta P_{r;j}^{\text{m permis}} \times \text{Phase\_volume\_time}_j$

est une approximation du volume de bulles dégagées lors de la décompression (cette expression utilise les majorations concernant  $\Delta P_{r;j}(t)$  après le retour en surface).  $P_{N_2 \text{ surface}}$  désigne la pression partielle de diazote à la surface.

4.d) Si pour chaque compartiment, la différence de « Phase\_volume\_time<sub>j</sub> » entre le profil de décompression calculé dans ce passage dans la boucle (de durée  $t_{D1}$ ) et celui calculé précédemment (de durée  $t_D$ ) est inférieur à 1 minute :

Alors on a un « profil de décompression correct » (faire d'autres itérations dans la boucle va augmenter le temps de calcul sans beaucoup changer les résultats).

Sinon  $t_D$  prend la valeur  $t_{D1}$  et on recommence à partir du 4.a).

Fin de la boucle.

Dans cette méthode, l'utilisation de l'expression « schéma convergeant » vient du fait que les profils de décompression calculés lors des différents passages dans la boucle se rapprochent du profil de décompression sécuritaire le plus rapide.

Ces deux méthodes ne sont pas équivalentes : la première cherche directement un temps de décompression (sécuritaire) minimal tandis que la seconde calcule une série de profils de décompression dont la durée s'approche de la durée minimale de décompression (sécuritaire). Les résultats renvoyés par ces deux méthodes sont donc différents (pour un même jeu de coefficients).

La remarque faite dans la partie concernant la mise en œuvre du modèle de HALDANE pour le calcul de paliers (III.B) s'applique ici.

Pour renvoyer des résultats corrects (profils de décompression sécuritaires sans être trop longs), il faut adapter les coefficients à la méthode de calcul choisie.

## V. Comparaison des modèles :

Deux programmes ont été créés :

- Le programme « Haldane MN 90 » qui utilise les coefficients des tables MN 90 (voir annexe 1).
- Le programme « VPM-B avec coefficients ajustés » (voir annexe 2). Comme le mode de programmation est différent de celui qui est habituellement utilisé (dans les programmes de BAKER), il a fallu ajuster les valeurs des coefficients  $\gamma_c$ ,  $r_{ini}^{min}$  et  $\lambda$ . Ces coefficients ont été ajustés de manière à ce que la courbe de sécurité (temps sans palier à faire, selon la profondeur) ressemble à celle des tables MT 92.

$$\gamma_c = 0,34 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$r_{ini}^{min} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\lambda = 151,9875 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{min}$$

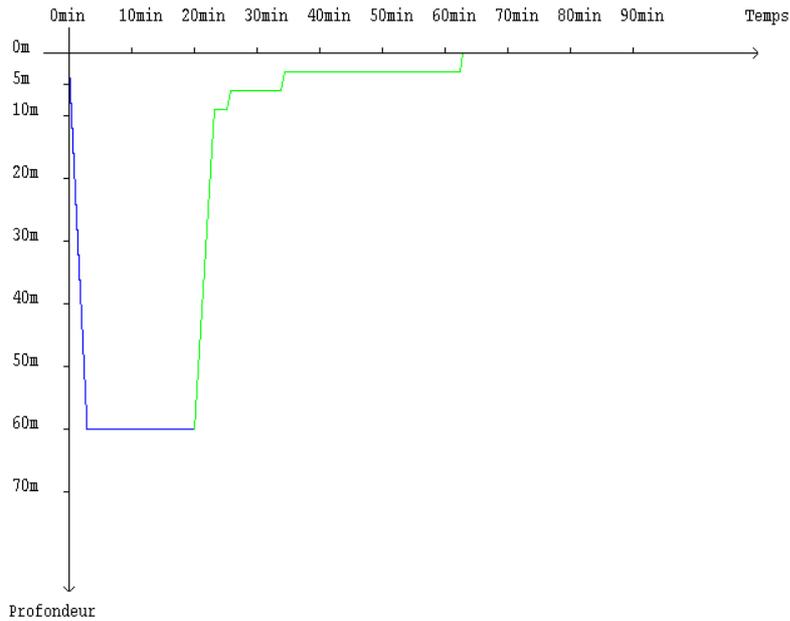
### A. Comparaison des profils :

Le modèle de Haldane positionne les paliers très proches de la surface.

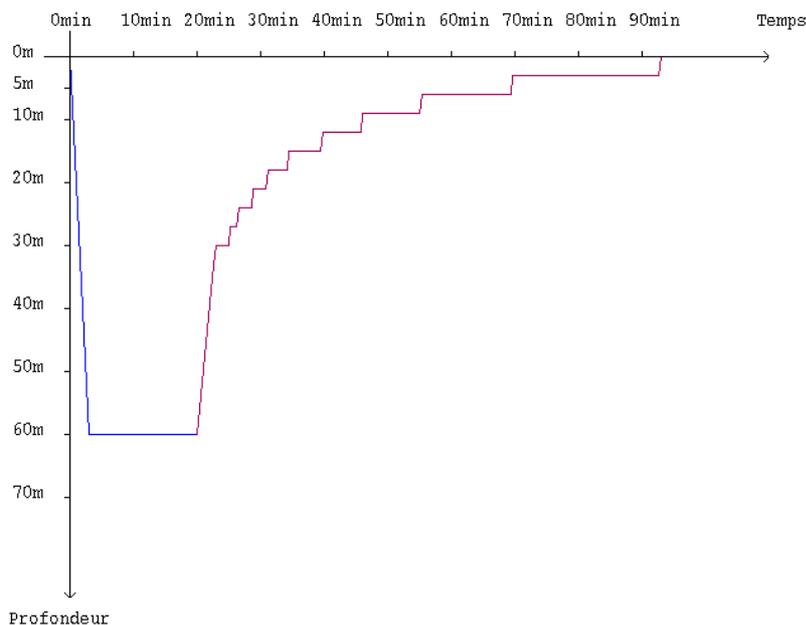
Avec une descente quasi instantanée, le profil est quasi identique à celui donné par les tables MN 90 :



Avec une vitesse de descente de 20 m/min :



Le VPM-B introduit des paliers profonds (premier palier à 30m) et des temps de paliers plus longs pour les plongées profondes.



### ***B. Comparaison avec des tables de plongées existantes :***

Il s'agit ici de valider les algorithmes mis en place et de comparer les résultats renvoyés avec d'autres tables de bonne qualité.

On utilise :

- Les tables MN 90 de la marine nationale française (voir annexe 3).
- Les tables MT 92 du ministère du travail français.
- Les tables canadiennes du DCIEM du Defense and Civil Institute of Environmental Medicine (ces dernières tables sont réputées pour avoir été

testées massivement avec écho doppler et être plus strictes que la plupart des tables existantes, elles ont aussi la particularité de limiter la vitesse de descente à 18 m/min).

- Les tables US NAVY 93 de la United States Navy (converties en mètres).
- Le logiciel de calcul de décompression HLPlanner basé sur le VPM-B (ses coefficients sont les moins sévères utilisés avec ce modèle).

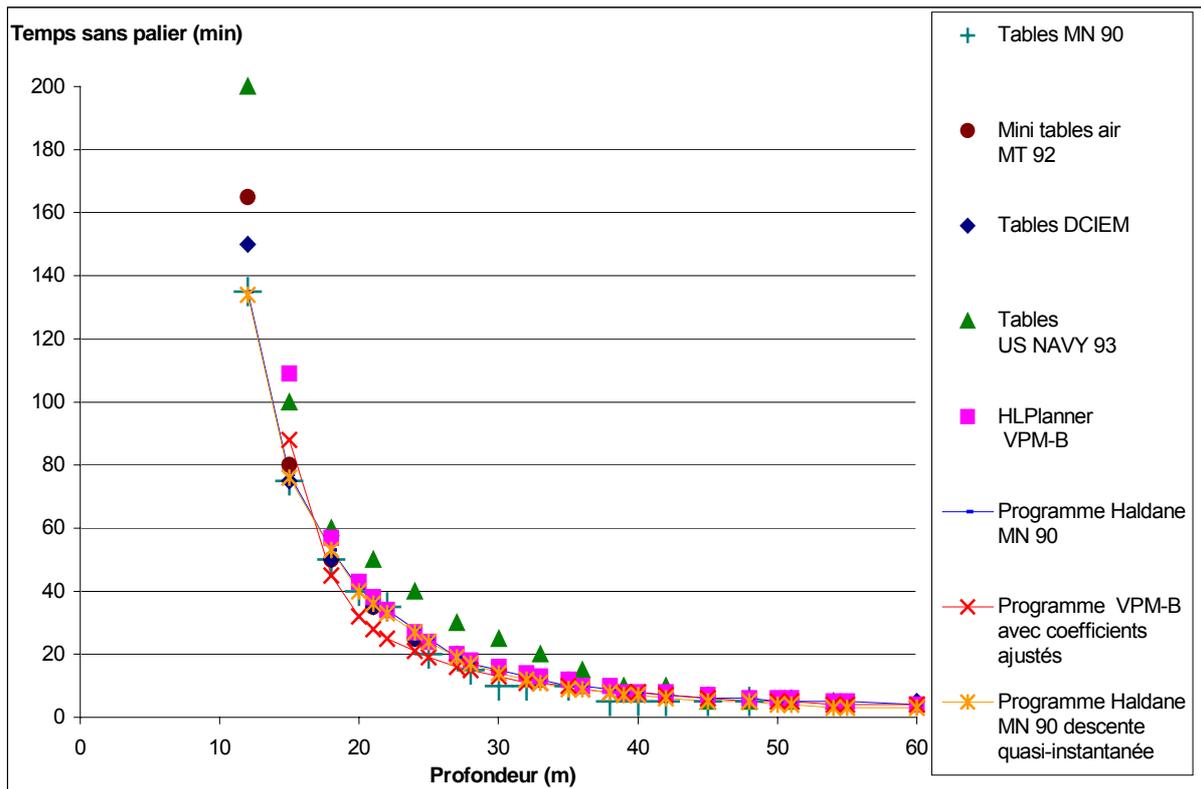
Ces quatre tables sont utilisées à l'heure actuelle et le logiciel HLPlanner est utilisé par certains plongeurs techniques.

