

Introduction à la théorie de la décompression dans le cadre des tables US Navy 1993

ULB Sports section plongée, avril 2000
Brevet 4 *

Table des matières

I Introduction

1.1 Rappels : Lois physiques

- 1.11) la pression
- 1.12) la densité
- 1.13) Boyle et Mariotte
- 1.14) Dalton
- 1.15) Henri

1.2) Pourquoi le plongeur n'utilise pas les tables de plongée

II Comment utiliser les tables de plongée

- 2.1) Plongée sans palier
- 2.2) Plongée avec palier
- 2.3) Le coefficient de sursaturation (azote résiduel)
- 2.4) Intervalle et pénalité

III Origine des tables actuelles de plongée

IV Théorie de Haldane

- 4.1) Notions de compartiments et tissus
- 4.2) La saturation et la demi-saturation
- 4.3) Application aux tables des concepts précédents
- 4.4) La sursaturation
- 4.5) Les M de Workman

V Quelques problèmes particuliers

- 5.1) La plongée en altitude
- 5.2) La plongée aux mélanges appauvris en azote

VI Bibliographie

VII Annexes

- 7.1) Table US Navy 1993 complète
- 7.2) Table Lifras 1994

Les tables de plongées

1 Introduction

Plonger c'est tout d'abord pénétrer dans un milieu qui n'est pas le nôtre, l'eau. L'homme vit sur la surface d'un globe dans une atmosphère composée d'air. L'air est un drôle de mélange gazeux. A la louche, 20% d'oxygène et 80% d'azote. L'oxygène, qui est indispensable à notre métabolisme, est aussi très toxique. Heureusement, il est dilué par l'azote, gaz inerte en surface, qui, en même temps qu'il nous sauve, nous menace non seulement de l'ivresse des profondeurs mais aussi de quelques micro-bulles indécélérables. Un cocktail pour le moins paradoxal.

Sous l'eau, ce savant équilibre est bouleversé par une contrainte physiologique : Nos poumons, quoique étant d'incroyables organes, tolèrent très mal les différences de pressions. Cela veut dire qu'ayant quitté la surface pour les profondeurs aquatiques, l'homme doit respirer un gaz qui lui est fourni à la pression ambiante, gérer sa flottabilité et les transitions de pression. Ainsi, il nous faut à nous, plongeurs ou futur plongeur, comprendre quelques mécanismes physiques pour pouvoir exercer notre activité en toute sécurité.

1.1 Rappels : quelques lois physiques utiles

1.11) La Pression : *Une force exercée sur une surface*

Unité légale : *le pascal* **Pa** ou encore le **N/m²**

Autres unités utilisées¹

Le bar	1 bar ↔ 100.000 Pa
L'atmosphère (ATM)	1 atm ↔ 101.325 Pa
Le millimètre de mercure (mmHg)	760 mmHg ↔ 101.325 Pa
Le « feet of sea water » (fsw)	33 fsw ↔ 1 atm
Le « feet of fresh water » (ffw)	34 fsw ↔ 1 atm
Le « pound per square inch » (PSI)	14.7 PSI ↔ 1 atm
Le centimètre d'eau (H ₂ O)	988 cmH ₂ O ↔ 1 atm

1.12) La densité

La densité d'un gaz est le rapport entre la masse volumique du gaz considéré et celle de l'air.

La densité d'un liquide est le rapport entre la masse volumique du gaz considéré et celle de l'eau pure. L'eau de mer est 3% plus dense que l'eau douce².

1.13) La loi de Boyle et Mariotte

A température constante, et pour une quantité de gaz donnée, la pression du gaz est inversement proportionnelle à son volume.

Pression x Volume = Constante

¹ Fst : standard feet ou encore l'unité de longueur US qui vaut approximativement 30,48 cm

² En effet le sel et les autres minéraux en solution dans l'eau de mer augmentent sa masse volumique

1.14) Loi de Dalton

La pression totale exercée par un mélange gazeux est égale à la somme des pressions qui seraient exercées si chacun des gaz occupait seul le volume du mélange initial. La pression de chacun des gaz dans ces conditions est appelée pression partielle PP.

$$\text{Pression totale} = \text{PP gaz 1} + \text{PP gaz 2} + \dots + \text{PP gaz n}$$

$$\text{Pression du Gaz} = \text{Pourcentage du Gaz dans le mélange} \times \text{Pression du mélange}$$

1.15) Loi de Henri

La quantité de gaz qui se dissout dans un liquide est, à température donnée, une fonction de la pression partielle du gaz qui est en contact avec ce liquide et du coefficient de solubilité (a) de ce gaz dans ce liquide.

$$\text{Volume du Gaz} / \text{Volume du liquide} = a \times \text{Pression du Gaz}$$

La solubilité d'un gaz, dans un fluide est fonction de la température, de la surface d'échange et de la quantité présente de gaz et de fluide. Or la température et les surfaces d'échanges (poumons) du corps humain sont relativement constantes. Ainsi, nous pouvons dire sans trop commettre d'erreur, que la quantité d'azote soluble dans l'organisme (quantité constante) est proportionnel à la sa pression. Dans certain ouvrage d'origine francophone on parle de tension pour désigner la pression du gaz en solution.

