

CAEN PLONGÉE	NIVEAU 4	2008/2009
--------------	----------	-----------

La plongée (4^{ème} partie)

Référence : Niveau 4
Auteur: MICHEL Guy
Statut: Validé

Historique des versions

Version	Date	Résumé des modifications	Marques de révision
1.0	2006-03-05	Document initial	Non
1.1	2009-02-24	Corrections	Non

Source documentaire

Référence	Auteur	Titre	Date
[Nancy]	E. GEORGES	Niveau IV Capaciatire	21/08/2001
[Foret]	A. FORET P. TORRES	Plongée plaisir Niveau 4 et 5	08/2003
[VAGNON]	P MEDAILIN D. RICOU	Plongée niveau 4	12/2000
[ZOMBERG]	Gérard ZONBERG	Eléments de calcul de tables	11/1998
[CAEN PLONGEE]	Caen Plongée	Caen Plongée niveau 3 et 4	2005-2008

1. Plan	3
2. Rappel	3
2.1 Loi de Dalton	3
2.2 Loi de Henry	3
2.3 Ventilation et échanges gazeux.....	3
2.4 Un peu d'histoire.....	4
3. Les procédures de décompression	4
3.1 Un peu de vocabulaire et quelques définitions.....	4
3.1.1 Tension	4
3.1.2 Période	5
3.1.2.1 Approche du gradient et définition de la période.....	5
3.1.2.2 Approche du milieu, alternative à l'approche du gradient et définition de la période	5
3.1.2.3 Représentation graphique et synthèses.....	6
3.1.3 Désaturation, coefficient de sursaturation, seuil critique	7
3.1.4 Modélisation.....	8
3.1.4.1 Le(s) modèle(s) Haldanien.....	8
3.1.4.2 Autres modèles [ZOMBERG].....	9
3.1.5 Exemple et calculs.....	9
4. Les tables MN 90	10
4.1 Courbe de sécurité (rappels niveau 2)	10
4.2 Pour finir	10

1. Plan

Lors de la respiration, il y'a échange gazeux entre l'organisme et le mélange respiré. La respiration est composée de la ventilation (mécanismes physiques) et de la diffusion (échange des gaz). Cet échange, la diffusion, existe en surface. Il est modifié en plongée lors de la descente, durant la plongée et lors de la remontée. Il est proposé d'étudier le comment et le pourquoi.

2. Rappel

Ce cours s'inscrit dans une progression logique s'appuyant sur un certain nombre de notions abordées précédemment.

2.1 Loi de Dalton

$$P_{\text{ression}} P_{\text{artielle}} = P_{\text{ression}} A_{\text{bsolue}} \times \% \text{gaz}$$

Équation 1: Loi n°1 de Dalton

$$P_{\text{ression}} A_{\text{bsolue}} = P_{\text{ression}} P_{\text{artiel}} \text{Gaz1} + P_{\text{ression}} P_{\text{artiel}} \text{Gaz2} + P_{\text{ression}} P_{\text{artiel}} \text{Gaz3} \dots$$

Équation 2 : Loi n°2 de Dalton

Question : Calculez la $P_{\text{ression}} P_{\text{artielle}}$ de l'azote (N_2) au niveau de la mer ?

Réponse : $1 \times (80\%) = 1 \times 0,8 = 0,8 \text{ bar}$

2.2 Loi de Henry

A température donnée, la quantité de gaz dissoute à saturation dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle du gaz au-dessus de ce liquide.

Équation 3 : Loi de Henry

Question : Que veut dire saturation ?

Réponse : Equilibre des échanges entre le liquide et le mélange gazeux (échange permanent entre les deux milieux de quantité égale).

2.3 Ventilation et échanges gazeux

Les pressions partielles évoluent beaucoup lors d'une plongée. Un mécanisme physiologique évolué permet d'alimenter en oxygène les organes et d'éliminer le dioxyde de carbone produit.

