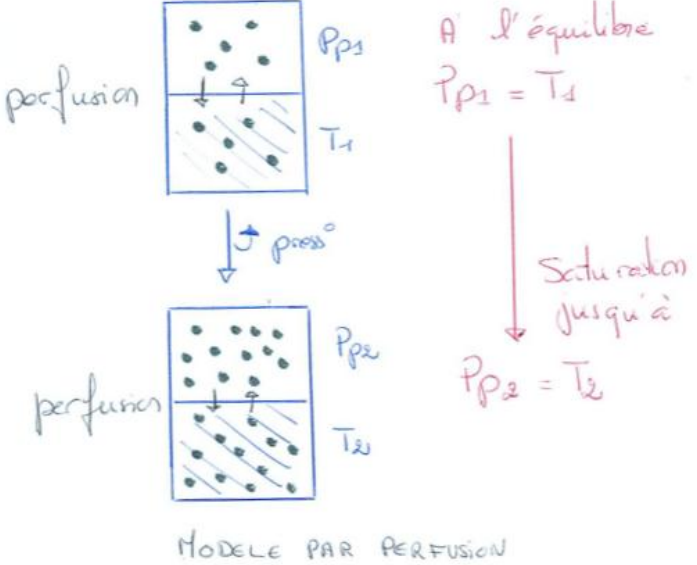


## Modèles de décompression et élaboration des tables

<b>Intro</b>	<p>Guide de palanquée : gestion de la décompression de la palanquée. Comprendre comment se calcule cette décompression</p> <ul style="list-style-type: none"><li>→ Planifier au mieux la plongée et adapter au niveau des plongeurs (ex : pas de paliers obligatoires si première profonde)</li><li>→ Connaître les différences entre les procédures des différents membres de la palanquée pour pouvoir suivre la plus contraignante.</li><li>→ Savoir ce qui est pris en compte et ce qui ne l'est pas en cas de survenue d'incidents non prévus dans le moyen de décompression pris en compte</li></ul> <p>Plan :</p> <ul style="list-style-type: none"><li><b>A. Historique des procédures de décompression</b><ul style="list-style-type: none"><li>A.1/Constats :</li><li>A.2/Travaux</li></ul></li><li><b>B. Le modèle Haldanien</b><ul style="list-style-type: none"><li>B.1/ Un modèle par perfusion</li><li>B.2/ Saturation et désaturation d'un compartiment</li><li>B.2/ Vitesse de remontée et paliers</li><li>B.3/ Conclusion : Notion de modèle</li></ul></li><li><b>C. Un exemple de tables de décompression : les tables MN 90</b><ul style="list-style-type: none"><li>C.1 / 12 compartiments / 12 Sc</li><li>C.2/Plongées successives</li><li>C.3 / Applications</li></ul></li><li><b>D. La décompression à l'aide d'ordinateur</b><ul style="list-style-type: none"><li>D.1/. Les modèles Haldaniens</li><li>D.2/ Les modèles non –Haldaniens : modèles VPM</li><li>D.3/ Les modèles RGBM</li></ul></li></ul>
<b>A. Historique des procédures de décompression</b>  A.1/Constats :	<p><b>18<sup>ème</sup> siècle</b> : Travaux en milieux <b>hyperbares à sec</b> (forages puits, fonçage piliers de pont) → Mal des caissons ( 1<sup>er</sup> décrit en 1846) : difficultés respiratoires, vives douleurs musculaires, accidents cérébraux, comas, morts.</p> <p><b>1755</b> : <b>1eres plongées</b> avec respiration d'air sous-pression</p> <p><b>1819</b> : Découverte du <b>scaphandre à casque</b></p> <p><b>1865</b> : <b>détendeur autonome</b> (Rouquayrol et Denayrouze) → Travaux sous-marins mais <b>nbeux accidents</b></p>

