



Eléments de calcul des tables

Objectifs du cours



- Appréhender les principes de calcul des profondeurs et durées des paliers
- Connaître les hypothèses de base utilisées pour le calcul des tables
- Comprendre par le calcul les consignes de sécurité liées au profil de plongé
- *Ce cours n'est pas au programme du N3. Il n'y aura pas de questions le jour de l'examen.*

Histoire



- 3 scientifiques ont contribué à la découverte des règles régissant la désaturation des plongeurs
- John Dalton (1766-1844)
 - Il a énoncé la loi qui porte son nom sur les pressions partielles des différents gaz constituant un mélange gazeux.
- William Henry (1775-1836)
 - Il a énoncé la loi qui porte son nom sur la dissolution des gaz dans les liquides.
- John Scott Haldane (1860-1936)
 - Il a établi, à partir des lois des 2 précédents scientifiques, les premières procédures de décompression en 1907 pour les plongeurs pieds lourds de la Royal Navy
 - Les principes de calcul servent encore aujourd'hui dans l'élaboration de la majorité des tables de plongées (M.N. 90 en particulier) et des programmes des ordinateurs de plongées : on parle de modèle haldanien.

Rappel : loi de Dalton



- La pression d'un mélange gazeux est égale à la somme des pression qu'aurait chacun des gaz s'il occupait seul le volume total
- Formule générique : $P_p \text{ Gaz} = P_{\text{Abs}} \times \%(Gaz)$
- Formule pour l'azote en plongée à l'air :
$$P_p N_2 = P_{\text{Abs}} \times 0.8$$

Rappel : loi de Henry



- A 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.
- Tension d'un gaz dans un liquide : quantité de ce gaz dissous dans ce liquide
 - La tension est notée T .

4 états de saturation possibles



- Equilibre : $T_{(gaz)} = P_{p(Gaz)}$
 - Etat du plongeur avant la plongée simple
- Sous-saturation : $T_{(gaz)} < P_{p(Gaz)}$
 - Etat du plongeur durant la descente
- Sur-saturation : $T_{(gaz)} > P_{p(Gaz)}$
 - Etat du plongeur durant la remontée
- **Sur-saturation critique:**
 - $T_{(gaz)} > P_{p(Gaz)}$
 - $[T_{(gaz)} / P_{Abs}] > \text{Seuil critique}$
 - Formation anarchique de micro-bulles
 - Etat du plongeur en accident de désaturation