L'oxygène est consommé en partie (on néglige donc ce gaz). Le dioxyde de carbone est présent en quantité négligeable et est endogène (production constante par l'organisme

quelque soit la pression absolue donc la profondeur). Nous nous intéressons donc au devenir de l'azote durant la plongée.

2.4 Un peu d'histoire

Les accidents de décompression et les maladies de décompression sont des phénomènes observés assez récemment, principalement milieu du 19^{ème} siècles.

Il est alors identifié comme le « mal des caissons ». Cela se passe, par exemple, dans un milieu de 2 à 4 bars pour des personnes fournissant un effort musculaire important pendant plusieurs. SJ Haldane va reprendre les résultats des physiiciens contemporains pour valider un modèle mathématique du comportement physiologique et fournir des règles de sécurité à respecter pour éviter les accidents du travail.

3. Les procédures de décompression

Pour comprendre l'approche scientifique du phénomène physiologique, définissons quelques termes.

3.1 Un peu de vocabulaire et quelques définitions

3.1.1 Tension

La tension d'un gaz dans un liquide en contact avec un mélange gazeux est la quantité de gaz dissoute dans le liquide à saturation. Cela correspond (proportionnel dicit Henry) à la pression partielle du gaz dans le mélange gazeux.

On admet que la pression partielle en milieu gazeux est égale à la Tension en milieu liquide à saturation (Pour les calculs que nous allons effectuer, nous acceptons d'ignorer le coefficient de proportionnalité car les résultats s'appuient sur des rapports de valeur).

- Saturation : $T_{N_2} = PP_{N_2}$ équilibre des échanges (autant dans un sens que dans l'autre).
- $T_{N_2} < PP_{N_2}$, le gaz se dissout dans le liquide (il y'a proportionnellement plus de gaz à passer du mélange gazeux vers le liquide que du liquide vers le mélange gazeux).
- $T_{N_2} > PP_{N_2}$, le gaz dissout dans le liquide passe dans le mélange gazeux (il y'a proportionnellement plus de gaz à passer du liquide vers le mélange gazeux que du mélange gazeux vers le liquide).

Quels sont les facteurs intervenants sur ces échanges ?

- Pression : profondeur de la plongée
- Temps : durée de la plongée
- Surface de contact : vascularisation des tissus, perfusion: poumons, capillaires, tissus
- Agitation : toute activité physique produit l'accélération du rythme cardio-respiratoire et par suite de la dissolution de l'azote.
- Température : Celle du corps (37°C). Attention aux plongées en eaux froides qui augmente la dissolution
- Nature du liquide : La solubilité des gaz est plus grande dans l'huile que dans l'eau. Il en est de même dans les liquides (graisses, tissus nerveux) ce qui a des conséquences en plongée, sur la charge (ou la décharge).

- Nature du gaz : air ou autres mélanges connus. La solubilité de l'azote est supérieure à la solubilité de l'hélium, ce qui veut dire qu'à saturation, la quantité d'azote dissoute est supérieure à la quantité d'hélium (la proportionnalité introduite par Henry, qu'on néglige dans les calculs, intervient à ces deux derniers niveaux).

Problème : Calculer la tension d'azote et d'oxygène dans de l'eau contenu dans un seau posé sur le ponton d'embarcation de Ouistreham.

Solution : On admet que la pression ambiante est de un bar et que les différents gaz sont à saturation dans l'eau (surface de l'eau exposé depuis suffisamment de temps à cette pression constante). $PP_{N_2}=1 \times 79/100=0.79$ et $PP_{O_2}=1 \times 21/100=0.21$. Comme nous sommes à saturation, $T_{N_2}=0.79$ et $T_{O_2}=0.21$. Remarquons que $0.79 \text{ b} + 0.21 \text{ b} = 1 \text{ b}$, valeur de la pression ambiante au niveau de la mer (illustration de la loi n°2 de Dalton)

3.1.2 Période

Soit un liquide en contact avec un mélange gazeux à saturation (c'est-à-dire à l'équilibre). Soumettons l'ensemble à une variation de pression. Les pressions partielles du mélange gazeux varient. Les tensions à saturation dans le liquide changent aussi. Nous allons détailler la dynamique des ces modifications (vitesse et modèle d'évolution).