1.2 Pourquoi le plongeur n'utilise t'il pas les tables de plongée ?

Il n'y a pas ou peu de sujet plus intimidant, pour nous plongeurs, que les tables et de leurs cousins high-tech, les ordinateurs de plongée. Chacun doit apprendre au cours de sa formation à utiliser les tables de décompression. Il apparaît que la plupart des plongeurs aujourd'hui ne consultent que peu ou plus du tout leurs tables au cours de leur plongée. Il existe deux raisons à ce paradoxe :

Il est commun de faire quelques erreurs dans la classe, où l'éclairage est approprié, où on dispose de bureaux, de papier, parfois même d'une calculatrice et de tout le temps nécessaire pour travailler vers une réponse que l'on peut faire corriger. Il est donc bien compréhensible que bien des nouveaux et anciens plongeurs ne se sentent pas à l'aise dans des conditions moins optimales rencontrée en plongée libre.

D'autres plongeurs utilisent un ordinateur qui contrairement aux tables, prennent en compte les plongées multi-niveaux³. Ces ordinateurs donnent aujourd'hui plus de latitude au plongeur que les tables, qui assument une plongée où le temps passé sous eau se fait à la profondeur maximale. Les ordinateurs utilisent des algorithmes complexes de saturation et de désaturation⁴ de l'azote, et sont en soit des tables hyper sophistiquées bien plus sûres que des tables parfois compliquées qui font intervenir le calcul humain.

³ Multi niveau s'entend comme une plongée qui ne se fait pas pendant tout le temps table à la profondeur maximale

⁴ Lorsqu'un gaz se dissout dans un fluide on parlera de saturation, inversement, lorsqu'un gaz quittera sa phase dissoute, on dira dessaturation.

II Comment utilise t'on les tables ?

Avant de discuter des origines des tables, il est utile de faire quelques rappels sur une table moderne : celle de l'**USNavy** par exemple. La plupart des tables fonctionnent de la même manière, qu'elles soient celles utilisées par le PADI, le NAUI ou la FFESSM.

Il apparaît quelques différences notamment concernant la courbe de sécurité, cet ensemble de couples temps profondeurs pour lesquelles aucuns paliers ne dois être effectué lors de la remontéeⁱ.

Cependant, le principe de chaque table reste le même et se divise en 3 ou 4 parties⁵ :

- 1) Le temps de plongée sans palier
- 2) Le temps de plongée avec palier et les temps et profondeurs de ceux-ci
- 3) La quantité d'azote résiduelle
- 4) L'intervalle de temps en surface entre deux immersions

Nous allons prendre le temps de rappeler ces notions, qui lorsque maîtrisées permettent d'utiliser indifféremment une table PADI, FFESSEM ou USNavy. Celle que nous explorerons pour le reste de ce cours est celles de l'USNavy, révision 1993, adoptée et adapté par la LIFRAS ces 20 dernières années.

2.1 Le temps de plongée sans palier USNavy 93.

- La première partie de la table USNavy, celle utilisée par notre fédération, se présente sous la forme d'un tableau où les lignes s'expriment en unité de temps : la minute (min), et les colonnes s'expriment en unité de profondeur, le mètre (m).

- S'il n'existe pas de ligne ou temps approprié, nous nous référons à l'unité de profondeur ou de temps supérieurs.

- La table est limitée tant en temps quand profondeur, et ce pour deux raisons. Toute plongée excédant 66 m sort du cadre de la plongée sportive à l'air (toxicité dangereuse de l'oxygène à une pression partielle $> 1,6$ bar). Toute plongée est limitée par l'air qu'un plongeur autonome sait transporter.

Profondeur et pression : attention !

A l'origine la table s'exprime en « feet of sea water (fsw) », une mesure américaine de pression équivalente à un 33^{ième} d'une atmosphère ou encore 33 fsw $\Leftrightarrow$ 1 atm. Aussi,