<p><b>A.2/Travaux</b></p>	<p><b>1861 – Bucquoy</b> : Décompression → <b>bulles d'air</b> dans le sang = ADD  Env <b>1865 - Denayrouze</b> : 35 m maxi, 2h30 maxi, vitesse de remontée = 1mètre/min  <b>1878 : Paul Bert</b> → travaux, témoignages, expérience s → publication de « La pression barométrique » :  - explications scientifiques  - rôle spécifique de l'azote dans les ADD  - préconisation d'une vitesse de remontée très lente  → En 1900, 2 plongeurs remontent de 50 m , à une vitesse de 0,5 m /min</p>	
	<p>John Scott Haldane, à la demande de la Marine Anglaise : tables de remontée par paliers (1908)  1908/1958 : Utilisation de ces tables par la Royal Navy.  D'autres pays utilisent ces tables ou en élaborent d'autres.  Ex : En France, Tables GRS (1948) puis GERS (1965)</p>	
<p><b>B. Le modèle Haldanien</b>  <b>B.1/ Un modèle par perfusion</b></p> <p><u>Pré-requis</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Loi de Henry</li> <li>- Tension</li> </ul> <p><u>Notions</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perfusion</li> <li>- Compartiment</li> </ul>	 <p>MODELE PAR PERFUSION</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Loi de Henry (1803)</b>: À température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide</li> <li>✓ <b>Tension</b> = P° du gaz dissoute dans un liquide  Donc, en surface, à saturation : <math>T_{N_2} = P_{p_{N_2}} = P_{abs} \times \% = 1b \times 80\% = 0,8 b</math></li> <li>✓ <b>Perfusion</b> : passage des molécules du milieu le + concentré vers le – concentré (Donc gradient de pression)  ✓ Graphique : Tension en fonction du Tps</li> <li>✓ <b>Compartiment</b> : tissu hypothétique dans lequel le gaz perfuse de manière homogène</li> </ul>
	<p>Hyp 1 : Les échanges entre gaz/ tissu se font comme entre un gaz et un liquide → par perfusion  Hyp 2 : Compartiment = tissu fictif, avec un taux de perfusion homogène</p>	