En fait, l'échange ne se fait pas de façon constante (linéaire), modèle qui nous est le plus familier. C'est-à-dire que l'échange ne sera pas deux fois plus important si on attend deux fois plus de temps. Cela serait trop simple et retirerait beaucoup d'intérêt à la plongée☺.

Pour comprendre cette dynamique, il va nous falloir introduire une des deux notions suivante au choix (quitte à en appréhender qu'une seule, choisissez la deuxième, les deux approches sont équivalentes).

3.1.2.1 Approche du gradient et définition de la période

Le changement de pression dans un milieu peut être caractérisé par deux critères :

- le gradient G (différence entre la tension initiale et la tension à saturation dans les nouvelles conditions pour un gaz donné dans le liquide)

$$G = T_{\text{gaz à } P_{\text{ression } I_{\text{initiale}}} - T_{\text{gaz à } P_{\text{ression } F_{\text{finale}}}}$$

Équation 4 : Gradient

- le temps de transition pour passer de l'état initial à l'état final (nouvelle saturation).

Une période est le laps de temps qu'il faut pour que le gradient soit divisé par deux. On constate expérimentalement que la période est une constante.

3.1.2.2 Approche du milieu, alternative à l'approche du gradient et définition de la période

Soit T_i la tension initiale, T_f la tension finale à saturation et T_t la tension à l'instant t dans le liquide pour un gaz donné. Une période, noté T , est le temps nécessaire pour que la différence

de tension soit divisé par deux. Cela signifie qu'après T secondes, nous avons l'égalité suivante:

$$T_t = (T_i + T_f) / 2$$

Équation 5 : Milieu

On constate, la aussi, expérimentalement que la période est une constante.