Loi de Henry : caractéristique d'un liquide

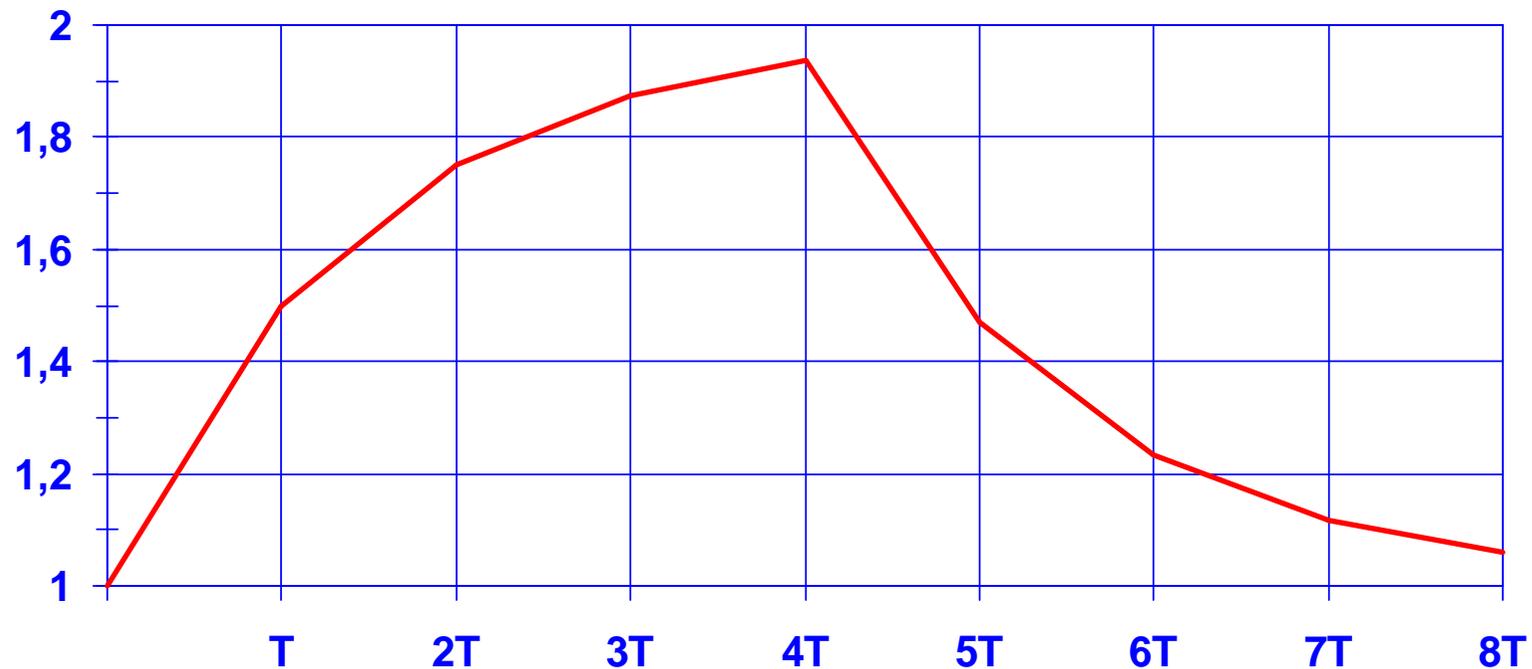


- Un liquide est caractérisé par 2 données : sa période et son seuil critique de sur-saturation
- Période : temps nécessaire pour que l'écart entre la tension du gaz dans le liquide et la pression du gaz sur le liquide soit divisé par 2.
- $T_t = T_{\text{initiale}} + [(T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}) * 0.5]$
- **Seuil critique: ratio $[T_{(\text{gaz})}/P_{\text{Abs}}]$ au-delà duquel il y a désaturation anarchique**

Loi de Henry : période d'un liquide



- Evolution dans le temps de la tension d'un gaz dans un tissu
 - Expérience : on soumet un liquide à une variation de pression.
 - Pression initiale du gaz sur le tissu : 1 bar. Liquide à l'équilibre
 - Pression du gaz sur le liquide pendant 4 périodes : 2 bars
 - Pression du gaz après 4 périodes : 1 bar



Loi de Henry : formule de calcul



- Au bout de 1 période :
 - $T_{1t} = T_{\text{initiale}} + [(T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}) * 0.5] = 1.5 \text{ bar}$
- Au bout de 2 périodes :
 - $T_{2t} = T_{1t} + [(T_{\text{finale}} - T_{1t}) * 0.5]$
 - $T_{2t} = T_{\text{initiale}} + [(T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}) * 0.75] = 1.75 \text{ bar}$
- Au bout de n périodes :
 - $T_{1t} = T_{\text{initiale}} + [(T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}) * (1-0.5^n)]$
- Au bout d'un temps x :
 - $T_{1t} = T_{\text{initiale}} + [(T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}) * 0.5^{(x/t)}]$
 - t : période du liquide

Hypothèse de calcul des tables



1. Le corps humain est modélisé par un certain nombre de liquide, appelé compartiment
 - Ces différents compartiments modélises les différents tissus du corps humain : sang, os, peau, muscle,....
 - Ils ont chacun leur période et leur seuil critique de sur-saturation
 - 12 compartiments ont été pris en compte pour le calcul des M.N. 90
2. Chacun de ces tissus réagit de manière constante, quel que soit l'individu.
3. Tous ces compartiments subissent la même pression partielle d'Azote à chaque instant
4. La pression maximale est prise en compte du début de la plongée jusqu'à la décision de remonter.
5. La vitesse de remontée est constante jusqu'au premier palier et entre chaque palier
 - 15 m/mn jusqu'au premier palier, 6 m/mn entre les paliers pour les M.N. 90