Ces tables ont toutes des vitesses de remontées différentes :

- Tables MN 90 : jusqu'au premier palier 15 à 17 m / min, puis à partir du premier palier 6 m / min.
- Tables MT 92 : 9 à 15 m/min.
- Tables DCIEM : 18 m /min.
- Tables US Navy 93 : 9 m/min.
- Logiciel HLPlanner : 10 m/min.
- Programme « Haldane MN 90 » : idem tables MN 90.
- Programme « VPM-B avec coefficients ajustés » : 10 m/min.

Les tables de décompression utilisées ici sont considérées comme fiables, car elles sont utilisées sur le terrain avec un taux d'accident acceptable. Donc un modèle traitant efficacement l'accident de décompression doit (éventuellement, en ajustant certains de ces coefficients) rendre des résultats proches. Si on va jusqu'au bout, cela suppose que tous les profils de décompression fiables sont similaires à ceux rendus par ces tables (conclusion : la recherche de nouveaux modèles est quasiment inutile !). C'est cette vision extrême que le VPM, le RGBM et les autres modèles à paliers profonds contestent car les toutes tables présentées ici (MN 90, MT 92, US NAVY 93, DCIEM) ont des paliers « peu » profonds. Néanmoins, les paliers profonds ne doivent vraisemblablement pas influencer sur la courbe de sécurité (contrairement à la vitesse de remontée). De plus, lors de l'élaboration de tables de décompression (notamment les MN 90), les spécialistes s'intéressent de près aux courbes de sécurité. Donc la comparaison des courbes de sécurité apporte des informations intéressantes. Ensuite, la comparaison des durées totales de décompression peut aider à avoir des informations sur la sévérité du modèle et fournir une idée du « coût » d'une décompression effectuée avec un modèle donné.

Comparaison des courbes de sécurité :

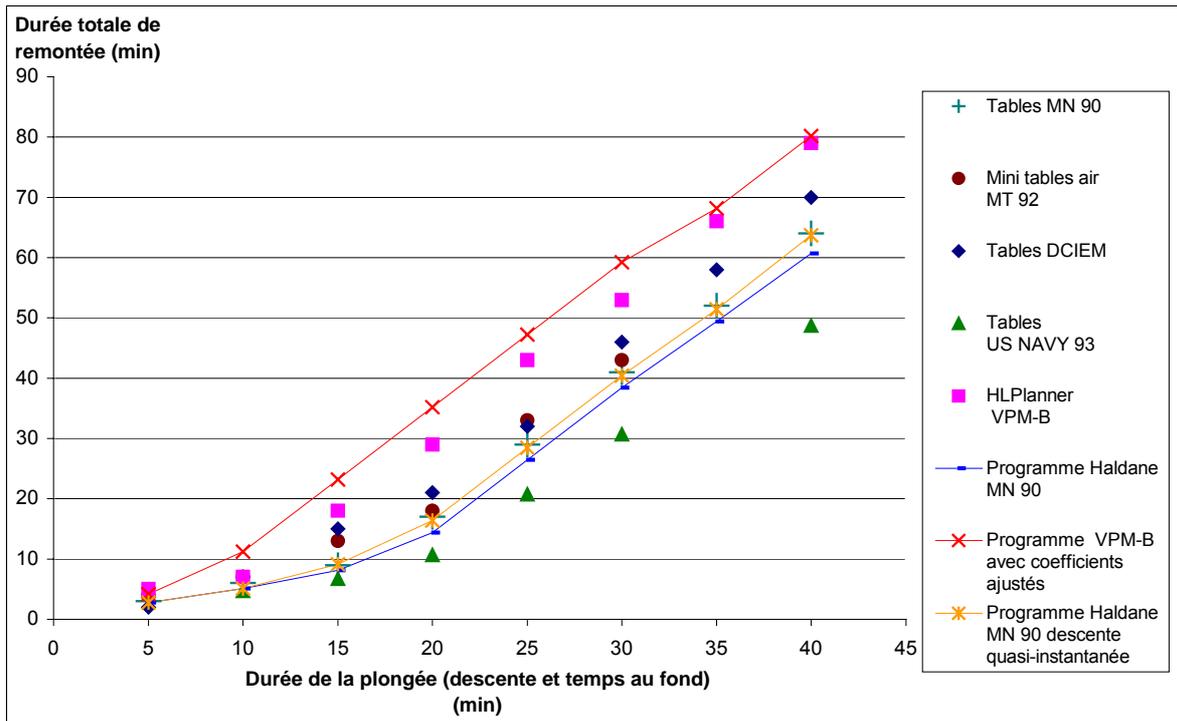


Les trois premières tables ont des courbes de sécurité quasiment identiques. Le VPM-B a des temps sans décompression très longs pour les faibles profondeurs. Pour 12 m de profondeur, le programme « VPM-B avec coefficients ajustés » donne un temps sans palier de 389 min et pour le logiciel HLPlanner ce temps est de 361 min.

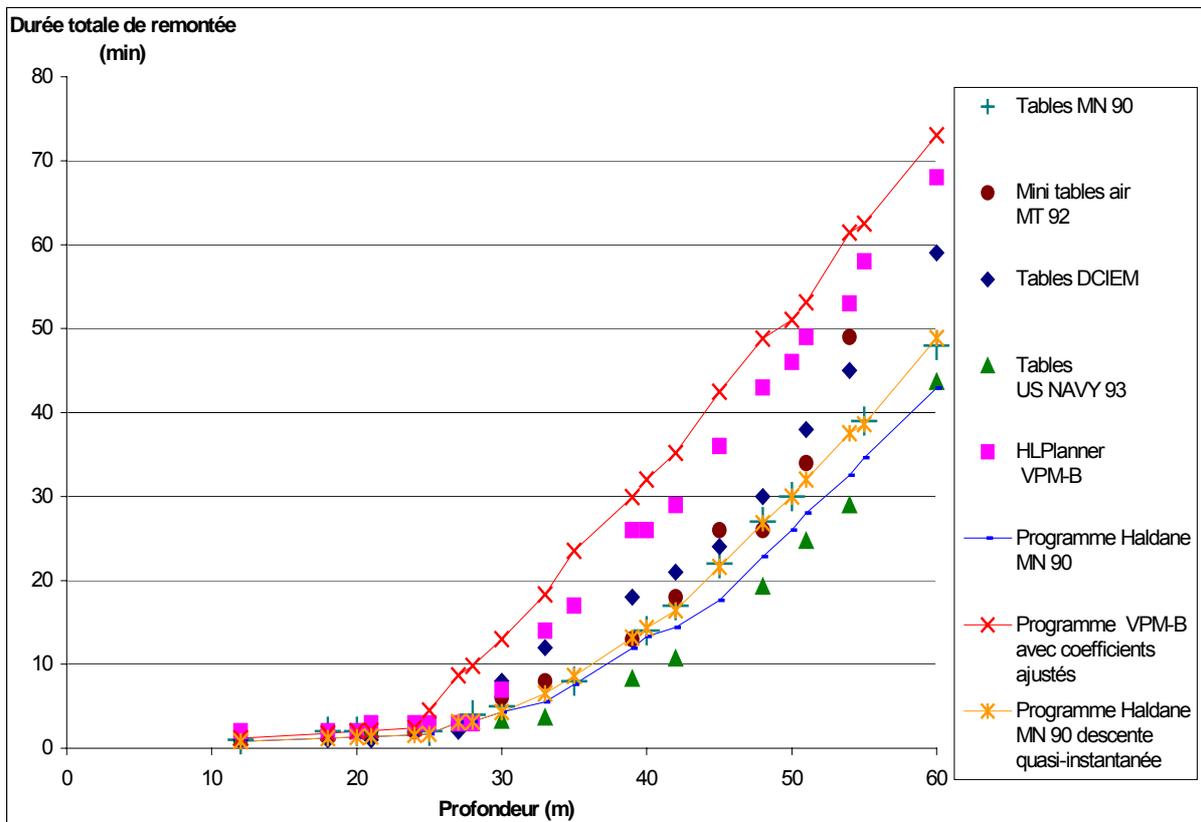
Le programme « VPM-B avec coefficients ajustés » a des temps sans palier assez court dans la zone de profondeur de 20 à 30 m.

On fait varier le temps de la plongée :

On considère une plongée à 42 m de profondeur avec une vitesse de descente à 20 m/min (On considère que la descente fait partie de la plongée).