t		Pal.		t		Paliers		t		Paliers		t		Paliers	
(min)	s	(min)	s	(min)	s	(min)	s	(min)	s	(min)	s	(min)	s	(min)	s
3 m		18 m		27 m		42 m		45 m		60 m		64 m		67 m	
60 A	15	20 C		10	15	C E	F	5	10	C E	G	5	10	15	2
120 B	20	D		15	20	E F	G	10	15	G H	I	10	15	20	4
6 m	25	E		20	25	F G	H	15	20	I J	K	15	20	25	7
50 B	30	F		25	30	G H	J	20	25	J K		20	25	30	10
100 D	40	G		30	40	H J		25	30			25	30	35	13
9 m	50	H		40	50	I J	M	30	35			30	35	40	16
30 B	55	I		50	55	J M		35	40			35	40	45	19
45 C	60	J		55	60			40	45	C E	G	40	45	50	22
60 D	70	K		60				45	50	G H	I	45	50	55	25
75 E	80	L		65				50	55	H I	J	50	55	60	28
95 F				70				55	60	I J	K	55	60	65	31
120 G				75				60	65	J K		60	65	70	34
12 m				80				65	70	K L		65	70	75	37
15 B				85				70	75			70	75	80	40
25 C				90				75	80			75	80	85	43
30 D				95				80	85			80	85	90	46
40 E				100				85	90			85	90	95	49
50 F								90	95			90	95	100	52
70 G								95	100			95	100		55
80 H								100				100			58
100 I															61
15 m		24 m		36 m		54 m		57 m		82 m		85 m		88 m	
15 C	5	B		5	10	C D		5	10	5	10	5	10	5	10
25 D	10			10	15	D E		10	15	10	15	10	15	10	15
30 E	15	C		15	20	E F		15	20	15	20	15	20	15	20
40 F	20	D		20	25	F G		20	25	20	25	20	25	20	25
50 G	25	E		25	30	G H		25	30	25	30	25	30	25	30
60 H	30	F		30	35	H I		30	35	30	35	30	35	30	35
70 I	35	G		35	40	I J		35	40	35	40	35	40	35	40
80 J	40	H		40	45	J K		40	45	40	45	40	45	40	45
90 K	50	K		45	50	K L		45	50	45	50	45	50	45	50
100 L	60	L		50	60			50	60	50	60	50	60	50	60

⁵ Le PADI et le NAUI ainsi que de nombreuses autres fédérations estiment que les plongées qui font appels aux paliers ne font pas partie de la plongée sportive et donc ne fournissent pas ou très peu de données sur les paliers de décompression.

dans un souci de simplification, la FEBRAS a traduit cette unité en mètre d'eau sans préciser s'il s'agissait d'eau douce ou d'eau de mer.

Elle a aussi arrondi chacun des résultats de conversion métrique vers l'entier inférieur. Ces deux opérations sont heureusement dans le sens de la sécurité : en effet lorsque la plongée s'effectue en eau douce, la pression d'un mètre d'eau douce est inférieure à celle d'un mètre d'eau de mer, (l'eau de mer est environ 1,03 fois plus dense que l'eau douce⁶). Aussi, une plongée effectuée en mer à 40 m équivaut à une plongée à 38,8 m en carrière.

Notons que la majorité des profondimètres sont étalonnés en mètre d'eau de mer. Ils indiquent donc en eau douce une profondeur inférieure à la profondeur réelle, c'est entre autre pourquoi les constructeurs ne garantissent qu'une précision de l'ordre du mètre pour leurs instruments.

Temps de plongée sans palier ou plongée unitaire

Lorsque l'on lit la table, on s'aperçoit que pour certains couples temps, profondeur aucun palier n'est mentionné. Cela veut dire par exemple, qu'après 75 minutes passées à 15 mètres, un plongeur peut faire surface pour autant qu'il respecte la vitesse de remontée de 10 m/min et qu'il n'ait pas accumulé d'azote lors d'une plongée précédente endéans 12 heuresⁱⁱ. La figure 2 exprime l'ensemble de ces couples dans un tableau. Les indices dits de sursaturations seront repris dans un chapitre ultérieur, cependant, il ressort de ce tableau une constatation importante : Non seulement, la quantité d'azote (mesuré par cet indice) qui se dissout dans le sang est proportionnelle à sa pression partielle⁷ (78% de la pression ambiante), mais aussi proportionnelle au temps d'exposition.

La durée de plongée, ou encore **le temps table**, est le temps exprimé en minutes entières, qui s'écoule entre le moment de l'immersion et celui où l'on entame la remontée vers la surface à une vitesse constante de 10m/min. C'est la durée qui doit être prise pour les tables.

La durée totale de plongée, est le temps exprimé en minutes entières, qui s'écoule entre le moment de l'immersion et celui où l'on arrive à la surface.

Prof.	Durée limite	Indices de sursaturation														
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
3		60	120	210	300											
4.5		35	70	110	160	225	350									
6		25	50	75	100	135	180	240	325							
7.5		20	35	55	75	100	125	160	195	245	315					
9		15	30	45	60	75	95	120	145	170	205	250	310			
10.5	310	5	15	25	40	50	60	80	100	120	140	160	190	220	270	310
12	200	5	15	25	30	40	50	70	80	100	110	130	150	170	200	
15	100		10	15	25	30	40	50	60	70	80	90	100			
18	60		10	15	20	25	30	40	50	55	60					
21	50		5	10	15	20	30	35	40	45	50					
24	40		5	10	15	20	25	30	35	40						
27	30		5	10	12	15	20	25	30							
30	25		5					20	25							
33	20			5	10	13	15									
36	15			5	10	12	15									
39	10			5	8	10										
42	10			5	7	10										
45	5			5												
48	5				5											
51	5				5											
54	5				5											
57	5				5											

⁶ Ou encore, 33 feet of sea water $\Leftrightarrow$ 1 atmosphère $\Leftrightarrow$ 34 feet of fresh water

⁷ Voir lois physiques : Loi de Henri.