3.1.2.3 Représentation graphique et synthèses

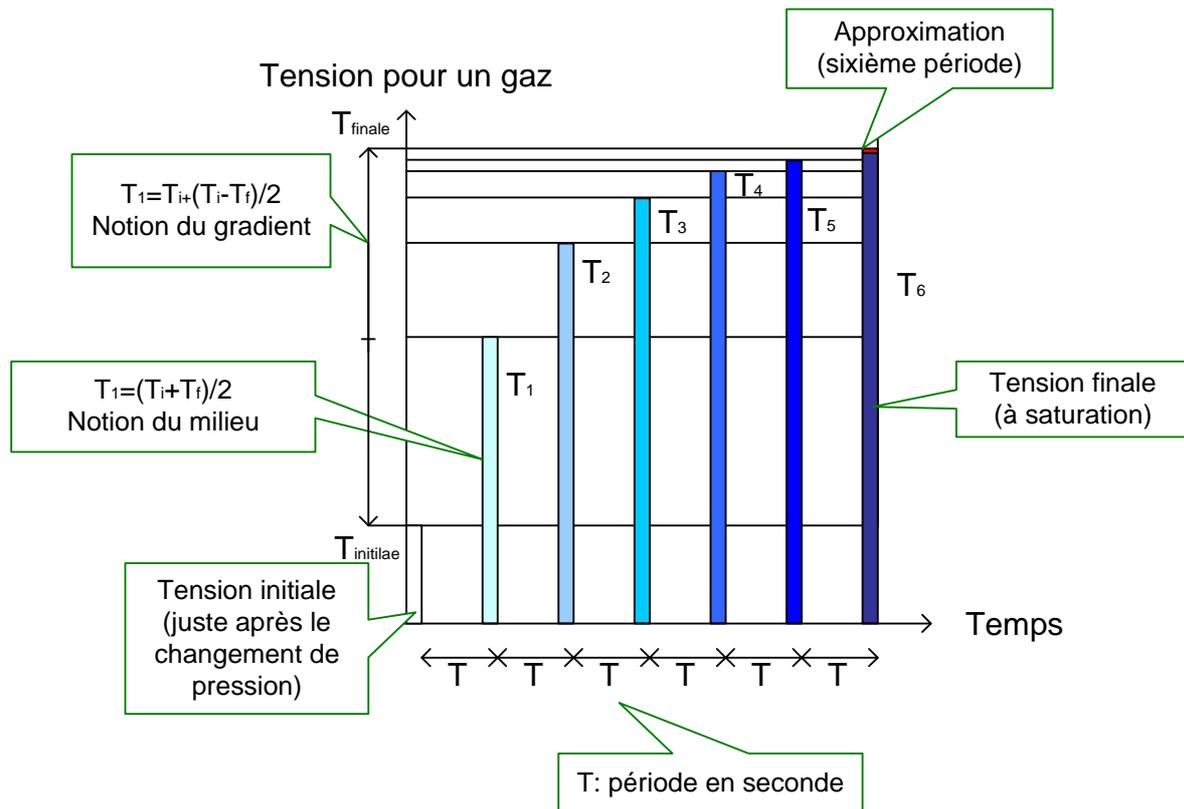


Figure 1: Notion de période et de cycles.

Quel que soit l'approche, il a été démontré empiriquement (expériences physiques) que ce laps de temps, la période, est une constante lors de la phase de saturation. Par exemple, le temps pour passer d'un état de tension T_2 à T_3 est le même que pour passer de T_4 à T_5 .

Remarque : après une période, 50 % des échanges gazeux pour atteindre la saturation est effective, après deux périodes il y'en a 75%, trois périodes il y'en a 87.5, quatre périodes il y'en a 93.75%, cinq périodes il y'en a 96.875% et six périodes il y'en a 98.4375.

Nous admettons (approximation) que la saturation est complète après six périodes.

Problème : Calculer la tension d'azote dans un liquide de période 30 minutes soumis à une pression ambiante de 3 bars et exposé à l'air ambiant pendant 1h30 alors que la tension initiale était de 0.79 bar.

Solution :

Pour un liquide de période 30 minutes, 1h30 représente 3 périodes.

*La tension finale à 3 bars se calcule de la façon suivante : $T_{finale} = 0.79 * 3$ soit **2.37 bar**.*

La période étant de 30 minutes, il faut calculer 3 cycles d'échange gazeux. Soit T_i la tension en N_2 au bout de i périodes. Il a été vu que $T_6 = T_{finale}$. Donc T_1 la tension en azote au bout de 1 période, T_2 la tension en azote au bout de 2 périodes et T_3 la tension en azote au bout de 3 périodes.

Par la technique du gradient :

Premier cycle : $G=2.37-0.79=1.58$ donc $T_1=0.79+(1.58/2)=1.58$

Deuxième cycle : $G_2=2.37-1.58=0.79$ donc $T_2=1.58+(0.79/2)=1.975$

Troisième cycle : $G_3=2.37-1.975=0.395$ donc $T_3=1.975+(0.395/2)=2.1725$

Par la technique du milieu (plus simple, non ?):

Premier cycle : $T_1=(2.37+0.79)/2=1.58$

Deuxième cycle : $T_2=(2.37+1.58)/2=1.975$

Troisième cycle : $T_3=(2.37+1.975)/2=2.1725$

Les résultats sont identiques, une chance.

3.1.3 Désaturation, coefficient de sursaturation, seuil critique

La saturation d'un liquide ne pose pas de problèmes (si ce n'est un possible réchauffement, mais en plongée, on n'est pas concerné).

La désaturation, quand à elle, peut être de deux natures :

[Expérience de la bouteille de limonade. Ouverture du bouchon, qui fait chuter la pression ambiante dans la bouteille, à vitesse lente, rapide...]