On fait maintenant varier la profondeur de la plongée :  
 On considère une plongée de 20 min (durée de la descente, effectuée à 20m/min, comprise) :



Conclusion : Le programme « Haldane MN 90 » réussit bien à imiter les tables MN90.

Le programme « VPM-B avec coefficients ajustés » est très sévère pour ces plongées mais pas très éloigné du logiciel HLPanner dont les coefficients utilisés le rendent moins sévère que ces homologues.

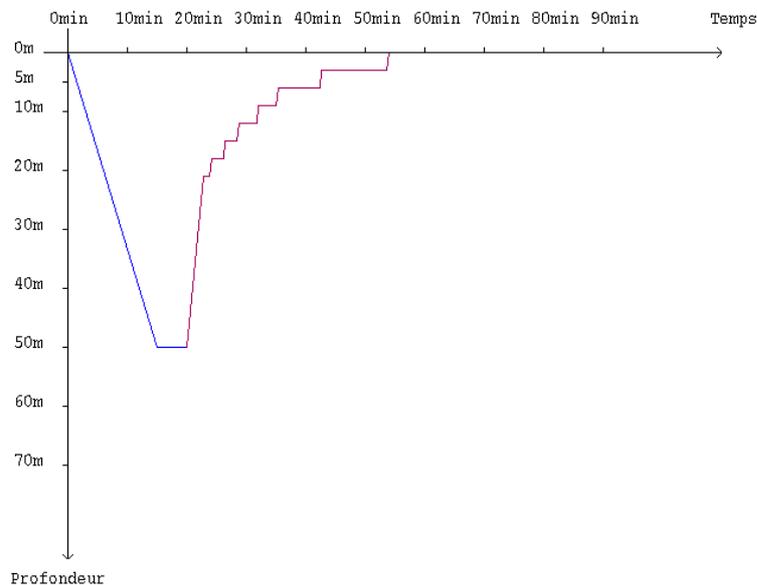
Le VPM-B est très sévère pour les plongées profondes mais pour les plongées peu profondes (moins de 15m de profondeur), les temps sans avoir de palier à effectuer sont très longs.

### **C. Comparaison des comportements sur des profils à risques :**

La plongée à profil inversé : C'est une plongée dont la profondeur maximale est atteinte en fin de plongée.

Pour le modèle de Haldane : Moins de paliers car les tissus sont moins saturés.

Pour le VPM-B : Deux tendances contradictoires, les tissus sont moins saturés (diminution des paliers) mais les noyaux sont moins compressés (augmentation des paliers).



Temps total de décompression : 34 min

Sinon (en comprimant les noyaux comme si on avait une descente instantanée) : 28 min de temps total de décompression.

La plongée « yoyo » : C'est une plongée pendant laquelle le plongeur monte et descend de plusieurs mètres à plusieurs reprises. On peut aussi considérer le cas des plongées consécutives : deux plongées séparées par un intervalle de temps faible (moins de 15 min). Ces deux plongées étant tellement proches que l'on peut considérer qu'elles n'en forment qu'une seule.

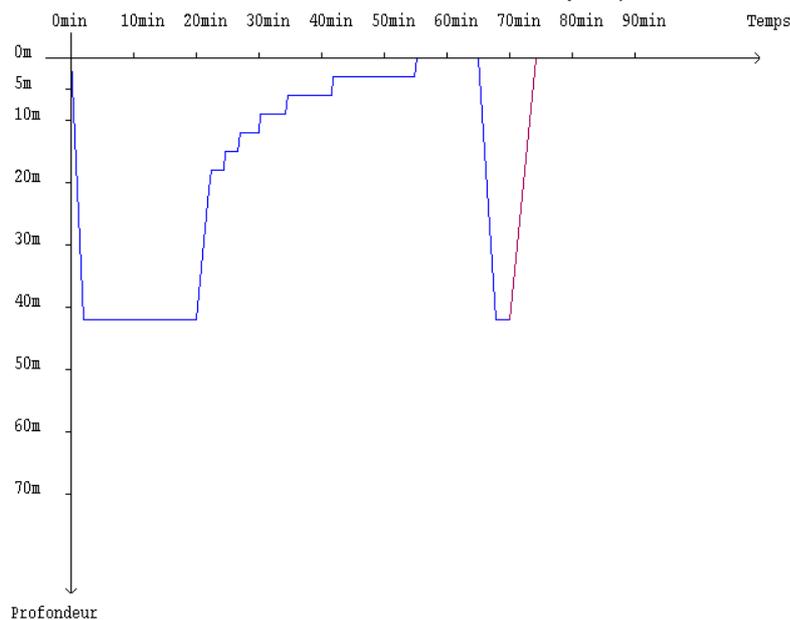
Ni le modèle de HALDANE ni le modèle VPM-B ne sont adaptés à ce type de profils car le fait de ne pas rester à la profondeur maximale tout au long de la plongée permet de diminuer la saturation des tissus (sans forcément diminuer la réduction des noyaux gazeux).

Toutefois, dans le programme « VPM-B avec coefficients ajustés » il a été tenu compte du volume de bulles éventuellement dégagé durant la phase plongée. Le

principe consiste à évaluer directement l'intégrale du volume critique pendant la plongée (sans majoration) puis de calculer ensuite la décompression selon la méthode habituelle (en utilisant  $\Delta P_{r;j}^{m,permis}$  et les majorations que cela implique, mais en tenant compte d'un éventuel volume de bulles présent dès le début de la décompression).

Mais cette fonction n'est pas du tout efficace :

Exemple : Si on considère une plongée à 42 m durant 20 min (temps de la descente à la vitesse de 20 m/min compris) suivie de la décompression indiquée par le programme « VPM-B avec coefficients ajustés » puis, 10 min après, une nouvelle descente à 42 m (« pour aller chercher l'ancre ») pendant 5 min (temps de la descente à la vitesse de 15 m/min compris).



Le logiciel HIPlanner donne un résultat similaire (une décompression un peu plus courte suite à la première descente et pas de palier de décompression pour la deuxième descente).

L'absence de palier après la seconde descente est à priori dangereuse. L'utilisation de la procédure de majoration des tables MN 90 (considérée comme adaptée) donne une durée totale de décompression après la seconde descente de 29 min et pour les tables US Navy 93 de 30,7 min.

L'hypothèse du volume critique paraît pourtant être une méthode intéressante pour traiter le cas de la plongée yoyo : le volume de bulles accumulé dans le corps humain durant les yoyos devrait rendre la décompression finale plus sévère. Il semble que l'inefficacité des algorithmes actuels du VPM et VPM-B face à ce type de plongée est due au fait que même si on cherche à évaluer le volume de bulles dégagé durant la plongée (grâce à une évaluation directe de l'intégrale), les coefficients, non adaptés à cette évaluation sans majoration, minimisent les effets des yoyos. On rappelle que les coefficients ont été choisis afin que les programmes rendent des résultats corrects dans le cas de plongées sans yoyos et surtout avec un grand nombre de majorations. Une solution pourrait être de calculer les profils de décompression en effectuant le moins de majoration possible (recherche d'un profil

de décompression minimale, évaluation directe (c'est à dire sans majoration) de l'intégrale du volume de bulles (donc sans utiliser  $\Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}}$ ...). Néanmoins, cette solution impliquerait de très longs calculs pour un ordinateur et reste encore à essayer.

## **VI. Conclusion :**

Un bon choix des coefficients permet au modèle de HALDANE d'être adapté à la plupart des situations.

Le VPM-B est beaucoup plus proche de la réalité physique et physiologique de la décompression que le modèle de HALDANE. Pourtant l'utilisation sur des plongées peu profondes ou des plongées consécutives semble dangereuse.

Mais ces deux situations sont rares chez les utilisateurs du VPM-B qui sont pour la plupart des plongeurs techniques effectuant des plongées profondes séparées par un intervalle en surface long (plusieurs heures ou une journée).

On met aussi l'accent sur le fait que pour renvoyer des résultats corrects, il faut adapter un certain nombre de coefficients (ceux qui ne peuvent être évalués par des mesures directes) au modèle et à la méthode de calculs des paliers. La nécessité de choisir ainsi ces coefficients montre que tous les modèles actuels ont une part de « bricolage » (dans le sens que l'on adapte ces coefficients « pour que ça marche » et non pour représenter la réalité physiologique du phénomène). Le choix de ces coefficients peut être affiné en utilisant une base de données des accidents et des outils statistiques (tels que le maximum de vraisemblance) mais cela n'est pas présenté dans ce document.

Le problème de la décompression en plongée sous-marine est maîtrisé dans la plupart des cas, même si aucun modèle ne peut supprimer totalement le risque d'accident de décompression.