2.2) Le temps de plongée avec palier et les temps et profondeurs de ceux-ci

Un palier est un arrêt lors de la remontée à une profondeur et pendant un temps déterminé par les tables, qui permet à l'organisme de se débarrasser de l'azote excédentaire. (Voir infra : les mécanismes de décompression)

Un palier de sécurité est un arrêt à 3 m pendant 5 minutes, qui n'est pas précisé dans les tables, et qui s'effectue de manière à accroître la marge de sécurité qu'offre les tables. Il s'effectue uniquement dans de bonnes conditions de houle, de température, de courant, etc.

2.3) L'azote résiduel

Dans la figure 2, l'indice de sursaturation mesure la quantité excédentaire d'azote que l'organisme a accumulé pendant la plongée. On parle de « quantité excédentaire » de manière à la différencier de l'état d'équilibre à la surface⁸. Il se mesure par des lettres de l'alphabet, de la lettre A à Z, pour la plongée sportive le coefficient limite acceptable pour procédé à une successive est la lettre N.

2.4) L'intervalle de temps en surface entre deux immersions

Il se calcule théoriquement dès l'arrivée à la surface après la première plongée et le moment où l'on va entamer la descente pour la seconde plongée, aussi appelée **plongée successive**.

En pratique, il se calcule entre la sortie de l'eau de la première plongée et la mise à l'eau de la seconde, ajoutant ainsi une nouvelle marge de sécurité. Cet intervalle permet ensuite par une table annexe de calculer l'azote résiduel de la première plongée, et d'en tenir compte pour la successive.

On appelle pénalité le temps en minute que l'on doit rajouter au temps table lors de la seconde plongée. Ce temps simule une plongée qui accumulerait autant d'azote que la quantité résiduelle d'azote présente dans l'organisme après l'intervalle entre la précédente plongée et celle en cours.

En théorie, après 12 heures d'intervalle, la table prévoit que l'azote excédentaire est totalement éliminé. En réalité ce n'est pas vraiment le cas (cf. Loi exponentielle).

III Quelles sont les origines des tables de plongées ?

INTERVALLES ENTRE LES PLONGÉES (de h:min. à h:min.)															
A															0:10 12:00
B															0:10 3:21 3:20 12:00
C															0:10 1:40 4:50 1:39 4:49 12:00
D															0:10 1:10 2:39 5:49 1:09 2:38 5:48 12:00
E															0:10 0:55 1:58 3:25 6:35 0:54 1:57 3:24 6:34 12:00
F															0:10 0:46 1:30 2:29 3:58 7:06 0:45 1:29 2:28 3:57 7:05 12:00
G															0:10 0:41 1:16 2:00 2:59 4:26 7:36 0:40 1:15 1:59 2:58 4:25 7:35 12:00
H															0:10 0:37 1:07 1:42 2:24 3:21 4:50 8:00 0:36 1:06 1:41 2:23 3:20 4:49 7:59 12:00
I															0:10 0:34 1:00 1:30 2:03 2:45 3:44 5:13 8:22 0:33 0:59 1:29 2:02 2:44 3:43 5:12 8:21 12:00
J															0:10 0:32 0:55 1:20 1:48 2:21 3:05 4:03 5:41 8:51 0:31 0:54 1:19 1:47 2:20 3:04 4:02 5:40 8:50 12:00
K															0:10 0:29 0:50 1:12 1:36 2:04 2:39 3:22 4:20 5:49 8:59 0:28 0:49 1:11 1:35 2:03 2:38 3:21 4:19 5:48 8:58 12:00
L															0:10 0:27 0:46 1:05 1:26 1:50 2:20 2:54 3:37 4:36 6:03 9:13 0:26 0:45 1:04 1:25 1:49 2:19 2:53 3:36 4:35 6:02 9:12 12:00
M															0:10 0:26 0:43 1:00 1:19 1:40 2:06 2:35 3:09 3:53 4:50 6:19 9:29 0:25 0:42 0:59 1:18 1:39 2:05 2:34 3:08 3:52 4:49 6:18 9:28 12:00
N															0:10 0:25 0:40 0:55 1:12 1:31 1:54 2:19 2:48 3:23 4:05 5:04 6:33 9:44 0:24 0:39 0:54 1:11 1:30 1:53 2:18 2:47 3:22 4:04 5:03 6:32 9:43 12:00
Prof. (m)	N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	
3															
6															
9	469	349	279	229	190	159	132	109	88	70	54	39	25	12	
12	213	187	161	138	116	101	87	73	61	49	37	25	17	7	
15	142	124	111	99	87	76	66	56	47	38	29	21	13	6	
18	107	97	88	79	70	61	52	44	36	30	24	17	11	5	
21	87	80	72	64	57	50	43	37	31	26	20	15	9	4	
24	73	68	61	54	48	43	38	32	28	23	18	13	8	4	
27	64	58	53	47	43	38	33	29	24	20	16	11	7	3	
30	57	52	48	43	38	34	30	26	22	18	14	10	7	3	
33	51	47	42	38	34	31	27	24	20	16	13	10	6	3	
36	46	43	39	35	32	28	25	21	18	15	12	9	6	3	
39	40	38	35	31	28	25	22	19	16	13	11	8	6	3	
42	38	35	32	29	26	23	20	18	15	12	10	7	5	2	
45	35	32	30	27	24	22	19	17	14	12	9	7	5	2	
48	33	31	28	26	23	20	18	16	13	11	9	6	4	2	
51	31	29	26	24	22	19	17	15	12	10	8	6	4	2	
54	29	27	25	22	20	18	16	14	11	10	8	6	4	2	
57	28	26	24	21	19	17	15	13	10	10	8	6	4	2	
PÉNALISATIONS EN MINUTES															