- Désaturation contrôlée : pas de formation de bulles gazeuses dans le liquide, les conditions listées en 3.1.1 suffisent à assurer les échanges gazeux et permettent à la surcharge de gaz dissous de s'évacuer par échange naturel au niveau de la zone de contact.
- Désaturation incontrôlée ou anarchique : formation de bulles gazeuses dans le liquide, les conditions listées en 3.1.1 ne suffisent plus à assurer les échanges gazeux et ne permettent pas à la surcharge de gaz dissous de s'évacuer par échange naturel au niveau de la zone de contact, cette surcharge se matérialise alors sous forme gazeuse au niveau du liquide.

On va donc définir le coefficient de sursaturation qui traduit la notion de surcharge en mélange gazeux dans un liquide lors de la phase de désaturation.

Coefficient de sursaturation $CS = TN_2 / \text{Pression ambiante}$.

Équation 6 : Coefficient de sursaturation

On va donc définir, pour un liquide donné, une valeur de surcharge à ne pas dépasser. Cette valeur caractérise le liquide donné et sa tolérance à supporter les surcharges. Cette valeur varie d'un liquide à l'autre (eau, huile, vinaigre...).

Coefficient Seuil critique (CSc) : limite de coefficient de sursaturation n'entraînant pas de désaturation incontrôlée.

On doit toujours respecter :

CS ≤ CSc

Équation 7 : Coefficient Seuil Critique

Les seuils critiques sont calculés de façon empirique par des expériences de physique (liquide connu) ou par une approche statistique (liquide non appréhendable).

3.1.4 Modélisation

Une modélisation est une représentation scientifique d'un phénomène naturel.

3.1.4.1 Le(s) modèle(s) Haldanien

John Scott Haldane (1860-1936) va partir de la simplification suivante : le corps humain est composé pour l'essentiel de liquide. Donc les observations effectuées sur les flacons peuvent être transposées au vivant. En trouvant les échantillons représentatifs de liquides existant dans la nature ou aux caractéristiques inventées mais permettant de s'adapter aux observations faites sur les veaux, vaches, moutons, femme et enfants (Madame Haldane et Haldane junior ont participé aux expériences dans un caisson installé dans le salon du chercheur), il est possible de calculer des **tables de décompression**.

Le modèle initial de JS Haldane comporte 5 compartiments de périodes 5, 10, 20, 40 et 75 minutes et un seul seuil critique commun (CSc = 2). La vitesse de remontée (vitesse de décompression) est alors de 10 m/minutes (il faut fixer cette valeur pour pouvoir trouver expérimentalement le CSc). Les arrêts sont fixés en pieds (donc 3 mètres, 6 mètres, 9 mètres, 12 mètres... en unités universelles).

JS Haldane ignorait l'existence des micro-bulles (mise en évidence du phénomène à la deuxième moitié du 20^{ème} siècle), il considérait que l'organisme se comporte comme si tous les compartiments le modélisant étaient irrigués (donc subissaient les phénomènes de saturation) de la même façon (même vitesse), il estimait que le phénomène de saturation et désaturation étaient symétrique...

Les tables MN90 sont une amélioration de ce modèle. Il comporte douze compartiments ayant chacun un seuil critique propre (calcul expérimental et approche statistique).

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

Tableau 1: Compartiments tables MN 90, périodes et seuil critique

Il est important de réaliser que ces compartiments sont des représentations naïves de ce qu'il se passe dans l'organisme. Le terme de tissus est souvent employé en lieu et place de compartiment. Cela est impropre (mais en fait guère gênant si on se souvient que l'objectif est de plonger). Il sera question de compartiments rapides (tissus rapides) pour les périodes courtes (exemple, le sang aurait un comportement proche de ceux-ci) et de compartiments lents (tissus lents) pour les périodes longues (exemple, les os seraient plutôt lent par leur nature et leur faible vascularité).

Malgré les améliorations, ces tables conservent les erreurs d'origines. Néanmoins, les marges de sécurité introduites permettent leur utilisation dans le cadre du loisir de façon sécurisante

(possibilité d'un accident "gratuit" en respectant le cadre imposé par l'utilisation des tables MN 90 de 1 sur 10 000).