Compartiments utilisés dans les M.N.90

 Pontoise Plongée Club	Compartiment	C ₅	C ₇	C ₁₀	C ₁₅	C ₂₀	C ₃₀	C ₄₀	C ₅₀	C ₆₀	C ₈₀	C ₁₀₀	C ₁₂₀
	Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
	Seuil critique	2.72	2.54	2.38	2.20	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54

Application 1



- Jusqu'à quelle profondeur peut-on rester indéfiniment sans risquer d'accident de désaturation ?

Compartiment	C ₅	C ₇	C ₁₀	C ₁₅	C ₂₀	C ₃₀	C ₄₀	C ₅₀	C ₆₀	C ₈₀	C ₁₀₀	C ₁₂₀
Période	5	7	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120
Seuil critique	2.72	2.54	2.38	2.20	2.04	1.82	1.68	1.61	1.58	1.56	1.55	1.54

- Pression partielle d'azote en surface : 0.8 bar
- Coefficient de sursaturation critique le plus faible : 1.54
- Si on a une tension inférieure ou égale à $1.54 / 1 = 1.54$ bar, on ne risque pas l'accident de désaturation
- A l'équilibre, cette tension est atteinte à une pression absolue de $1.54 / 0.8 = 1.924$ bar, soit une profondeur de **9.24m**.

Application 2

- En ne prenant en compte que les tissus C5, C7, C10 et C15, au bout de combien de temps de plongée devra-t-on faire un palier lors d'une plongée à 30 m ?

La tension en azote dépasse le seuil de sursaturation critique au bout de 15mn pour le C5, 14 mn pour le C7. Des paliers deviennent nécessaires.

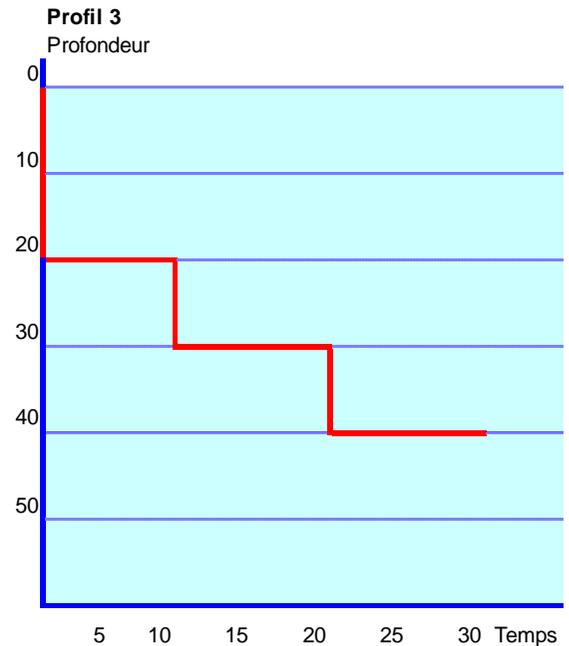
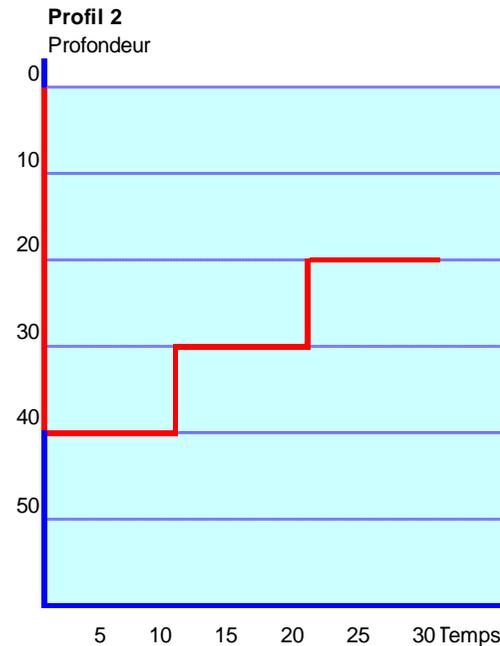
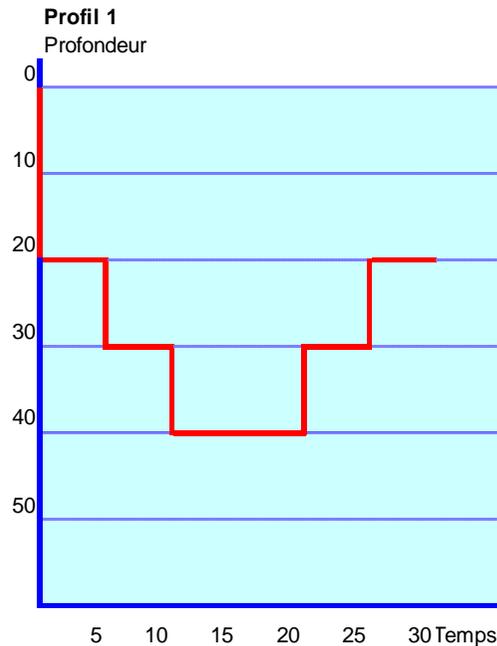
Profondeur : 30 M		Pression partielle N2 à 30 m : 3,2			
Compartiment		C5	C7	C10	C15
Période		5	7	10	15
Sursaturation critique		2,72	2,54	2,38	2,2
Durée	Tension surface	0,8	0,8	0,8	0,8
5 (7)	Ecart tension	2,40	2,40		
	Tension fin de période	2,00	2,00		
10 (-)	Ecart tension	1,20		2,40	
	Tension fin de période	2,60		2,00	
15 (14)	Ecart tension	0,60	1,20		
	Tension fin de période	2,90	2,60		
20 (21)	Ecart tension	0,30	0,60	1,20	2,4
	Tension fin de période	3,05	2,90	2,60	2,0