**B.2/ Saturation et désaturation d'un compartiment**

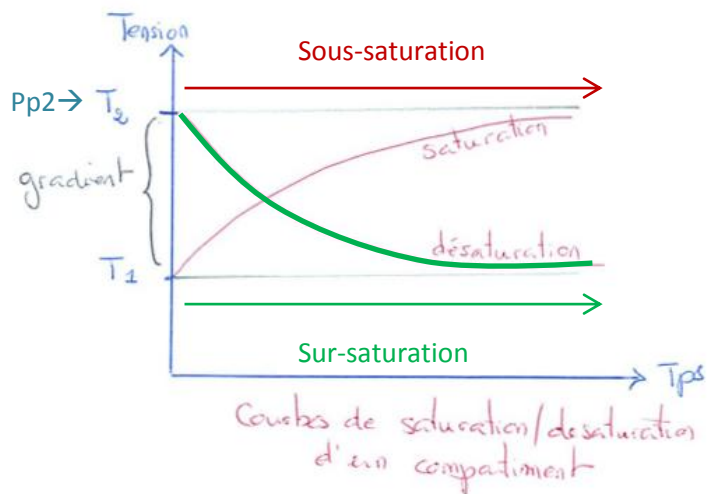
**Notions :**

-Gradient de pression

-Gradient de tension

-symétrie hypothétique saturation/désaturation

-sous- /sursaturation



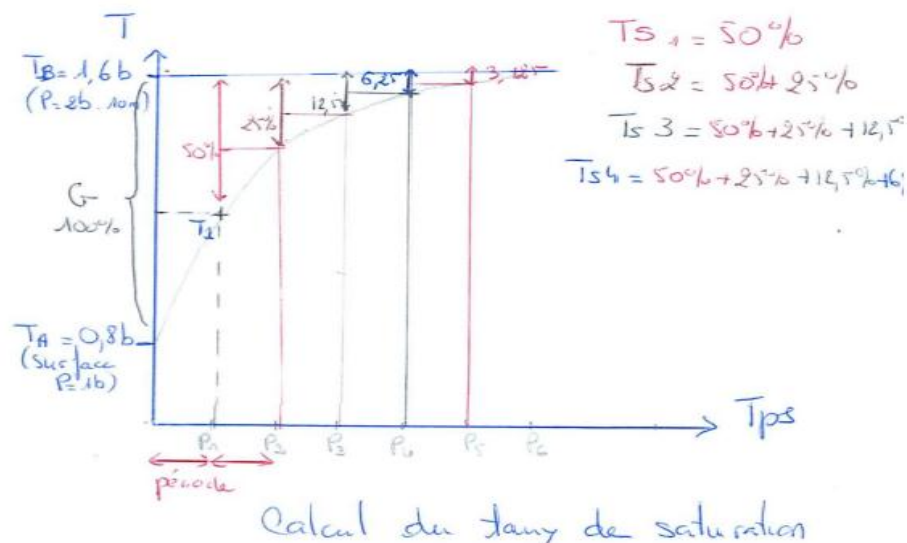
-Gradient de pression : différence  $P_{finale} - P_{initiale}$   
 -Gradient de tension : différence  $T_{finale} - T_{initiale}$   
 = qntité de gaz que le compartiment peut dissoudre

Hyp 3 : on considère une saturation et désaturation symétrique  
 -Temps de saturation / Temps de désaturation  
 -Saturation / Sous-saturation / Sur-saturation

**A quelle vitesse se charge un compartiment ?**

-Période

-Taux de saturation



$T_1 = 0,8 b + (1,6 - 0,8) \times 50 \%$   
 $T_{N2} = T_{initiale} + \text{Gdient} \times T_s$   
 $T_{N2} = T_{iniale} + (T_{finale} - T_{initiale}) \times T_s$

**Période :** Tps nécessaire pour un tissu de dissoudre 50% du gradient = temps nécessaire pour dissoudre la moitié de la quantité qui peut être dissoute

Chaque compartiment à une période qui lui est propre.

Taux de saturation $T_s$		
Nb de périodes	Calcul du % de saturation	Taux de saturation
1		<b>50%</b>
2	$50 + (100 - 50)/2 = 50 + 25$	<b>75%</b>
3	$75 + (100 - 75)/2 = 75 + 12,5$	<b>87,5 %</b>
4	$87,5 + (100 - 87,5)/2 = 87,5 + 6,25$	<b>93,75 %</b>
5	$93,75 + (100 - 93,75)/2 = 93,75 + 3,125$	<b>96,875 %</b>
6		<b>Proche 100 %</b>

**Vitesse de saturation**

Comparaison vitesse de saturation pour une même période mais avec un gradient  $\neq$  : plus le gradient  $\nearrow$ , plus la vitesse  $\nearrow$