⁸ Corollaire de la loi de Henri : à l'équilibre, la pression du gaz dissout est égale à la pression du gaz à la surface du liquide considéré.

Les premières tables de plongées ont été développées par un britannique, John Scott Haldane et ses collègues entre 1906 et 1908, et ce, suite aux premières expériences de décompression en chambre hyperbarique sur des chèvres. Les symptômes les plus communs observés sur ces animaux, 85 en tout, furent une difficulté de tenir debout sur certaines de leurs jambes, démontrant le phénomène de « bends » ou encore l'accident de décompression au niveau des articulations.

Ces chercheurs démontrèrent qu'il était possible d'éviter ces « bends » lorsque la pression ambiante ne variait pas de plus de la moitié à un moment quelconque. Ainsi, dans le caisson de compression, une chèvre pouvait passer de 6 atm à 3 atm, ou de 4 atm à 2 atm, sans développer de « bends ». Un changement de pression supérieur à ce ratio 2 :1 provoquait chez certaines bêtes les symptômes des « bends ».

Paul Bert⁹, physiologiste français du siècle précédent avait déjà postulé que la décompression devait se faire de manière lente pour éviter les accidents de décompression. Cependant, aucune de ses expériences n'avait démontré quel taux de décompression était efficace.

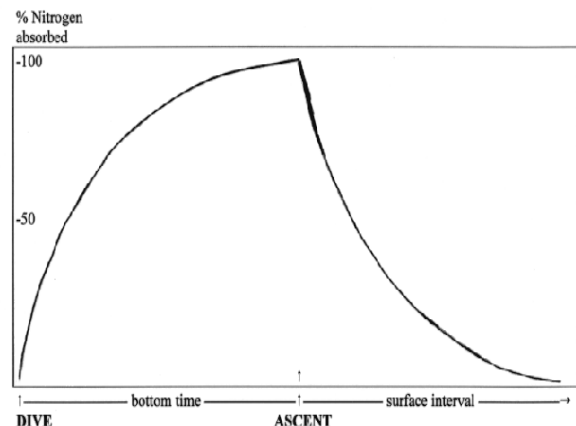
Aujourd'hui, il n'existe toujours pas de théories qui permettent de décrire, prévoir ou prévenir l'ensemble des observations relatives aux accidents de décompression. Toutefois, il semblerait que la théorie originelle de Haldane ait été au cours du temps celle qui donna le plus de résultats probants. Les balbutiements de la théorie des micro bulles, et les développements de la théorie de Buhlman n'ont toujours pas égalé la robustesse du modèle Haldane.

⁹ Paul Bert, 1833-1886, aussi connu pour ses travaux sur la toxicité de l'oxygène pour le système nerveux.

IV Théorie de Haldane

Selon la théorie de Haldane, la dissolution d'azote dans un fluide ainsi que le phénomène contraire à savoir le passage de la phase en solution à celle gazeuse suit une loi de type exponentielle. Le taux d'absorption d'azote par le liquide est le plus grand lorsqu'il y a une variation positive de pression ambiante et ralentit avec le temps. De manière similaire, le taux de rejet d'azote est le plus grand au moment d'une variation négative de pression ambiante, et ralentit au cours du temps.