Application 3



- Soit les 3 profils de plongée suivants :



- Pour chaque profil, répondre aux questions suivantes :
 - Quels sont les paramètres de plongées (temps, profondeur) ?
 - Combien de temps les plongeurs auront passé à 20m? 30m? 40m?
 - Calculer la saturation des compartiments C5 à la fin de la plongée.

Application 3

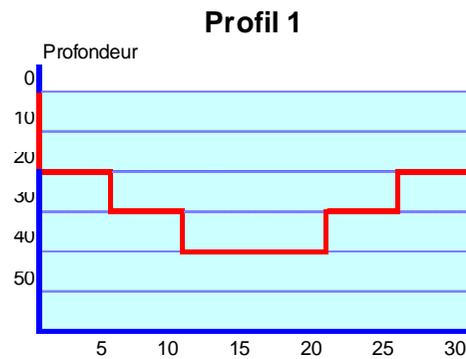


- Mêmes paramètres de plongée pour les 3 profils : 40 m, 30 mn.
- Mêmes durées d'exploration pour les 3 profils : 10 mn à 20m, 10 mn à 30m, 10 mn à 40 m.
- Les plongeurs ont donc vu a priori les mêmes choses, pendant la même durée aussi longtemps.
- Le plaisir des plongeurs a donc été satisfaites de manières équivalentes sur ces 3 plongées.

Application 3

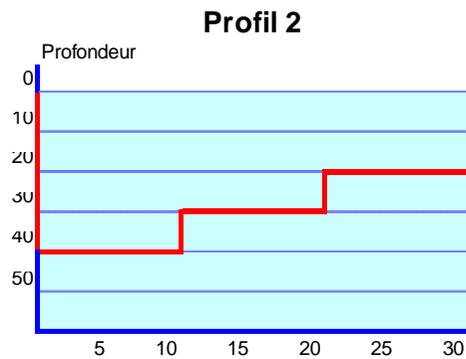


- Tension du C5 en fin de plongées différents :
 - Profil 1 : 2.9 bar Profil 2 : 2.6 bar Profil 3 : 3.725 bar
- La tension du C5 en fin est ~30% plus forte dans le profil 3 que dans le profil 1. Le profil 3 a donc les inconvénients suivants :
 - A l'ordinateur , des temps de paliers accrus
 - Aux tables, une marge de sécurité qui diminue.
 - Un risque d'accident de désaturation plus important