<b>-Haldane :</b> <b>5 compartiments avec</b> <b>Périodes ≠tes</b>	Haldane : ✓ Chaque organe a une période qui lui est propre ✓ Un <b>compartiment</b> = un ensemble d'organes avec la même période ✓ 5 compartiments dans le corps, de période allant de 5 min à 75 minutes		
<b>-Exemple de calculs</b>	Calcul de la $T_{N_2}$ de 3 tissus C30, C10, C5 avec 3 périodes différentes – 30 minutes à 30 mètres $P=4$ bars donc $PpN_2 = 4 \times 0,8b = 3,2 b$ $G = 3,2 - 0,8 = 2,4$ <b>C30</b> → 30 min soit 1 période $T_{N_2} = 0,8 + 50\% \times 2,4$ $= 0,8 + 1,2 = \mathbf{2 b}$ <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td> <b>C10</b> → 30 min soit 3 périodes  <math>T_{N_2} = 0,8 + 87,5\% \times 2,4</math>  <math>= 0,8 + 2,1 = \mathbf{2,9 b}</math> </td> <td> <b>C5</b> → 30 min soit 6 périodes  <math>T_{N_2} = 0,8 + 100\% \times 2,4</math>  <math>= 0,8 + 2,4 = \mathbf{3,2 b} \rightarrow \text{Charge maxi}</math> </td> </tr> </table>	<b>C10</b> → 30 min soit 3 périodes $T_{N_2} = 0,8 + 87,5\% \times 2,4$ $= 0,8 + 2,1 = \mathbf{2,9 b}$	<b>C5</b> → 30 min soit 6 périodes $T_{N_2} = 0,8 + 100\% \times 2,4$ $= 0,8 + 2,4 = \mathbf{3,2 b} \rightarrow \text{Charge maxi}$
<b>C10</b> → 30 min soit 3 périodes $T_{N_2} = 0,8 + 87,5\% \times 2,4$ $= 0,8 + 2,1 = \mathbf{2,9 b}$	<b>C5</b> → 30 min soit 6 périodes $T_{N_2} = 0,8 + 100\% \times 2,4$ $= 0,8 + 2,4 = \mathbf{3,2 b} \rightarrow \text{Charge maxi}$		
<b>B.2/ Vitesse de remontée et paliers</b>	Haldane → <u>constat</u> : pas de troubles si remontée de 12 m à la surface <u>Déduction</u> : Possibilité de remonter en <u>divisant la pression par 2</u>  Le compartiment (avec une tension $T_{N_2}$ ) peut donc supporter une sursaturation équivalente à <b>Pabs/2</b> .  En dessous de ce seuil, pas de dégazage (pour Haldane, mais en fait, micro-bulles) Au-dessus, dégazage anarchique. → Vitesse de remontée variable d'où remontée par paliers, de 3 m en 3 m (10 pieds, unité de mesure anglo-saxonne)		
<b>B.3/ Conclusion : Notion de modèle</b>	✓ Des <b>compartiments</b> qui saturent et désaturent à <b>vitesse différente</b> , en fct : - de leur propre période - du gradient de pression  ✓ Un <b>Différence de pression mini</b> , à ne pas dépasser, qui impose des paliers et une vitesse de remontée < 10 m/min  ✓ Cela reste un modèle car des hypothèses de départ différentes de la réalité physio : 1/ notion de compartiment = région anatomique fictive 2/ on considère une saturation et désaturation symétrique 3/ on considère que les échanges gazeux sont instantanés (comme entre un gaz et un liquide), or il y a des barrières physio : poumons/sang, sang/tissus  ✓ On parle de <b>modèle</b> : théorique soumis à des expérimentations avant validation <u>Limites</u> modèle d'Haldane : - compo de l'air atm et non alvéolaire - uniquement pour plongées simples, non successives.		

**C. Un exemple de tables de décompression : les tables MN 90**

**1990** : tables de la Marine Nationale MN90 ( ! : pas prise en cpte des M-Values)  
 → Référence ffessm pour les examens

**C.1 / 12 compartiments / 12 Sc**

-12 compartiments avec 12 périodes allant de 5 min à 120 min

Lors de la remontée, Pabs diminue plus vite que  $T_{N2} \rightarrow T_{N2} >$  Pabs donc sursaturation

**Seuil de sursaturation S :  $S = T_{N2}/Pabs$**

Si cette différence de P° est trop grande → dégazage anarchique

Rapport entre la  $T_{N2}$  et la Pabsolue ambiante (donc la PpN2 ambiante) en-dessous duquel la désaturation se fait sans dégazage anarchique doit rester ≤ à un seuil : le seuil de sursaturation critique.

**Seuil de sursaturation critique Sc :  $T_{N2}/Pabs \leq Sc$**

Compartiment		P (mn)	Sc
1	C5	5	2,72
2	C7	7	2,54
3	C10	10	2,38
4	C15	15	2,2
5	C20	20	2,04
6	C30	30	1,82
7	C40	40	1,68
8	C50	50	1,61
9	C60	60	1,58
10	C80	80	1,56
11	C100	100	1,55
12	C120	120	1,54

**Exemple de calcul**

**Compartiment directeur**

**Déterminer la profondeur maximale à laquelle on peut remonter les 3 compartiments de l'exemple précédent**

Rappel :