## VII. Annexes :

### A. Annexe 1 : La programmation du modèle de HALDANE :

Voici le programme que j'ai créé pour imiter le tables MN 90. Le langage utilisé est le CAML aussi appelé CAML Light (c'est un langage surtout utilisé dans l'enseignement). Vous pouvez télécharger gratuitement le logiciel permettant de compiler et d'utiliser les programmes en CAML sur le site de l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique). Les temps de paliers renvoyés par ce programme sont proches des tables MN 90 (à quelques minutes près), les différences proviennent probablement d'un calcul de la pression ambiante en fonction de la profondeur assez grossier. Je prends tout de même quelques précautions : j'estime que, malgré toutes mes précautions, les vérifications sur ce programme ne sont pas assez poussées pour utiliser ce programme en situation réelle (autrement dit, si vous avez un accident en plongée à cause de mon programme, ce n'est pas ma faute !). De plus, pour les plongées à l'air, les tables ou les ordinateurs de décompression sont bien plus pratiques.

```
(*Calcul de la charge des tissus : *)
#open "graphics";;
open_graph"";

let segment (ax,ay) (bx,by) =
begin
moveto (int_of_float ax) (int_of_float ay);
lineto (int_of_float bx) (int_of_float by);
end;;

let quant_haldane_mn90_2 = fun l ->
(* l est une liste de couples (instant de la plongée, profondeur) initialisé à (0.,0.)*)
let periode = [| 5.; 7.; 10.; 15.; 20.; 30.; 40.; 50.; 60.; 80.; 100.; 120. |] and
coef_sc = [| 2.72; 2.54; 2.38; 2.2; 2.; 1.82; 1.68; 1.61; 1.58; 1.56; 1.55; 1.54 |] and
vitesse_remontée = 15. in
begin
let lc = ref(tl(l)) and precedent = ref(hd(l)) and quant = (make_vect (vect_length periode) (0.8 *. ((snd( hd(l)) / . 10.) +. 1.)))
and time = ref 0. and t_elt = 1. /. 120. and erreur_deco = ref false and erreur = (make_vect 1 0.) in begin
set_color(rgb 0 0 255);
while !lc <> [] do
time := fst !precedent;
let p = ref (snd !precedent) in
while !time < fst(hd(!lc)) do
let p1 = ((snd(hd(!lc)) - snd(!precedent)) /. (fst(hd(!lc)) - fst(!precedent)) *. t_elt +. !p) in
let p2 = (if !p > p1 then !p else p1;) in begin
for k = 0 to (vect_length quant - 1) do
quant.(k) <- quant.(k) +. (0.8 *. ((p2 /. 10.) +. 1.) - quant.(k)) *. (1. -. (0.5) **. (t_elt /. periode.(k)));
done;
(*les coefficients de sursaturation critique sont-ils dépassés ?*)
let cont = ref true and j = ref 0 in
if (0. -. (snd(hd(!lc)) - snd(!precedent)) /. (fst(hd(!lc)) - fst(!precedent))) > vitesse_remontée then
begin erreur_deco := true;
erreur.(0) <- erreur.(0) -. 1.;
set_color(rgb 255 0 0);
end
else
```

```

while !cont do
  if !j > ((vect_length quant) - 1) then cont := false
    else if (quant.(!j) / ((p1 / 10.) + 1.)) >= coef_sc.(!j)
      then
        begin erreur_deco := true;
          cont := false;
          erreur.(0) <- erreur.(0) - 1.;
          set_color(rgb 255 0 0);
        end
      else
        begin set_color(rgb 0 0 255);
          j := !j + 1;
        end;
    end;
done;
segment (50. +. !time * . 5.,550. -. (lp * . 5.)) (50. +. (!time +. t_elt) * . 5.,550. -. (p1 * . 5.));
p := p1;
time := !time +. t_elt;
end;
done;
precedent := hd(!lc);
lc := tl(!lc);
done;
(quant,erreur,!precedent);
end;
end;;

(*Calcul de la remontée à effectuer et des paliers : *)

let palier_mn90_2 quant (tf,pf) =
  (* (tf,pf) désigne la dernière case du tableau t de quant_haldane_mn90 *)
  let periode = [| 5.; 7.; 10.; 15.; 20.; 30.; 40.; 50.; 60.; 80.; 100.; 120. |] and
  coef_sc = [| 2.72 ; 2.54 ; 2.38 ; 2.2 ; 2. ; 1.82 ; 1.68 ; 1.61 ; 1.58 ; 1.56 ; 1.55 ; 1.54 |]
  and vitesse_remontée = 15. and vitesse_palier = 6. and t_elt = 1. / 60. and t_elt_palier = 1. in
  let p = ref pf and temps = ref tf and vitesse = ref vitesse_remontée and plafond_test = ref
  (floor(pf / 3.) * 3.) and
  taille_quant = (vect_length quant) and temps_palier = ref 0. and profil_deco = ref [(tf,pf)] in begin
  while !p > 0. do
    (*si on remonte de 3 m *)
    let p_c = ref !p and t_c = ref !temps and quant_c = (make_vect (vect_length periode) 0.) and rester_au_fond = ref false
  in begin
    for k = 0 to (taille_quant - 1) do
      quant_c.(k) <- quant.(k) ;
    done ;
    while ((!p_c > !plafond_test) && (!rester_au_fond = false)) do
      for k = 0 to (taille_quant - 1) do
        quant_c.(k) <- quant_c.(k) +. (0.8 * ((!p_c / 10.) + 1.) -. quant_c.(k)) * (1. -. (0.5) **. (t_elt / periode.(k)));
      done;
      p_c := !p_c -. t_elt * . !vitesse;
      t_c := !t_c +. t_elt;
    (*les coefficients de sursaturation critique sont-ils dépassés ?*)
    let cont = ref true and j = ref 0 in
    while !cont do
      if !j > (taille_quant - 1) then cont := false
        else if (quant_c.(!j) / (!plafond_test / 10.) + 1.) >= coef_sc.(!j)
          then
            begin rester_au_fond := true;
              cont := false;
            end
          else
            j := !j + 1;
        end;
    done;
  end;
end;

```

```

done;
(* Ce qu'il faut faire selon les cas : *)
if !rester_au_fond then
  begin
    if !temps_palier = 0. then profil_deco := !profil_deco @ [!temps,!p];
    vitesse := vitesse_palier;
    temps := !temps +. t_elt_palier;
    for k = 0 to (taille_quant - 1) do
      quant.(k) <- quant.(k) +. (0.8 *. ((!p /. 10.) +. 1.) -. quant.(k)) *. (1. -. (0.5) **. (t_elt_palier /. periode.(k)));
    done;
    temps_palier := !temps_palier +. t_elt_palier;
  end
else
  begin
    if !temps_palier <> 0. then
      begin
        profil_deco := !profil_deco @ [!temps,!p];
        print_string(" palier à ");
        print_float(!p);
        print_string(" m pendant ");
        print_float(!temps_palier);
        print_string(" min ");
        print_newline();
        temps_palier := 0.;
      end;
    p := !plafond_test;
    temps := !t_c;
    for i = 0 to (taille_quant - 1) do
      quant.(i) <- quant_c.(i);
    done;
    plafond_test := !plafond_test - 3.;
  end;
end;
done;
print_string("fin de la plongée"); print_newline();
profil_deco := !profil_deco @ [!temps,0.];
!profil_deco;
end;;

```

(\*Le programme final appelé « HALDANE MN 90 » \*)

```

let HALDANE_MN_90 l =
  begin
    clear_graph ();
    let (quant , erreur , fin_explo) = (quant_haldane_mn90_2 l) in
      let profil_deco = (palier_mn90_2 quant fin_explo) in
        let profil_deco_c = ref (tl(profil_deco)) and s = ref (hd(profil_deco)) in begin
          set_color(black) ;
          segment (30.,550.) (600.,550.) ; segment (596.,546.) (600.,550.) ; segment (596.,554.) (600.,550.) ;
          moveto 5 545 ; draw_string «0m» ; segment (46.,550.) (50.,550.) ;
          moveto 5 520 ; draw_string «5m» ; segment (46.,525.) (50.,525.) ;
          moveto 5 495 ; draw_string «10m» ; segment (46.,500.) (50.,500.) ;
          moveto 5 445 ; draw_string «20m» ; segment (46.,450.) (50.,450.) ;
          moveto 5 395 ; draw_string «30m» ; segment (46.,400.) (50.,400.) ;
          moveto 5 345 ; draw_string «40m» ; segment (46.,350.) (50.,350.) ;
          moveto 5 295 ; draw_string «50m» ; segment (46.,300.) (50.,300.) ;
          moveto 5 245 ; draw_string «60m» ; segment (46.,250.) (50.,250.) ;
          moveto 5 195 ; draw_string «70m» ; segment (46.,200.) (50.,200.) ;
          moveto 2 95 ; draw_string «Profondeur» ;
          segment (50.,570.) (50.,120.) ; segment (46.,124.) (50.,120.) ; segment (54.,124.) (50.,120.) ;
          moveto 35 570 ; draw_string «0min» ; segment (50.,554.) (50.,550.) ;

```

```

moveto 90 570 ; draw_string «10min» ; segment (100.,554.) (100.,550.) ;
moveto 140 570 ; draw_string «20min» ; segment (150.,554.) (150.,550.) ;
moveto 190 570 ; draw_string «30min» ; segment (200.,554.) (200.,550.) ;
moveto 240 570 ; draw_string «40min» ; segment (250.,554.) (250.,550.) ;
moveto 290 570 ; draw_string «50min» ; segment (300.,554.) (300.,550.) ;
moveto 340 570 ; draw_string «60min» ; segment (350.,554.) (350.,550.) ;
moveto 390 570 ; draw_string «70min» ; segment (400.,554.) (400.,550.) ;
moveto 440 570 ; draw_string «80min» ; segment (450.,554.) (450.,550.) ;
moveto 490 570 ; draw_string «90min» ; segment (500.,554.) (500.,550.) ;
moveto 590 570 ; draw_string «Temps» ;
set_color(rgb 0 255 0);
while !profil_deco_c <>[] do
  let (t,p) = hd (!profil_deco_c) in begin
    segment (50. +. fst(ls) *. 5.,550. -. (snd(ls) *. 5.)) (50. +. t *. 5. ,550. -. (p *. 5.));
    s:=(t,p);
    profil_deco_c := tl(!profil_deco_c);
  end;
done;
(l@profil_deco , erreur);
end;
end ;;

