

Le Modèle à Perméabilité Variable

Par Jean-Marc Belin

Tiré d'un document de Dan Reinders

(avec les graphiques et animations de Richard Pyle)

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Belin

Tout d'abord, parlons des bulles:

- La pression du gaz à l'intérieur d'une bulle est égale à la pression hydrostatique qui l'entoure, plus une contribution de la Tension de Surface provoquée par les molécules d'eau "se tirant" les unes aux autres à la surface de la bulle.
- Cette contribution de la Tension de Surface est donnée par la formule suivante : $P_{TS} = 2\gamma/\text{rayon}$
- Une bulle, d'environ la taille d'un globule rouge, (rayon de 4 μm) voit sa pression augmenter de 0.5 atmosphère.
- **Plus la bulle est petite, plus les effets de la tension de surface sont importants.**

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Belin

Effet de la Tension de Surface

Pression Ambiante : $P_{\text{amb}} = 2 \text{ atm}$

Tension de Surface : $P_{TS} = 0.5 \text{ atm}$

Pression Interne : $P_{\text{int}} = 2.5 \text{ atm}$

Gaz

Fluide

4 μm

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Belin

Les bulles et la diffusion gazeuse

- Si à l'intérieur de la bulle, la pression est supérieure à la pression des gaz dissous dans les tissus environnants, la bulle va se contracter.
- Inversement, si la pression à l'intérieur de la bulle est inférieure à la pression des gaz dissous dans les tissus, la bulle va grossir.

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Belin

Gradients et Diffusion Gazeuse

Pression Ambiante : $P_{\text{amb}} = 2 \text{ atm}$

Tension de Surface : $P_{TS} = 0.5 \text{ atm}$

Tension gaz dissous (Tissus) : $P_{\text{tiss}} = 3.2 \text{ atm}$

$P_{\text{bulle}} = 2.5 \text{ atm}$

Gaz

Fluide

4 μm

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Belin

Implications

- Sauf durant la décompression, toutes les bulles devraient se dissoudre car, à cause de la tension de surface, la pression interne de la bulle est plus élevée que la pression des gaz dissous qui l'entourent.
- Une personne qui n'aurait pas plongé récemment ne devrait pas avoir de bulle.
- **En réalité, les bulles ne se dissolvent pas toujours.**

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Belin

Entrez dans le Modèle à Perméabilité Variable!

- Pour expliquer pourquoi les bulles ne se dissolvent pas toujours, de nombreuses suggestions ont été faites.
- Jusqu'à présent, la meilleure explication est que les minuscules bulles se stabilisent grâce à des "molécules actives de surface"
- Ces molécules possèdent à la fois des parties *hydrophobes* et *hydrophiles*, et elles s'insèrent d'elles mêmes dans l'interface eau-gaz.

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Belin

Molécules actives de Surface

Hydrophile

Hydrophobe

Gaz

Fluide

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Belin

Comment le "surfactant" stabilise les bulles ?

- De même que les molécules d'eau "se tirent" entre elles pour former la tension de surface, les molécules actives de surface "se repoussent" les unes contre les autres.
- Ceci contrebalance l'effet de la Tension de Surface et ainsi, élimine la perte de gaz par diffusion.
- Pas de diffusion, donc pas de dissolution des bulles.

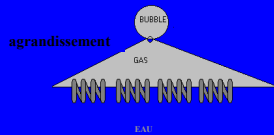
PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Belin

Diapositive 7

- p1** Les molécules hydrophobes ont horreur de l'eau tandis que les molécules hydrophiles sont attirées par l'eau. Ainsi, les molécules qui possèdent ces deux terminaisons vont se fixer sur l'interface gaz-eau avec la partie hydrophile dans l'eau et la partie hydrophobe dans le gaz.

papa; 21/04/2008

Le Surfactant peut être assimilé à de minuscules ressorts se repoussant à l'interface.



Que se passe-t-il pendant l'écrasement ?

- Lorsqu'une bulle est comprimée à la descente, la place disponible pour chaque ressort diminue. Schématiquement, chaque ressort se comprime alors qu'il s'écrase contre son voisin.
- Mais, comme le ferait un vrai ressort, il arrive qu'il ne puisse plus se comprimer davantage – son voyage s'arrête là.
- A cet instant, les ressorts vont quitter la surface de la bulle.