C30 → 30 min soit 1 période  
 $T_{N2} = 0,8 + 50\% \times 2,4$   
 $= 0,8 + 1,2 = 2 \text{ b}$

C10 → 30 min soit 3 périodes  
 $T_{N2} = 0,8 + 87,5\% \times 2,4$   
 $= 0,8 + 2,1 = 2,9 \text{ b}$

C5 → 30 min soit 6 périodes  
 $T_{N2} = 0,8 + 100\% \times 2,4$   
 $= 0,8 + 2,4 = 3,2 \text{ b}$

	$T_{N2} =$	Sc=2,72	$T_{N2}/Sc = Pabs$ minimale	Profondeur palier
C5	$T_{N2} = 3,2b$	Sc=2,72	<b>1,176</b>	<b>1,8 m</b>
C10	$T_{N2} = 2,9b$	Sc=2,38	<b>1,21</b>	<b>2 m</b>
C30	$T_{N2} = 2b$	Sc=1,82	<b>1,09</b>	<b>0,9 m</b>

**Compartiment directeur : 1<sup>er</sup> compartiment à imposer un palier = C10**

<p><b>Exemple 2 :</b></p> <p><b>Courbe de sécurité</b></p>	<p><b>Plongée 20 m – 40 min – A partir du calcul des compartiments, C40 et C5 , profondeur mini à laquelle on peut remonter ?</b></p> <p><math>P=3 \text{ b} \rightarrow Pp = 3 \times 0,8 = 2,4 \text{ b} \rightarrow G=2,4-0,8 = 1,6 \text{ b}</math></p> <p>C40 <math>\rightarrow</math> 1 période <math>\rightarrow</math> 50 % de saturation : <math>TN2 = 0,8 + 1,6 \times 50\% = 0,8 + 0,8 = 1,6 \text{ b}</math> <math>TN2/Sc \rightarrow 1,6/1,68 = 0,95</math></p> <p>C5 <math>\rightarrow</math> 8 périodes <math>\rightarrow</math> 100% de saturation <math>TN2 = 0,8 + 1,6b = 2,4 \text{ b}</math> <math>TN2/Sc \rightarrow 2,4/2,72 = 0,88</math></p> <p><b>Pas de palier obligatoire <math>\rightarrow</math> plongée dans la courbe de sécurité</b></p> <p><b>Désaturation au bout de 120 min, en admettant une remontée directe en surface ?</b></p> <table border="1" data-bbox="448 446 2072 574"> <thead> <tr> <th></th> <th>TN2 fin de plongée</th> <th>Gradient</th> <th>Nb de périodes</th> <th>TN2 après 120 min de désaturation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C5</td> <td>TN2 = 2,4 b</td> <td>2,4-0,8 = 1,6 b</td> <td>24</td> <td>2,4-1,6X100% = 2,4-1,6 = 0,8</td> </tr> <tr> <td>C40</td> <td>TN2 = 1,6 b</td> <td>1,6-0,8 = 0,8 b</td> <td>3</td> <td>1,6-0,8X87,5% = 1,6-0,7 = 0,9</td> </tr> </tbody> </table> <p><math>\Rightarrow</math> <b>Desaturation incomplète...si plongée : plongée successive</b></p>		TN2 fin de plongée	Gradient	Nb de périodes	TN2 après 120 min de désaturation	C5	TN2 = 2,4 b	2,4-0,8 = 1,6 b	24	2,4-1,6X100% = 2,4-1,6 = 0,8	C40	TN2 = 1,6 b	1,6-0,8 = 0,8 b	3	1,6-0,8X87,5% = 1,6-0,7 = 0,9
	TN2 fin de plongée	Gradient	Nb de périodes	TN2 après 120 min de désaturation												
C5	TN2 = 2,4 b	2,4-0,8 = 1,6 b	24	2,4-1,6X100% = 2,4-1,6 = 0,8												
C40	TN2 = 1,6 b	1,6-0,8 = 0,8 b	3	1,6-0,8X87,5% = 1,6-0,7 = 0,9												
<p><b>C.2/Plongées successives</b></p> <p><b>-Azote résiduel : gpe de sortie</b></p> <p><b>-Exemple de calcul : évolution de l'azote résiduel en surface</b></p> <p><b>-Désaturation totale (successive, apnée, effort)</b></p>	<p><math>TN2 &gt; 0,8 \text{ b} \rightarrow</math> azote résiduel = gpe de plongée successive sur les tables</p> <p>Compartiment le plus long pour désaturation totale ? C120</p> <p>Au-delà d'un intervalle de 15 mn, le plongeur est considéré comme un monocompartiment C120 <math>\rightarrow</math> seul le C120 min est pris en considération pour le calcul de la majoration</p> <p>= L'azote résiduel de la table MN90 correspond donc à la TN2 du C120</p> <p><b>TN2 = 1,3 (groupe P au bout d'une heure) – TN2 après 2h en surface ?</b></p> <p>2h = 1 période pour le C120</p> <p><math>G = TN2 \text{ initiale} - TN2 \text{ finale (surface)} = 1,3 - 0,8 = 0,5</math></p> <p><math>TN2 = 1,3 - 0,8 \times 50\% = 1,3 - 0,4 = 0,9</math></p> <p><i>Vérif dans la table : Intervalle de surface = 3h (gpe P au bout d'une heure + 2 h) Désaturation totale : 2h X 6 périodes = 2 X 2 h = 12 h</i></p> <p>Avant 12 h, 12h = délai entre 2 plongées pour ne pas être dans le cadre de successives. 12h = pas d'apnée, pas d'altitude</p>															