```

### **B. Annexe 2 : Programmation du VPM-B avec les coefficients ajustés :**

Voici le programme que j'ai créé qui utilise le VPM-B. Le langage utilisé est encore le CAML, aussi appelé CAML Light. Le mode de programmation étant différent de celui des programmes originaux (ceux de BAKER), il a fallu créer un programme (non présenté, ici) permettant d'ajuster les coefficients  $\gamma_c$ ,  $r_{ini}^{min}$  et  $\lambda$  de manière à avoir des résultats corrects. Le critère utilisé était basé sur la courbe de sécurité des tables de décompression MT 92 (mini tables air MT 92) : Les temps sans paliers (pour des profondeurs comprises entre 18 et 51 m, avec une vitesse de descente à 20 m/min) devaient être supérieurs à 80% de celui des tables MT 92 et inférieurs à une (pour les profondeurs entre 33 et 51 m) ou 5 minutes (pour les profondeurs entre 18 et 30 m) en plus du temps sans paliers des tables MT 92. Je prends là aussi quelques précautions : J'estime, encore une fois, que, malgré toutes mes précautions, les vérifications sur ce programme ne sont pas assez poussées pour utiliser ce programme en situation réelle (autrement dit, si vous avez un accident en plongée à cause de mon programme, ce n'est pas ma faute !). De plus, pour les plongées à l'air, les tables ou les ordinateurs de décompression sont bien plus pratiques (Je vous rassure : je n'ai pas d'actions chez les fabricants d'ordinateurs et de tables de décompression !!!).

```
(* y_c = 0.34 ; r_o_min = 5e-007 ; lambda = 15198750.0 ; t_regen = 20160. *)
```

```
#open "graphics";;
open_graph"";
```

```
let segment (ax,ay) (bx,by) =
begin
moveto (int_of_float ax) (int_of_float ay);
lineto (int_of_float bx) (int_of_float by);
end;;
```

```
let résoudre_équa_3ème_degré_dicho = fun (a,b,c,borne_inf,borne_sup) ->
(*vérifiée et testée sur des exemples*)
```

(\*résoud par dichotomie l'équation  $a*x^3+b*x^2+c=0$  sur l'intervalle [borne\_inf ; borne\_sup] avec a négatif, b de signe quelconque et c positifs, une étude de fonction permet de montrer aisément l'existence et l'unicité d'une solution sur l'ensemble des nombres réels positifs\*)

```
let écart = (10. ** (-12.)) and inf = ref borne_inf and sup = ref borne_sup and x = ref 0. in
begin
  if a *. (!sup ** 3.) +. b *. (!sup ** 2.) +. c > 0. or a *. (!inf ** 3.) +. b *. (!inf ** 2.) +. c < 0. then failwith "erreur dans le
programme résoudre_équa_3ème_degré_dicho : l'équation n'a pas de solution"
  else
    begin
      while !sup -. !inf >= écart do
        x := (!sup +. !inf) /. 2.;
        if a *. (!x ** 3.) +. b *. (!x ** 2.) +. c < 0. then sup := !x
          else inf := !x;
      done;
      (!sup +. !inf) /. 2.;
    end;
end;
```

(\*En plus des paramètres de la phase de compression le programme calc\_compression\_VPM\_avec\_phase\_volume calcule le volume dégagé éventuellement durant la plongée (plongée avec des yoyos de grandes amplitude) mais l'effet sur la procédure de décompression à effectuer est (trop) peu important\*)

(\* phase\_volume désigne en fait le volume de gaz dégagé (au sens du VPM) divisé par (alpha \*. Vcrit) \*)

```
let calc_compression_VPM_avec_phase_volume = fun (l , r_o_min , t_regen , lambda) ->
(*testé sur un exemple*)
(* l est une liste de couples (instant de la plongée, profondeur) initialisé à (0.,0.)*)
let periode = [| 5. ; 8. ; 12.5 ; 18.5 ; 27. ; 38.3 ; 54.3 ; 77. ; 109. ; 146. ; 187. ; 239. ; 305. ; 390. ; 498. ; 635. |] (* en minutes*)
and delta_P_imp = 8.2 *. (10. ** 5.) (*en pascals*) and f_N2 = 0.79 and P_autres_gaz = 1.36 *. (10. ** 4.) and y = 0.0179 (*
en N/m *) and y_c = 0.34 (* en N/m *) and P_vapeur = 4995. (* en pascals *)in
begin
  let lc = ref(tl(l)) and precedent = ref(hd(l)) and quant_N2 = (make_vect (vect_length periode) (f_N2 *. (((snd( hd(l)) /. 10.) *.
1.03 *. (10. ** 5. )) +. 101325. -. P_vapeur))) (* en pascals*) and rayon_crit = (make_vect (vect_length periode) r_o_min)
and compression_effective = (make_vect (vect_length periode) 0.) and rayon_crit_seuil_imperm = (make_vect (vect_length
periode) 0.) and gradient_decomp_m = (make_vect (vect_length periode) 0.) and P_int_noyaux_seuil_imp = (make_vect
(vect_length periode) 0.) and sauvegarde_phase_volume = ref 0. and P_amb_imperm_max = (make_vect (vect_length
periode) 0.) and phase_volume = (make_vect (vect_length periode) 0.) and time = ref 0. and t_elt = 1. /. 120. in
  begin
    while !lc <> [] do
      let time_i = fst (!precedent) and P_ambient_i = (((snd !precedent) /. 10.) *. 101325.) +. 101325. and c_i = (((snd(hd(!lc)) -.
snd(!precedent)) /. (fst(hd(!lc)) -. fst(!precedent))) /. 10.) *. 101325. and quant_N2_i = (make_vect (vect_length periode) 0.)
in
      begin
        for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
          time := fst(!precedent);
          quant_N2_i.(k) <- quant_N2.(k);
          let P_ambient = ref (((snd !precedent) /. 10.) *. 101325.) +. 101325. in
          begin
            while (!time < fst(hd(!lc)) && compression_effective.(k) < delta_P_imp) do
              quant_N2.(k) <- (f_N2 *. (P_ambient_i -. P_vapeur)) +. (f_N2 *. c_i *. ((!time -. time_i) -. (periode.(k) /. 0.69314718))) -.
(((f_N2 *. (P_ambient_i -. P_vapeur)) -. (quant_N2_i.(k)) -. (f_N2 *. c_i *. (periode.(k) /. 0.69314718))) *. ((0.5)**(!time -.
time_i) /. (periode.(k))));
              compression_effective.(k) <- (max compression_effective.(k) (!P_ambient -. quant_N2.(k) -. P_autres_gaz));
              rayon_crit.(k) <- 1. /. ((compression_effective.(k) /. (2. *. (y_c -. y))) +. 1. /. r_o_min);
              gradient_decomp_m.(k) <- (max gradient_decomp_m.(k) (quant_N2.(k) +. P_autres_gaz -. !P_ambient));
              if (((quant_N2.(k) +. P_autres_gaz -. !P_ambient) > 0.) && (gradient_decomp_m.(k) > 2. *. y *. (y_c -. y) /. (y_c *.
rayon_crit.(k)))) then
                begin (*calcul approché d'intégrales par la méthode des trapèzes *)
                  phase_volume.(k) <- phase_volume.(k) +. (y_c ** 2.) /. (lambda *. y) *. 0.5 *. (!sauvegarde_phase_volume +.
(quant_N2.(k) +. P_autres_gaz -. !P_ambient) *. ((gradient_decomp_m.(k) -. 2. *. y *. (y_c -. y) /. (y_c *. rayon_crit.(k))) /.
(y_c *. gradient_decomp_m.(k)) -. (y *. compression_effective.(k)))) *. t_elt;
```

```

sauvegarde_phase_volume := (quant_N2.(k) + P_autres_gaz - !P_ambient) * ((gradient_decomp_m.(k) - 2.
* y * (y_c - y) / (y_c * rayon_crit.(k))) / ((y_c * gradient_decomp_m.(k)) - (y * compression_effective.(k))));
end;
time := !time + t_elt;
P_ambient := c_i * (!time - time_i) + P_ambient_i;
if compression_effective.(k) >= delta_P_imp then
begin
rayon_crit_seuil_imperm.(k) <- rayon_crit.(k);
P_int_noyaux_seuil_imp.(k) <- quant_N2.(k) + P_autres_gaz;
end;
done;
if compression_effective.(k) >= delta_P_imp then
begin
while !time < fst(hd(!lc)) do
quant_N2.(k) <- (f_N2 * (P_ambient_i - P_vapeur)) + (f_N2 * c_i * ((!time - time_i) - (periode.(k) / 0.69314718))) -
. (((f_N2 * (P_ambient_i - P_vapeur)) - (quant_N2_i.(k) - f_N2 * c_i * (periode.(k) / 0.69314718)) * ((0.5)**(!time -
time_i) / (periode.(k))));
gradient_decomp_m.(k) <- (max gradient_decomp_m.(k) (quant_N2.(k) + P_autres_gaz - !P_ambient));
if (((quant_N2.(k) + P_autres_gaz - !P_ambient) > 0.) && (gradient_decomp_m.(k) > 2. * y * (y_c - y) / (y_c *
rayon_crit.(k)))) then
begin (*calcul approché d'intégrales par la méthode des trapèzes *)
phase_volume.(k) <- phase_volume.(k) + (y_c ** 2.) / (lambda * y) * 0.5 * (!sauvegarde_phase_volume +
(quant_N2.(k) + P_autres_gaz - !P_ambient) * ((gradient_decomp_m.(k) - 2. * y * (y_c - y) / (y_c * rayon_crit.(k))) /
(y_c * gradient_decomp_m.(k)) - (y * compression_effective.(k)))) * t_elt;
sauvegarde_phase_volume := (quant_N2.(k) + P_autres_gaz - !P_ambient) * ((gradient_decomp_m.(k) - 2.
* y * (y_c - y) / (y_c * rayon_crit.(k))) / ((y_c * gradient_decomp_m.(k)) - (y * compression_effective.(k))));
end;
time := !time + t_elt;
P_ambient := c_i * (!time - time_i) + P_ambient_i;
done;
if !P_ambient > P_amb_imperm_max.(k) then
begin
rayon_crit.(k) <- (résoudre_équa_3ème_degré_dicho(0. - ((2. * (y_c - y) / r_o_min) + !P_ambient) , 2. * (y_c -
y) , P_int_noyaux_seuil_imp.(k) * (rayon_crit_seuil_imperm.(k) ** 3.) , 0. , r_o_min));
compression_effective.(k) <- !P_ambient - P_int_noyaux_seuil_imp.(k) * ((rayon_crit_seuil_imperm.(k) /
rayon_crit.(k)) ** 3.);
P_amb_imperm_max.(k) <- !P_ambient;
end;
end;
end;
done;
precedent := hd(!lc);
lc := tl(!lc);
done;
(quant_N2 , compression_effective, phase_volume);
end;
end;;