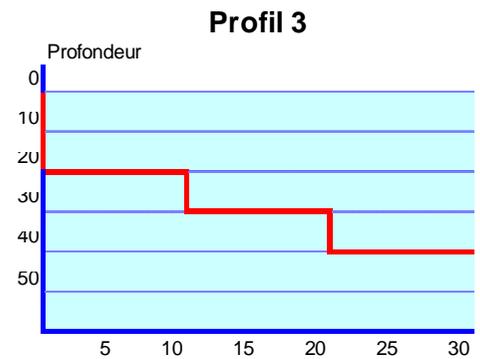


Durée	
Profondeur	
Pression partielle PN2	
Tension début de période	
Ecart PN2	
Tension fin de période	

5	10	15	20	25	30
20	30	40	40	30	20
2,4	3,2	4	4	3,2	2,4
0,8	1,6	2,4	3,2	3,6	3,4
1,6	1,6	1,6	0,8	-0,4	-1
1,6	2,4	3,2	3,6	3,4	2,9



5	10	15	20	25	30
40	40	30	30	20	20
4	4	3,2	3,2	2,4	2,4
0,8	2,4	3,2	3,2	3,2	2,8
3,2	1,6	0	0	-0,8	-0,4
2,4	3,2	3,2	3,2	2,8	2,6



5	10	15	20	25	30
20	20	30	30	40	40
2,4	2,4	3,2	3,2	4	4
0,8	1,6	2	2,6	2,9	3,45
1,6	0,8	1,2	0,6	1,1	0,55
1,6	2	2,6	2,9	3,45	3,725

Rappel des hypothèses de calcul des tables



1. Le corps humain est modélisé par un certain nombre de liquide, appelé compartiment
 - Ces différents compartiments modélises les différents tissus du corps humain : sang, os, peau, muscle,....
 - Ils ont chacun leur période et leur seuil critique de sur-saturation
 - 12 compartiments ont été pris en compte pour le calcul des M.N. 90
2. Chacun de ces tissus réagit de manière constante, quel que soit l'individu.
3. Tous ces compartiments subissent la même pression partielle d'Azote à chaque instant
4. La pression maximale est prise en compte du début de la plongée jusqu'à la décision de remonter.
5. La vitesse de remontée est constante jusqu'au premier palier et entre chaque palier
 - 15 m/mn jusqu'au premier palier, 6 m/mn entre les paliers pour les M.N. 90

Rappel des Hypothèses de calcul des tables



1. **Hypothèse simpliste, loin de refléter la véritable anatomie humaine**
2. **Contre-vérité médicale**
3. **Hypothèse fausse, la majorité des tissus ne sont en contact avec l'air que par l'intermédiaire du sang**
4. **Hypothèse fausse et pénalisante (il en faut bien une), mais non prise en compte par les ordinateurs de plongée**
5. **Si tu arrives réellement à avoir une vitesse parfaitement constante durant toute la remontée, je te présente mes plus grand respects.**

Conclusion



- Les modèles utilisés pour gérer la désaturation des plongeurs ne sont que des modèles mathématiques, qui ne prennent pas en compte tous les paramètres, en particulier la complexité du corps humain et les différences de réaction d'un individu à l'autre.
- L'expérience et les statistiques ont tendance à prouver qu'ils sont fiables.
- Néanmoins, ils ne sont pas fiables à 100%.
- Leur strict respect est impératif pour minimiser le risque.
- Leur respect ne garantit pas la prévention complète des accidents de désaturation.
 - Quelques « accidents immérités » (accidents de désaturation malgré un strict respect des procédures) arrivent chaque année.
- Une surveillance mutuelle s'impose donc après une plongée, même si celle-ci s'est parfaitement déroulée.