<p><b>C.3 / Applications</b></p>	<p><b>1/ A quelle profondeur peut-on rester indéfiniment sans faire de paliers ?</b>  Indéfiniment = Tous les compartiments sont saturés = TN2 max  Si <math>T_{N2}/P_{abs}</math> surface = Sc, le premier à imposer un palier, donc le compartiment directeur est celui qui a le plus petit Sc  Donc Sc= 1,54 (C120)  <math>P_{abs}</math> surface=1</p> <p><math>T_{N2}/P_{abs}</math> surface = Sc <math>\rightarrow T_{N2} = Sc \times P_{abs}</math> surface = 1,54 X 1 = 1,54 b  <math>T_{N2}</math> de 1,54 b correspond à un <math>P_{abs} \times 0,8 = 1,54</math> donc <math>P_{abs} = 1,54/0,8 = 1,925</math> soit 9, 125 m</p> <p><b>2/Justification du retour à mi-profondeur en cas de remontée rapide</b>  A saturation maximale, tous les compartiments sont saturés  C120 a le plus petit Sc (=1,54), il impose la profondeur minimale à laquelle on peut remonter.</p> <p><math>T_{N2}/P_{abs}</math> mini &lt; Sc <math>\rightarrow</math> Si saturation max, <b>TN2 = PpN2 fond</b> <math>\rightarrow P_{abs}</math> fond X 0,8/<math>P_{abs}</math> mini &lt; Sc <math>\rightarrow P_{abs}</math> fond / <math>P_{abs}</math> mini &lt; 1,54/0,8 = 1,925</p> <p>Donc <math>P_{abs}</math> fond / 2 &lt; <math>P_{abs}</math> mini <math>\rightarrow</math> Il s'agit d'une <u>différence de pression</u>, et non de profondeur <math>\rightarrow</math> de passer en profondeur, ça augmente la marge de sécu et c'est plus facile à retenir  <math>\rightarrow</math> Ex à 40 m, <math>P_{abs}</math> fond = 5b, mi-pression = 2,5 b donc 15 m <math>\rightarrow</math> on remonte qu'à 20 m</p>
<p><b>D. La décompression à l'aide d'ordinateur</b>  <b>D.1/. Les modèles Haldaniens</b></p>	<p>-Intégration des tables dans un logiciel qui calcule automatiquement  -Prise en compte du profil de plongée : succession de plongées élémentaires de 1 à 5 s '(ex : Aladin Pro : 2s) <math>\rightarrow</math> calcul de la TN2 actualisé et de la <math>P_{abs}</math> min</p> <p><b>M- Value</b> (Workmann, 1965) : Pour chaque compartiment, le Sc varie en fonction de la profondeur  Tables GERS 65  <b>Bühlmann (années 60 et 70)</b> : Modèle Haldanien + M-values + composition de l'air alvéolaire (dont vapeur d'eau) <math>\rightarrow</math> Elaboration de différentes tables (modèles Bühlmann ou néo-Haldaniens)</p> <p>Modèle Bühlmann : Intégration des M-Value (non prise en compte dans les MN90) = ZH-L12, ZH-LH16, ZH-LH18... 12, 16, 18 M-Value pour chaque compartiment <math>\rightarrow</math> Aladin, Archimède 2, etc...</p> <p><u>Limites</u> : Ce sont les limites du modèle haldanien, même s'il a été perfectionné :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-hypothèses de départ</li> <li>-notion de modèle – différence avec physio</li> <li>-Chaque compartiment sature/désature indépendamment – pas de diffusion d'un compartiment à l'autre.</li> <li>- pas de formation de microbulles en-deça du seuil de sursaturation critique</li> </ul>