```

```

let régénération = fun (compression_effective , tf , r_o_min , t_regen) ->
let y = 0.0179 (* en N/m *) and y_c = 0.34 (* en N/m *) in
for k = 0 to (vect_length compression_effective - 1) do
let rayon_ini = 1. / ((compression_effective.(k) / (2. * (y_c - y))) + 1. / r_o_min) in
let rayon_regénéré = r_o_min + (rayon_ini - r_o_min) * exp(0. - (tf / t_regen)) in
compression_effective.(k) <- 2. * (y_c - y) * ((1. / rayon_regénéré) - (1. / r_o_min));
done;;

```

```

let décompression_VPM_B = fun ((tf,pf),quant_N2,compression_effective,phase_volume,r_o_min,t_regen,lambda) ->
let periode = [| 5. ; 8. ; 12.5 ; 18.5 ; 27. ; 38.3 ; 54.3 ; 77. ; 109. ; 146. ; 187. ; 239. ; 305. ; 390. ; 498. ; 635. |] (* en minutes*)
and delta_P_imp = 8.2 * (10. ** 5.) (*en pascals*) and f_N2 = 0.79 and P_autres_gaz = 1.36 * (10. ** 4.) and y = 0.0179 (*
en N/m *) and y_c = 0.34 (* en N/m *) and P_vapeur = 4995. (* en pascals *) in

```

```

begin
let rayon_crit = (make_vect (vect_length periode) r_o_min) and rayon_crit_r_o_new = (make_vect (vect_length periode)
r_o_min) and P_ss_min = (make_vect (vect_length periode) 0.) and P_ss_new = (make_vect (vect_length periode) 0.) and
quant_N2_i = (make_vect (vect_length periode) 0.) and time = ref tf and P_ambient = ref (((pf /. 10.) * 101325.) + 101325.)
and profil_deco = ref [(tf,pf)] and t_elt = 1. /. 120. and vitesse_de_remontée = 1. * 101325. (*en pascal/minutes *) and
P_ambient_surface = 101325. (*en Pascals*) and delta_P_elt_palier = 0.3 * 101325. (*en pascals*) and t_elt_palier = 1. (*en
minutes*) in
begin
(*remplir les tableaux quant_N2_i rayon_crit et P_ss_min *)
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
quant_N2_i.(k) <- quant_N2.(k);
rayon_crit.(k) <- 1. /. ((compression_effective.(k) /. (2. * (y_c - y))) + 1. /. r_o_min);
P_ss_min.(k) <- 2. * y * (y_c - y) /. (y_c * rayon_crit.(k));
done;
(*Remonter le plus haut possible sans dépasser P_ss_min*)
let cont = ref true and P_ambient_i = (((pf /. 10.) * 101325.) + 101325.) and quant_N2_c = (make_vect (vect_length periode)
0.) and time_c = ref tf and plafond_test = ref (((floor (pf /. (delta_P_elt_palier * 10. /. (101325.)))) * delta_P_elt_palier) +
101325.) (*en pascals*) and P_ambient_c = ref (((pf /. 10.) * 101325.) + 101325.) and dépassé_P_ss_min = ref false in
begin
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
quant_N2_c.(k) <- quant_N2.(k);
done;
while !cont do
if !P_ambient <= P_ambient_surface then (*alors P_ambient <= P_ambient_surface*)
begin
cont := false;
profil_deco := !profil_deco @ [ !time , ((!P_ambient - 101325.) /. (101325.)) * 10.];
end
else
begin
while (not(!dépassé_P_ss_min) && (!P_ambient_c > !plafond_test)) do
let k = ref 0 in
begin
while (not(!dépassé_P_ss_min) && (!k <= (vect_length quant_N2 - 1))) do
if (quant_N2_c.(!k) + P_autres_gaz - !P_ambient_c) >= P_ss_min.(!k) then dépassé_P_ss_min:= true
else k := !k + 1;
done;
end;
if not(!dépassé_P_ss_min) = true then
begin
time_c := !time_c + t_elt;
P_ambient_c := (0. - (vitesse_de_remontée)) * (!time_c - tf) + P_ambient_i;
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
quant_N2_c.(k) <- (f_N2 * (P_ambient_i - P_vapeur)) + (f_N2 * (0. - (vitesse_de_remontée)) *
((!time_c - tf) - (periode.(k) /. 0.69314718))) - (((f_N2 * (P_ambient_i - P_vapeur)) - (quant_N2_i.(k)) - f_N2 * (0. -
(vitesse_de_remontée)) * (periode.(k) /. 0.69314718)) * ((0.5)**(!time_c - tf) /. (periode.(k))));
done;
let k = ref 0 in
begin
while (not(!dépassé_P_ss_min) && (!k <= (vect_length quant_N2 - 1))) do
if (quant_N2_c.(!k) + P_autres_gaz - !P_ambient_c) >= P_ss_min.(!k) then dépassé_P_ss_min:=
true else k := !k + 1;
done;
end;
end;
done;
if !dépassé_P_ss_min = true then
begin
cont := false;
profil_deco := !profil_deco @ [ !time , ((!P_ambient - 101325.) /. (101325.)) * 10. ];
end

```

```

else
begin
time := !time_c;
P_ambient := !plafond_test;
plafond_test := !plafond_test -. delta_P_elt_palier;
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
quant_N2.(k) <- quant_N2_c.(k);
done;
end;
end;

done;
end;
let plafond_test = ref 0. and temps_total_paliers = ref 0. and time_test = ref !time and P_ambient_test = ref !P_ambient and
quant_N2_test = (make_vect (vect_length periode) 0.) and profil_test = ref !profil_deco and fin_plongée = ref false in
begin
while not(!fin_plongée) do
P_ambient_test := !P_ambient;
plafond_test := !P_ambient -. delta_P_elt_palier;
time_test := !time;
profil_test := !profil_deco;
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
quant_N2_test.(k) <- quant_N2.(k);
done;
if !P_ambient_test <= P_ambient_surface then
begin
fin_plongée := true;
profil_test := !profil_test @ [ !time_test , ((!P_ambient_test -. 101325.) /. (101325.)) * . 10.];
end
else
(* tester si on peut remonter avec un temps de palier égal à temps_total_paliers*)
begin
(*calcul de P_ss_new *)
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
let b = ((1. -. phase_volume.(k)) * . y * . lambda /. ((!temps_total_paliers +. ((!P_ambient_test -. P_ambient_surface) /.
vitesse_de_remontée) +. (periode.(k) /. 0.69314718)) * . y_c)) +. P_ss_min.(k) and c = ((1. -. phase_volume.(k)) * . (y ** . 2.) * .
lambda * . compression_effective.(k)) /. ((!temps_total_paliers +. ((!P_ambient_test -. P_ambient_surface) /.
vitesse_de_remontée) +. (periode.(k) /. 0.69314718)) * . (y_c ** . 2.)) in
P_ss_new.(k) <- (b +. sqrt((b ** . 2.) -. 4. * . c)) /. (2.);
done;
(*Remontée jusqu'au premier palier*)
let cont = ref true and P_ambient_i = (((pf /. 10.) * . 101325.) +. 101325.) and quant_N2_c = (make_vect (vect_length
periode) 0.) and time_c = ref !time_test and dépassé_P_ss_new = ref false in
begin
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
quant_N2_c.(k) <- quant_N2_test.(k);
done;
while !cont do
if !P_ambient_test <= P_ambient_surface then
begin
cont := false;
profil_test := !profil_test @ [ !time_test , ((!P_ambient_test -. 101325.) /. (101325.)) * . 10.];
fin_plongée := true;
end
else
begin
let k = ref 0 in
begin
while (not(!dépassé_P_ss_new) && (!k <= (vect_length quant_N2 - 1))) do
if (quant_N2_c.(!k) +. P_autres_gaz -. !plafond_test) >= P_ss_new.(!k) then dépassé_P_ss_new:= true
else k := !k + 1;
done;