Croissance des bulles

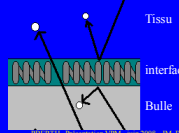
- Retenez que les bulles grossissent lorsque la pression des gaz dissous est supérieure à la pression interne de la bulle.
- Ce qui signifie que pour grossir, les petites bulles ont besoin d'une "sur-saturation" plus importante car l'effet de la tension de surface est proportionnellement plus important pour les bulles plus petites.
- C'est pourquoi les noyaux réduits sont meilleurs pour le plongeur que les noyaux non réduits.

Mais, tu ne viens pas de dire que l'effet de la tension de surface était nulle pour les noyaux réduits ?

- Ce qui voudrait dire que les petites bulles devraient grossir aussi facilement que les grosses. – **Mais ce n'est pas ce qui se passe !** –
- Au début la bulle se dilate, mais ensuite les ressorts "perdent le contact" entre eux, aussi ne peuvent-ils plus se repousser et les effets des molécules de surfactant sont perdus.
- Et alors, la tension de surface règne en maître.

D'autres effets pour le surfactant ?

- Oui – il forme une barrière à la diffusion.
- Plus les molécules sont plaquées entre elles, plus la barrière à la diffusion est forte.



Comment intervient la "Perméabilité Variable"?

- Soit le surfactant ne forme pas une barrière à la diffusion, soit il la bloque complètement.
- Cette "impermeabilité" intervient après une compression d'environ 9 bars, la plupart des plongeurs ne sont donc pas concernés.
- Une bulle imperméable ne sera donc pas autant écrasée qu'une bulle perméable car le gaz ne s'évacue pas par diffusion au fur et à mesure qu'elle rétrécit.

Grossissement de la Bulle

- Les bulles grossissent lorsque la sur-saturation est supérieure à $2 \gamma / \text{rayon}$ (tension de surface).
- Notez que le développement du noyau pendant la décompression facilite la transformation des noyaux en bulles pleines et entières.
- Toutes les équations précédentes peuvent être combinées afin de déterminer les plus petites bulles stimulées pour grossir.

Nombre de bulles :

- Le VPM prédit qu'il y a une distribution exponentielle des noyaux – beaucoup de petits et quelques gros.
- Le nombre de noyaux stimulés à la croissance est fonction de la taille minimale susceptible de grossir, donné par la formule suivante :

$$N_{stimulé} = N_{total} (e^{-K \cdot r_{min}})$$

Le nombre de bulles minimum

- Le VPM postule qu'il existe un nombre de bulles minimum (indépendamment de la taille) qui peuvent être tolérées sans qu'il y ait d'accident de décompression.
- Si c'est vrai, on peut alors prévenir les accidents de décompression en conservant la valeur de la sur-saturation au dessous du seuil nécessaire au déclenchement du nombre critique de noyaux.

Période et croissance des bulles

- Les "tissus rapides" éliminent le gaz inerte plus vite que les tissus lents, ce qui veut dire que les bulles n'ont pas le temps de grossir autant que dans les tissus lents.
- D'abord, les bulles grossissent plus vite à cause de la différence de pression plus élevée, mais ceci est grandement contre-balançé par l'élimination rapide de la source de gaz.

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bello

Beaucoup de petites ou quelques grosses ?

- Ce concept de "volume critique" signifie que les tissus rapides peuvent avoir de nombreuses petites bulles, alors que les tissus lents peuvent difficilement avoir des bulles au dessus du nombre minimum.
- On autorise une sur-saturation plus élevée pour les tissus rapides.



PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bello

Augmenter le Gradient

- Le VPM démarre en stimulant simplement le nombre minimum de bulles saines.
- La sur-saturation maximale autorisée est alors augmentée, et le surplus de volume gazeux généré dans chaque compartiment est comparé au maximum permis.
- Si c'est en dessous de ce qui est permis, la sur-saturation est encore augmentée jusqu'à atteindre le maximum possible pour ce compartiment.

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bello

Est-ce que VPM marche bien ?

- Il a permis de générer des tables de plongée avec succès.
- Il s'appuie sur des données humaines et animales.
- Il a apparemment réussi la mise en équation réalisée par le Dr. Wienke et son nouveau RGBM (Reduced Gradient Bubble Model).

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bello

Création de nouveaux noyaux

- Remarquez que VPM ne prévoit pas la création de nouveaux noyaux, il ne s'occupe que de la stabilisation de ceux déjà existants.
- Ces noyaux créés lors de mouvements contraignants sont certainement la raison pour laquelle l'ADD survient plus facilement lorsque des exercices sont effectués avant ou pendant la décompression.

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bello

Cela veut dire que je dois rester tranquille pendant la déco ?