<p><b>D.2/ Les modèles non – Haldaniens : modèles VPM</b>      =Varying Permeability Model      =Modèle à perméabilité variable</p>	<p><i>Rappel : Nucléi/micro-bulles</i>  <i>Fin des années 60 : <b>Doppler</b> → présence systématique de bulles dans le sang lors de la remontée = bulles silencieuses éliminées par la ventilation. Ces bulles subissent la loi de Mariotte lors de la décompression.</i></p> <p><u>Facteurs favorisant la formation de nuclei (à l'origine des micro-bulles) :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-état des vaisseaux sanguins</li> <li>-froid</li> <li>-effort, stress</li> <li>-Plongée saturante, etc...</li> </ul> <p>Ces ordi font la part belle à la prise en compte des microbulles.Celles-ci sont totalement absentes du modèle de Haldane qui ne considère la formation de bulles que lors d'un dégazage anarchique (<math>S &gt; S_c</math>)</p> <p><u>Principe :</u> modèles qui gèrent les « bulles » / Durcissement de l'ordi en fonction des facteurs favorisant la formation des micro-bulles</p> <p>Limiter le nb de nucléi – limiter la taille → décompression lente / palier mi-profondeur/paliers plus profonds</p> <p><u>Limites :</u> On modélise une phénomène aléatoire      Disparités entre les individus      Nécessite au plongeur de se connaître pour durcir correctement son ordi</p> <p>Modèle VPM = Ordis : Vplanner, HLplanner (plutôt utilisés par les plongeurs Tek)</p> <p>Conclusion : L'approche d 'haldane va demander de remonter + rapidement vers la limite de sursaturation (pour désaturer).      L'approche VPM impose des paliers profonds pour limiter l'augmentation du volume des bulles.      La méthode de HALDANE reste l'outil le plus employé pour le calcul des décompressions. Aucune autre méthode de calcul n'est arrivée à la détrôner, ni à faire la preuve de sa supériorité.</p>
<p><b>D.3/ Les modèles RGBM</b>      = Reduced Gradient Bubble Model</p>	<p>Bühlmann+ VPM → tables + gestion des bulles      Ex : Marès, Suunto, Uwatec Smart, Galiléo...</p>
<p><b>Conclusion</b></p>	<p>Il n'y a pas de procédure garantissant 0 accident      Approche moderne: La validation d'une procédure de déco s'appuie sur une estimation statistique du risque portant sur un échantillon représentatif d'une population de plongeur donnée (population militaire pour les MN90 ! : pas très représentatif des plongeurs actuels)Message important : le respect strict d'une procédure n'est pas suffisant car elle ne décrit que le comportement dans l'eau et ne prend pas en compte l'état physiologique du plongeur !      Futur possible : personnalisation de la gestion de la déco</p>