Haldane a postulé que ces taux d'absorption et de rejet sont les mêmes : par exemple s'il faut à la suite d'une augmentation de la pression ambiante, 2 heures pour complètement dissoudre de l'azote dans un fluide, il faudra alors 2 heures pour complètement rejeter cet azote lorsque la pression retrouvera son niveau initial. Dans la figure ci-contre, la croissance et décroissance exponentielle de l'azote dans un tissu avec un changement de pression ambiante.



4.1) Les compartiments et tissus

Haldane savait aussi que le taux d'absorption et d'élimination d'azote n'est pas uniforme dans l'organisme. Il existe un spectre quasi infini de taux selon les différents types de tissus formant notre corps, et même pour les tissus identiques mais appartenant à deux organes différents. Cet éventail trouve son origine non seulement dans la multitude de coefficients de solubilité de l'azote pour chacun des tissus, (cornée, sang, muscle, tendons, os, etc.), mais aussi dans les différents taux d'irrigation et de perfusion du sang pour ces tissus.

Cette perfusion varie donc en fonction des tissus, (inexistante pour la cornée de l'œil, très haute pour les nerfs et tissus cérébraux). Pour prendre en compte ces différents tissus, et l'énorme éventail des perfusions, les développeurs de tables postulèrent un nombre fixes de « compartiments », chacun avec sa propre « période de demi-saturation ». Il est important de comprendre que ces compartiments ne sont pas de réelles parties anatomiques, ni même des certains types de tissus, mais une modélisation théorique qui tente de couvrir l'éventail des taux possibles d'absorption et de rejet d'azote dans l'organisme.

L'idée derrière l'utilisation de compartiment est d'approximer ce qui se passe en réalité dans l'organisme. Plutôt que de se soucier des périodes de demi-saturation pour chaque tissu et leur irrigation sanguine, les scientifiques (commençant par Haldane) dirent ceci : « Divisons tous les tissus et leurs variations respectives de perfusions sanguines en compartiments. Si nous incluons les tissus ayant la plus courte période de demi-saturation (en générale 5 minutes) et ceux ayant les plus longues (plusieurs heures), nous devrions pouvoir simuler ce qui se passe réellement dans l'organisme. »

Haldane et ses collègues prirent en compte de cette façon 5 compartiments avec des périodes de demi-saturation respectives de 5, 10, 20, 40, et 75 minutes.

4.2) Qu'est ce que la « saturation » ?

La « saturation » et la « période de demi-saturation » sont deux concepts fondamentaux qui entrent en jeu dans l'élaboration des tables de décompression. Les modèles pour les tables et ordinateurs reposent sur des suppositions de période de demi-saturations jusqu'à « pleine saturation » pour divers compartiments, ceux-ci regroupant divers tissus.

Dans le contexte de la théorie de décompression, la saturation désigne à quel point un tissu est chargé de gaz¹⁰. Les tissus peuvent être sous-saturés, partiellement saturés, ou complètement saturé d'azote. La pleine saturation indique que le tissu considéré contient la quantité maximale de gaz pour la pression considérée. Cela veut aussi dire que la pression du gaz dissous dans le tissu doit être égale à la pression ambiante. Ainsi, le terme de saturation, pour les gaz inertes¹¹ se réfère non seulement à la quantité de gaz dissout mais aussi à la pression du gaz dissout.

Une période de demi-saturation dans le contexte d'une fonction exponentielle est le temps qu'il faut pour remplir un tissu ou compartiment donné, (réciproquement pour le vider) de la moitié de la quantité maximale d'azote soluble à une pression donnée. Le tissu tel la graisse, qui possède un haut taux d'affinité pour l'azote, a une relativement longue période de demi-saturation car la perfusion sanguine y est lente tandis que le tissu nerveux a une période de demi-saturation plus courte car la perfusion sanguine y est plus rapide. Le plus rapide des tissus est bien évidemment le sang qui est quasi directement en contact avec l'air respiré (au travers des alvéoles pulmonaires). Cependant il n'est pas repris dans les compartiments pris en compte pour nos tables.

Voyons comment un seul compartiment, avec une période de demi-saturation de 20 minutes évolue lorsqu'il passe de 1 à 2 atmosphères (plongée à l'air jusqu'à 10 mètres). Un compartiment de période de demi-saturation 20 minute saturera jusqu'à moitié de la pression ambiante d'azote :

Tableau 2 : période de demi-saturations jusqu'à saturation à l'azote, pour un compartiment de 20 minutes, à une profondeur de 10 mètres

Demi-saturation	Longueur demi-saturation (min)	Temps total passé (min)	Pourcentage de saturation	Pression N ₂ dans	
				Poumons	Compartiment
Première	20	20	50 %	1.56	1.17
Deuxième	20	40	75 %	1.56	1.365
Troisième	20	60	87.5 %	1.56	1.46
Quatrième	20	80	93.75 %	1.56	1.51
Cinquième	20	100	96.875 %	1.56	1.535
Sixième	20	120	98.5 %	1.56	1.55

* mesuré en atmosphère d'azote

Mathématiquement, une courbe exponentielle n'atteint jamais 100 %, on dit qu'elle tend asymptotiquement vers 100 % lorsque le temps croît. Pour des raisons pratiques dans l'élaboration des tables, on considère qu'après 6 demi-saturations un tissu est soit totalement saturé, soit totalement dessaturé. En effet introduire une nouvelle demi-saturation n'apporterait que 0,75 % de précision en plus.