```

```

end;
if !dépassé_P_ss_new then
  begin
  cont := false;
  profil_test := !profil_test @ [ !time_test , ((!P_ambient_test - 101325.) / (101325.)) * 10.];
  end
else
  begin
  time_c := !time_test +. (!P_ambient_test - !plafond_test) / (vitesse_de_remontée);
  for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
  quant_N2_c.(k) <- (f_N2 * (P_ambient_i - P_vapeur)) +. (f_N2 * (0. - (vitesse_de_remontée)) *
  ((!time_c - tf) - (periode.(k) / 0.69314718))) -. (((f_N2 * (P_ambient_i - P_vapeur)) - (quant_N2_i.(k)) - f_N2 * (0. -
  (vitesse_de_remontée)) * (periode.(k) / 0.69314718)) * ((0.5)**(!time_c - tf) / (periode.(k))));
  done;
  let k = ref 0 in
  begin
  while (not(!dépassé_P_ss_new) && (!k <= (vect_length quant_N2 - 1))) do
  if (quant_N2_c.(k) +. P_autres_gaz -. !plafond_test) >= P_ss_new.(k) then
  dépassé_P_ss_new:= true else k := !k + 1;
  done;
  end;
  if !dépassé_P_ss_new then
  begin
  cont := false;
  profil_test := !profil_test @ [ !time_test , ((!P_ambient_test - 101325.) / (101325.)) * 10.];
  end
  else
  begin
  time_test := !time_c;
  P_ambient_test := !plafond_test;
  plafond_test := !plafond_test - delta_P_elt_palier;
  for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
  quant_N2_test.(k) <- quant_N2_c.(k);
  done;
  end;
  end;
end;
end;
done;
end;
if !P_ambient_test <= P_ambient_surface then
  begin
  fin_plongée := true;
  profil_test := !profil_test @ [ !time_test , ((!P_ambient_test - 101325.) / (101325.)) * 10.];
  end
else
  (*on est au premier palier*)
  let P_amb_1er_palier = !P_ambient_test and temps_palier = ref 0. and temps_total_palier_test = ref
  0. and rayon_crit_r_o_new_1_palier = (make_vect (vect_length periode) r_o_min) and deco_gradient = (make_vect
  (vect_length periode) 0.) and time_c = ref !time_test in
  begin
  for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
  rayon_crit_r_o_new_1_palier.(k) <- 2. * y / P_ss_new.(k);
  deco_gradient.(k) <- P_ss_new.(k);
  done;
  let condition = ref true in
  while !condition do
  if !P_ambient_test <= P_ambient_surface then
  begin
  fin_plongée := true;
  condition := false;
  end;
  end;
  end;
end;

```

```

                                profil_test := !profil_test @ [ !time_test , ((!P_ambient_test -. 101325.) /.
(101325.)) *. 10.];
                                end
                                else
(*peut-on monter au palier suivant ? *)
let dépassé_deco_grad = ref false and quant_N2_c = (make_vect (vect_length periode) 0.) in
begin
time_c := !time_test;
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
quant_N2_c.(k) <- quant_N2_test.(k);
done;
let k = ref 0 in
begin
while (not(!dépassé_deco_grad) && (!k <= (vect_length quant_N2 - 1))) do
if (quant_N2_c.(!k) +. P_autres_gaz -. !plafond_test) >= deco_gradient.(!k) then
dépassé_deco_grad := true else k := !k + 1;
done;
end;
if not(!dépassé_deco_grad) then
begin
time_c := !time_test +. (!P_ambient_test -. !plafond_test) /. (vitesse_de_remontée);
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
quant_N2_c.(k) <- (f_N2 *. (!P_ambient_test -. P_vapeur)) +. (f_N2 *. (0. -. (vitesse_de_remontée))
*. (((!P_ambient_test -. !plafond_test) /. (vitesse_de_remontée)) -. (periode.(k) /. 0.69314718))) -. (((f_N2 *. (!P_ambient_test
-. P_vapeur)) -. (quant_N2_c.(k)) -. f_N2 *. (0. -. (vitesse_de_remontée)) *. (periode.(k) /. 0.69314718)) *.
((0.5)**.(((!P_ambient_test -. !plafond_test) /. (vitesse_de_remontée)) /. (periode.(k)))));
done;
let k = ref 0 in
begin
while (not(!dépassé_deco_grad) && (!k <= (vect_length quant_N2 - 1))) do
if (quant_N2_c.(!k) +. P_autres_gaz -. !plafond_test) >= deco_gradient.(!k) then
dépassé_deco_grad := true else k := !k + 1;
done;
end;
if not(!dépassé_deco_grad) then
begin
if !temps_palier <> 0. then
begin
profil_test := !profil_test @ [!time_test , ((!P_ambient_test -. 101325.) /. (101325.)) *.
10.];
temps_palier := 0.;
end;
time_test := !time_c;
P_ambient_test := !plafond_test;
plafond_test := !plafond_test -. delta_P_elt_palier;
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
quant_N2_test.(k) <- quant_N2_c.(k);
done;
end;
end;

if !dépassé_deco_grad then
begin
if !temps_palier = 0. then
begin
(*calculer le nouveau grad_deco en utilisant la loi de boyle*)
for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
let rayon = résoudre_équa_3ème_degré_dicho(0. -. !plafond_test , (-2.) *. y , (P_amb_1er_palier
+. 2. *. (y /. rayon_crit_r_o_new_1_palier.(k))) *. (rayon_crit_r_o_new_1_palier.(k) **. 3.) , 0.
, rayon_crit_r_o_new_1_palier.(k) *. ((P_amb_1er_palier /. !plafond_test) **. (1. /. 3.)) ) in
deco_gradient.(k) <- 2. *. (y /. rayon);

```

```

done;
profil_test := !profil_test @ [!time_test , ((!P_ambient_test - 101325.) /. (101325.)) * . 10.];
end;
temps_palier := !temps_palier + . t_elt_palier;
temps_total_palier_test := !temps_total_palier_test + . t_elt_palier;
time_test := !time_test + . t_elt_palier;
if !temps_total_palier_test > !temps_total_paliers then
    begin
        condition := false;
    end
else
    for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
        quant_N2_test.(k) <- quant_N2_test.(k) +. ((f_N2 * . (!P_ambient_test - . P_vapeur)) -.
quant_N2_test.(k)) * . (1. -. ((0.5) **. (t_elt_palier /. (periode.(k)))));
        done;
    end;
end;
done;
end;
if !fin_plongée then
    begin
        for k = 0 to (vect_length quant_N2 - 1) do
            quant_N2.(k) <- quant_N2_test.(k);
            done;
        end
        else temps_total_paliers := !temps_total_paliers + . t_elt_palier;
    end;
done;
profil_deco := !profil_test;
end;
(!profil_deco);
end;
end;;

(*le programme appelé « VPM-B avec coefficients ajustés » *)
let VPM_B_avec_coefficients_ajustés = fun l ->
let r_o_min = 5e-007 (*en mètres*) and t_regen = 20160. (* en minutes *) and lambda = 15198750.0 (* en Pa/min *) in
let (quant_N2 , compression_effective , phase_volume) = calc_compression_VPM_avec_phase_volume(l , r_o_min , t_regen
, lambda) and l_c = ref l and pf = ref 0. and tf = ref 0. and dépassé_phase_volume = ref false in
begin
let k = ref 0 in
while (not(!dépassé_phase_volume) && (!k <= (vect_length quant_N2 - 1))) do
if phase_volume.(!k) >= 1. then dépassé_phase_volume := true else k := !k + 1;
done;
if !dépassé_phase_volume then failwith "Erreur le volume critique est dépassé pendant la plongée"
else
begin
let s = ref (hd(!l_c)) in
begin
clear_graph();
set_color(rgb 0 0 255);
l_c := tl(!l_c);
while !l_c <> [] do
tf := fst(hd(!l_c));
pf := snd(hd(!l_c));
segment (50. +. fst(!s) * . 5.,550. -. (snd(!s) * . 5.)) (50. +. !tf * . 5. ,550. -. (!pf * . 5.));
s := (!tf ,!pf);
l_c := tl(!l_c);
done;
end;
end;
(regénération(compression_effective , !tf , r_o_min , t_regen));