- Pas nécessairement.
- Il est vrai que l'exercice crée plus de noyaux.
- Mais l'exercice accélère également l'élimination du gaz des tissus, et certaines expériences ont montrées que c'était bénéfique.
- Ce qui est sûr c'est que les efforts exténuants doivent être évités.
- On n'est cependant pas sûr de savoir quand et où des efforts modérés doivent être ou non exécutés.

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bello

Conclusion

- Les recommandations du VPM ont un sens dans une large variété de situation.
- Il se peut que la stabilisation des micro-noyaux par le surfactant ne joue pas un rôle clé dans la MDD des plongeurs, mais même sans cela, le travail de pionniers comme Kunkle et Yount a grandement contribué à comprendre comment les bulles se forment et se stabilisent - leur contribution ne doit pas être sous-estimée.

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bello

VPM

Exploitation du modèle

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bello

M-Values et VPM-Values

d'après une présentation originale de Kevin Watt

L'algorithme de VPM peut s'énoncer comme suit:

• Bühlmann calcule les gaz dissous et Yount calcule la taille de la bulle, en particulier l'écrasement de la bulle lors de la descente et sa croissance à la remontée.

• Comme la bulle du professeur Yount ne grossit que quand la tension du compartiment est plus grande que la pression de la bulle, on stoppe le plongeur chaque fois que la tension d'un compartiment risque de dépasser la pression de la bulle (P_b) de ce compartiment.

PHERTH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bello

Les paramètres nécessaires aux calculs :

Bühlmann
 Calcul de la tension des gaz dissous (VPM s'appuie sur les 16 compartiments Bühlmann) :
 $P = P_{10} + R(t - 1k) - [P_{10} - P_0 - (R/k)]e^{-kt}$

VPM

- r_0 : le rayon minimal de la bulle qu'on peut exciter pour grossir
- γ : gamma, la tension de surface du noyau gazeux.
- ρ_c : la tension de réduction du noyau
- λ : le volume de bulles maxi tolérable
- T : le temps de régénération des noyaux (2 semaines environ)

•Le profil de la plongée (vitesse de descente et de remontée, profondeurs atteintes, temps, gaz respirés, ...)

PIERREH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bégin

M-Values et VPM-Values

Départ de la plongée 16 compartiments – 0,75b
 16 bulles associées

Pression ambiante – surface – 1 atm

Les 16 compartiments

PIERREH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bégin

M-Values et VPM-Values

Au cours de la plongée

- La P. ambiante augmente
- La charge des compartiments augmente
- La taille des bulles diminue

Pression ambiante – 4 atm

PIERREH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bégin

M-Values et VPM-Values

A la remontée

- La P. ambiante diminue
- La charge des compartiments va diminuer
- La taille des bulles augmente

Pression ambiante – 2 atm

PIERREH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bégin

L'algorithme du volume critique

Profil trop conservatif pour les plongée proche de la « courbe de sécurité »

L'algorithme CVA, autorise volontairement le plongeur à dépasser les limites de tension des tissus calculées par l'algorithme de *non-croissance* des bulles car le corps humain peut parfaitement s'accommoder d'un certain volume de gaz non-dissous

Algorithme du volume critique :

On fixe le paramètre *Critical Volume Lambda*

On calcule un profil par itération successive jusqu'à atteindre le volume critique.

Résultats plus conformes à la réalité.

PIERREH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bégin

Comparaison de profils

PIERREH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bégin

VPM – RGBM dans la pratique

- RGBM est implémenté dans le logiciel GAP et dans l'ordinateur HS-Explorer qui comporte également un modèle Haldanien (la sélection du modèle est au choix de l'utilisateur).
- Les autres ordinateurs qui se réclament de RGBM ne s'appuient en réalité que sur des modèles Haldaniens. La mention RGBM n'intervient que pour durcir le profil lors de plongée « à risque » (froid, yoyo, successive, ...).
- VPM est implémenté dans le logiciel Vplanner et dans l'ordinateur VR3 (avec quelques adaptations).

PIERREH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bégin

Références

- <http://www.plongeesout.com/articles/decompression>
- On the Use of a Bubble Formation Model to Calculate Diving Tables – D. E. YOON, Ph.D. and D. C. HOFFMAN, Ph.D.
- The Site of Origin, Evolution and Effects of Decompression Micro-bubbles - T.R. Hennessy
 Traduit de l'anglais par Jean-Marc Belin et Jean Claude Le Péchon
- <ftp://ftp.decompression.org/pub/>

PIERREH - Présentation VPM - juin 2008 - JM Bégin