4.3) Que font donc la période de demi-saturation et la saturation dans les tables ?

¹⁰ Dans le cadre de la plongée Tech, l'azote peut être remplacé par tout gaz inerte, tel par exemple l'hélium.

¹¹ Un gaz inerte ne réagit pas avec l'organisme.

Haldane constata que s'il pouvait mesurer quels changements de pression tolérerait l'organisme, ainsi que ses différents compartiments et leur demi-saturations respectives, il devait être en mesure de construire une table qui permettrait d'éviter l'accident de décompression.

De manière expérimentale il détermina que si à aucun moment l'organisme n'était soumis à une chute de plus de 50%, les « bends » n'apparaissaient pas chez ses chèvres. Aussi, il conclut à tort qu'il était sûr de plonger de manière indéfinie à 10 mètres et remonter en surface.

Tableau 3 : Saturation en azote à une profondeur de 40 mètres après 20 minutes pour les compartiments de 5, 10, 20, 40 et 80 minutes

Demi-saturation (min)	Nbr. périodes	Pourcentage saturation	PP. N₂ compartiment	PP. N₂ ⇒ variation 2 :1	Equivalent en mètre
5	4	93.75 %	2.97	1.49	9,1
10	2	75 %	2.54	1.27	6.3
20	1	50 %	1.95	0.98	2.6
40	0.5	25%	1.37	< 0.78	Surface
80	0.25	12.5 %	1.16	< 0.78	Surface

La dernière colonne indique la limite à ne pas franchir à la remontée pour chacun des compartiments. Si le plongeur remonte au-dessus de 9,1 m de profondeur, il excèdera la limite fixée par le ratio 2 : 1¹², et risque de subir un ADD. En France, on parle de gradient, plutôt que de ratio. Le gradient est la variation par différence (contrairement au ration qui est la différence en rapport) des pression et tension de l'azote.

La table USNavy tient en compte 6 compartiments principaux et 3 supplémentaires prévus pour des successives et plongées profondes de demi-saturations (en minutes) : 5, 10, 20, 40, 80, 120 + 160, 200, 240. Ainsi en 6 demi-saturations, le tissu 240 est dessaturé en 12 heures.

4.4) Qu'est ce que la sursaturation ?

La sursaturation apparaît lorsque la pression d'azote dans les tissus est plus haute que la pression ambiante d'azote. En réalité, cet état de sursaturation survient toujours à la remontée. La sursaturation n'est pas un problème lorsqu'elle est contrôlée. Si la sursaturation est trop grande, l'azote dissout dans les tissus n'a pas le temps d'être éliminé. Des bulles se forment car la pression d'azote de tissus sursaturés est simplement trop grande pour être totalement dissout dans le sang. En un sens, la sursaturation va main dans la main avec la décompression.

4.5) Les M de Workman

En pratique on s'est rendu compte que le ratio critique 2 :1 de Haldane ne satisfaisait pas à tous les tissus. Workman travailla sur ces ratios critiques en postulant que pour chaque compartiment et chaque pression initiale correspondait un ratio critique particulier. Ces ratios, repris dans une table aujourd'hui abandonnée par le simple

¹² Ce ratio, parfois appelé ratio critique n'est pas constant et les tables modernes font varier celui-ci en fonction de la pression ambiante. Ceci a donné jour aux tables de conversion de Workman.

plongeur, sont non seulement encore d'actualité mais aussi un des éléments fondamentaux de la théorie de décompression.

5 Quelques problèmes particuliers

5.1) La plongée en altitude

La plongée en altitude pose un problème au niveau du ratio critique. En effet, la pression atmosphérique est plus faible en altitude qu'à la surface de la mer¹³. Ainsi le ratio critique est menacé par une variation de pression plus importante lorsque l'on fait surface.

Les tables USNavy ne sont prévues que pour les plongées n'excédant pas une altitude de 700 m ou une pression atmosphérique de 930 mbar. Pour pouvoir les utiliser au-delà de cette altitude, elle requière une procédure spéciale.