```

```

let profil_deco = (décompression_VPM_B(!tf,!pf),quant_N2,compression_effective,phase_volume,r_o_min , t_regen ,
lambda)) in
  let profil_deco_c = ref (tl(profil_deco)) and s = ref (hd(profil_deco)) in
    begin
      set_color(black);
      segment (30.,550.) (600.,550.); segment (596.,546.) (600.,550.); segment (596.,554.) (600.,550.);
      moveto 5 545 ; draw_string "0m" ; segment (46.,550.) (50.,550.) ;
      moveto 5 520 ; draw_string "5m" ; segment (46.,525.) (50.,525.) ;
      moveto 5 495 ; draw_string "10m" ; segment (46.,500.) (50.,500.) ;
      moveto 5 445 ; draw_string "20m" ; segment (46.,450.) (50.,450.) ;
      moveto 5 395 ; draw_string "30m" ; segment (46.,400.) (50.,400.) ;
      moveto 5 345 ; draw_string "40m" ; segment (46.,350.) (50.,350.) ;
      moveto 5 295 ; draw_string "50m" ; segment (46.,300.) (50.,300.) ;
      moveto 5 245 ; draw_string "60m" ; segment (46.,250.) (50.,250.) ;
      moveto 5 195 ; draw_string "70m" ; segment (46.,200.) (50.,200.) ;
      moveto 2 95 ; draw_string "Profondeur" ;
      segment (50.,570.) (50.,120.) ; segment (46.,124.) (50.,120.) ; segment (54.,124.) (50.,120.) ;
      moveto 35 570 ; draw_string "0min" ; segment (50.,554.) (50.,550.) ;
      moveto 90 570 ; draw_string "10min" ; segment (100.,554.) (100.,550.) ;
      moveto 140 570 ; draw_string "20min" ; segment (150.,554.) (150.,550.) ;
      moveto 190 570 ; draw_string "30min" ; segment (200.,554.) (200.,550.) ;
      moveto 240 570 ; draw_string "40min" ; segment (250.,554.) (250.,550.) ;
      moveto 290 570 ; draw_string "50min" ; segment (300.,554.) (300.,550.) ;
      moveto 340 570 ; draw_string "60min" ; segment (350.,554.) (350.,550.) ;
      moveto 390 570 ; draw_string "70min" ; segment (400.,554.) (400.,550.) ;
      moveto 440 570 ; draw_string "80min" ; segment (450.,554.) (450.,550.) ;
      moveto 490 570 ; draw_string "90min" ; segment (500.,554.) (500.,550.) ;
      moveto 590 570 ; draw_string "Temps" ;
      set_color(rgb 165 0 90);
      while !profil_deco_c <>[] do
        let (t,p) = hd (!profil_deco_c) in
          begin
            segment (50. +. fst(!s) *. 5.,550. -. (snd(!s) *. 5.)) (50. +. t *. 5. ,550. -. (p *. 5.));
            s:= (t,p);
            profil_deco_c := tl(!profil_deco_c);
          end;
        done;
      (l @ profil_deco);
    end;
  end;;

(*exemple*)
VPM_B_avec_coefficients_ajustés ([0.,0. ; 60. / . 20. , 60. ; 20. , 60.]));

```

### VIII. Bibliographie commentée :

Site Internet de l'association réunionnaise de médecine subaquatique et hyperbare qui contient, entre autres, un article sur les tables de décompression écrit par le docteur LOISEAU : [www.aresub.org](http://www.aresub.org)

Site Internet de M. Erik MAIKEN (sur ce site vous trouverez entre autres les codes du VPM-B par BAKER, des explications sur le VPM, et un exposé fait par WIENKE sur la décompression ) :  
[www.decompression.org/maiken/home.htm](http://www.decompression.org/maiken/home.htm)

Site Internet de M. Jean marc BELIN (qui contient divers articles sur la décompression dont une traduction en français de l'article de HENNESSY sur l'hypothèse des bulles artérielles) : [www.plongeesout.com](http://www.plongeesout.com)

Site Internet de M. Jörgen VAN DER VELDE (qui contient un article assez complet sur le VPM) : [www.deepocean.net](http://www.deepocean.net)

Site Internet du logiciel HLPlanner : [www.hlplanner.com](http://www.hlplanner.com)

Les tables MN 90 se trouvent aisément sur Internet et dans les livres de plongée. Les autres tables ont aussi été trouvées sur Internet.

Maurice GORET. *Préparation au brevet de Moniteur Fédéral 2ième degré FFESSM, éléments de calcul des tables*. Accessible depuis le site Internet <http://bleu-passion.chez-alice.fr>

WIENKE, B.R. (non daté). *Decompression theory*. Accessible depuis le site Internet : [www.decompression.org/maiken/home.htm](http://www.decompression.org/maiken/home.htm)

L'article « fondateur » du VPM :

YOUNT, D.E. (1979). *Skins of varying permeability: a stabilization mechanism for gas cavitation nuclei*. The Journal of the Acoustical Society of America, volume 65, pages 1429 à 1439.

D'autres articles écrit par YOUNT et ses collaborateurs traitant du VPM puis de son application à la plongée :

YOUNT D.E. (1982). *On the evolution, generation, and regeneration of gas cavitation nuclei*. The Journal of the Acoustical Society of America, volume 71, pages 1473 à 1481.

YOUNT, D.E., GILLARY E.W., et HOFFMAN, D.C. (1984). *A microscopic investigation of bubble formation nuclei*. The Journal of the Acoustical Society of America, volume 76, pages 1511 à 1521.

YOUNT, D.E. et HOFFMAN, D.C. (1986). *On the use of a bubble formation model to calculate diving tables*. Aviation, Space, and Environmental Medicine, volume 57, pages 149 à 156.

YOUNT D.E., MAIKEN E.C. et BAKER E.B. (1999). *Implications of the Varying Permeability Model for Reverse Dive Profiles*. Accessible depuis le site : [www.decompression.org/maiken/home.htm](http://www.decompression.org/maiken/home.htm)

Un article présentant, avec quelques fautes de frappes dans les formules, le calcul de  $P_{ss}^{new}$  (noté  $\Delta P_{r;j}^{m\text{ permis}}$  dans le document que vous avez entre les mains !) à partir de l'intégrale de l'hypothèse du volume critique :

BAKER E.C. *Derivation with Explanation of the VPM Dynamic Critical Volume Algorithm of Yount & Hoffman (1986) Presented by Erik C. Baker, P.E.* Accessible depuis le site :

[www.decompression.org/maiken/home.htm](http://www.decompression.org/maiken/home.htm)

BLATTEAU, J.-E., SOURAUD, J.-B., GEMPP, E. et BOUSSUGES, A. (2006). *Gas Nuclei, Their Origin, and Their Role in Bubble Formation*. Aviation, Space, and Environmental Medicine, volume 77, pages 1068 à 1076

BLATTEAU, J.-E., GUIGUES, J.-M., HUGON, M., GALLAND, F.-M., SAINTY, J.-M. et J.-P. MENU, J.-P. (2005). *Plongée à l'air avec la table de décompression MN 90. Bilan de 12 années d'utilisation par la Marine française : à propos de 61 accidents de désaturation de 1990 à 2002*. Science & sports, volume 20, pages 119 à 123.

L'article ci-dessous tente de mettre en doute l'utilité des paliers profonds pour des plongées de 50 à 60 m de profondeur. Le problème est que le moyen utilisé pour calculer les paliers profonds ne semble pas bien définis dans l'article (les profils de décompression ont été obtenus en ajoutant des paliers profonds aux profils donnés par les tables MN 90). Cet article montre tout de même (selon moi) que les paliers profonds ne doivent pas être faits n'importe comment au prix d'avoir l'effet inverse de celui escompté :

BLATTEAU, J.-E., HUGON, M., GARDETTE, B., SAINTY, J.-M. et GALLAND F.-M. (2005). *Bubble incidence after staged decompression from 50 or 60 msw: effect of adding deep stops*. Aviation, Space, and Environmental Medicine, volume 76, pages 490 à 492.

L'article de HENNESSY sur l'hypothèse des bulles artérielles :  
HENNESSY T.R.(1989). *On the site of origin, evolution and effects of decompression microbubbles*. Proceeding of the International Symposium on supersaturation and bubble formation in fluids and organism. June 1989.

Une introduction vulgarisée au VPM et VPM-B :  
KALUZA, M.(2005). *VPM - The Inner Workings*. Traduit en français par MEYRIAT sous le titre *VPM - La mécanique interne* en 2006. Accessible depuis le site Internet : [www.hlplanner.com](http://www.hlplanner.com)

**IX. Remerciements :**

Je remercie particulièrement :

M. Didier DAO, médecin agréé par la FFESSM, pour m'avoir donné les premiers conseils sur le sujet.

M. Jean Claude LE PÉCHON, ingénieur conseil en hyperbarie à la retraite qui m'a conseillé sur le VPM, la comparaison des modèles avec les tables actuelles, et la physiologie.

M. Erik MAIKEN qui a participé au développement du VPM et du VPM-B, qui m'a fourni quelques réponses à mes interrogations sur le VPM et VPM-B.

M. Jean-Eric BLATTEAU, médecin spécialisé dans la plongée et la décompression qui m'a communiqué quelques-uns de ses articles.

Mes parents pour m'avoir fourni la photographie de la première page et pour avoir fortement contribué à la diminution du nombre de fautes d'orthographe dans ce document.