En effet, lors de la saturation, les tissus habitués à une pression atmosphérique plus faible sont soumis à une variation relative de pression plus importante qu'au niveau de la mer. Intuitivement, on déduit que la profondeur réelle atteinte doit être ajustée. Comme nous l'avons vu précédemment les tissus saturent et dessaturent en fonction du différentiel de pression surface-profondeur atteinte. L'altitude se traduit donc par écart de pression plus grand. Au niveau de la mer ce même écart s'obtiendrait par une profondeur plus importante. Ainsi pour pouvoir utiliser les tables, nous devons corriger la profondeur maximale atteinte en plongée en altitude par un coefficient :

- 1) Ce coefficient (**C**) est égal au rapport entre la pression atmosphérique au niveau de la mer (**Pmer**) et la pression atmosphérique du lieu de plongée (**Palt**) :

$$C = P_{mer} / P_{alt}$$

- 2) Pour obtenir la profondeur fictive (**Pfict**) d'entrée dans les tables, on multiplie la profondeur réelle (**Préel**) par le coefficient (**C**) :

$$P_{fict} = P_{réel} \times C$$

- 3) De même, le ratio critique modifie la profondeur à laquelle doivent se faire les paliers. Aussi pour conserver le même différentiel de pression entre la profondeur du palier et la surface, nous devons diminuer celle-ci pour compenser l'écart excédentaire dû à l'altitude.

Pour obtenir la profondeur des paliers en altitude (**PPalt**), on divise la profondeur table des paliers (**PPtab**) par le coefficient (**C**) :

$$PP_{alt} = PP_{tab} / C$$

- 3) De même, l'altitude modifie la vitesse de remontée, de la même manière que pour les paliers : Pour obtenir la vitesse de remontée en altitude (**Valt**), on divise la vitesse de remontée table (**Vtab**) par le coefficient (**C**) :

$$V_{alt} = V_{tab} / C$$

¹³ Dû essentiellement au poids d'une colonne d'air et la compressibilité des gaz : Moins haute est la colonne d'air, plus faible sera son poids et a fortiori sa pression à sa base. De même l'air y sera moins dense, donc moins lourd.

Remarques :

Il n'est pas toujours possible de connaître la pression atmosphérique en un endroit donné. Pour cela il existe deux solutions : soit on plonge avec un profondimètre tube de Bourbon¹⁴, ou tout autre profondimètre permettant un étalonnage au départ de la plongée, soit on fait appel à une table de conversion (cf. annexe 3).

5.2) La plongée au mélange, notamment au Nitrox¹⁵

Contrairement à la plongée en altitude, le coefficient critique ici ne joue aucun rôle car c'est le pourcentage en azote dans les mélanges nitrox respiré en plongé qui est diminué. Un mélange contenant X % d'azote, respiré à une profondeur où la pression ambiante est P atm peut s'assimiler à une plongée à l'air (79 % N₂) à une profondeur de pression P' atm. Notre souci ici est de garder invariant la pression partielle en azote (**PPN₂**) qui sature nos tissus.

$$\begin{aligned} \text{PPN}_2 \text{ mélange} &= X * P \text{ ambiante} \\ \text{PPN}_2 \text{ air} &= 0.79 * P \text{ ambiante} \\ P \text{ ambiante} &= P \text{ atmosphérique} + P \text{ H}_2\text{O} \\ (P + 1) * X &= (P' + 1) * 0.79 \end{aligned}$$

On en déduit la formule de la profondeur équivalente :

$$\text{Prof. Equivalente} = \left[\frac{X \times (P + 1)}{0.79} \right] - 10$$

¹⁴ Cet instrument mesure directement la profondeur fictive, puisqu'il dépend lui-même de la pression atmosphérique.

¹⁵ Les nitrox (safe air ou EANx), sont des mélanges gazeux composés d'oxygène et d'azote dont les proportions sont différentes de dans l'air. Les Nitrox I et II, par exemple, ont les proportions O₂ / N₂ relative 32% / 68% et 36% / 64%.

VI Bibliographie

- 1) US Navy Diving Manual, *Vol 1 (Air Diving) et vol 2 (Mixed Gas Diving)*, Best Publishing.
- 2) NOAA Diving Manual, 3rd edition, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- 3) PADI, *advanced training manual for OW divers*
- 4) Farde Lifras
- 5) Lang MA, Hamilton RW. *Proceedings of the American Academy of Underwater Sciences*.
- 6) Stangroom JE. Decompression Demystified. *Modern decompression theory in plain english*. The Hope Valley Press. Ed 1991.
- 7) Lawrence Martin. *Scuba Diving Explained*, Physiology and medical aspects of scuba diving. <http://www.mtsinai.org/pulmonary/books/scuba/sectionj.htm>

VII Annexes

7.1) Table US Navy 1993 complète

7.2) Table Lifras 1994

ⁱ Ici, on considèrera, à tort, que le temps de remontée, n'est pas un palier à proprement dit, or, nous le verrons plus tard, ce temps de remontée ou vitesse de remontée est un véritable palier de décompression.

ⁱⁱ La table USNavy considère qu'après 12 heures, un plongeur sera totalement débarrassé de l'azote accumulé au cours d'une précédente plongée.