3.1.4.2 Autres modèles [ZOMBERG]

Il y a d'abord les dérivées du modèle de Haldane :

- Tables du Dr Bühlmann qui utilisent l'air alvéolaire au lieu de l'air atmosphérique comme référence de gaz respiré et utilisent des coefficients de sursaturations critiques variants avec la profondeur (notion de M-Value).
- Le modèle du Dr Spencer utilisé par l'US Navy et qui se base sur le phénomène des bulles circulantes. Il suppose que tout l'azote n'est pas dissous et que des microbulles circulent avec le sang.

Il y a ensuite les modèles complètement différents du modèle de Haldane :

- Le modèle de Hempleman se base sur les lois de diffusion d'un gaz dans un milieu non vascularisé c'est à dire le passage direct des molécules d'azote d'un milieu à un autre en dehors des vaisseaux sanguins et lymphatiques.
- Le modèle E.L. (Exponentiel Linéaire) développé par Thalmann pour l'US Navy postule une charge exponentielle comme dans le modèle de Haldane mais une décharge linéaire (suivant une ligne droite).

Il existe encore de nombreux modèles dont s'inspirent parfois les ordinateurs de plongée. Il est donc intéressant de s'informer du modèle utilisé par un appareil que l'on voudrait acheter.

3.1.5 Exemple et calculs

Problème : Calculer la tension d'azote finale pour des compartiments ($C_5 : 5'$, $C_{30} : 30'$, $C_{60} : 60'$ et $C_{120} : 120'$) lors d'une simulation de plongée d'une durée de 2 heures à 50 mètres de profondeur (départ à saturation à la pression atmosphérique). En ne retenant que ces quatre compartiments, le plongeur, peut-il remonter directement à la surface ? Sinon à quelle profondeur doit-il faire un premier palier lors de sa remontée ? $CSc C_5=2.72$, $CSc C_{30}=1.82$, $CSc C_{60}=1.58$, $CSc C_{120}=1.54$.

Solution : Tension N_2 Initiale=0.8 bar. Tension N_2 Saturation=4.8 bar

Nombre de période pour $C_5 = 24$, Nombre de période pour $C_{30} = 4$, Nombre de période pour $C_{60} = 2$, Nombre de période pour $C_{120} = 1$

Tension N_2 Finale $C_5 = 4.8$, Tension N_2 Finale $C_{30} = 4.55$, Tension N_2 Finale $C_{60} = 3.8$, Tension N_2 Finale $C_{120} = 2.8$.

La pression ambiante sous laquelle il ne faut pas dépasser (donc la profondeur sous laquelle il ne faut pas remonter) est donnée par la formule suivante

$$P_{\text{ression}} A_{\text{mbiante}} = TN_2 / CSc$$

Équation 7 : Profondeur limite à ne pas dépasser

On calcul, pour chaque compartiments, la profondeur pour laquelle le coefficient de sursaturation atteint le seuil critique (Equation 7).

$PAC_5 = 4.8 / 2.72 = 1.764$ donc il faut rester sous 7 mètres 64

$PAC_{30} = 4 / 1.82 = 2.5$ donc il faut rester sous 15 mètres

$PAC_{60} = 3.8 / 1.58 = 2.405$ donc il faut rester sous 14 mètres 05

$PAC_{120} = 2.8 / 1.54 = 1.818$ donc il faut rester sous 8 mètres 18

Un compartiment impose un palier le plus profond : le C_{30} impose un palier à 15 mètres.

On appelle ce compartiment le **compartiment directeur**.

Remarque : pour une plongée à 50 mètres, on se limitera à une plongée ne dépassant pas le 20 minutes (exemple : 15 minutes sur le Léopoldville à Cherbourg).

Ce modèle est éloigné des réalités physiologiques. Il donne des résultats. Il a aussi des limites.

4. Les tables MN 90

On peut citer comme autres tables : G.E.R.S 65 (dangereuse entre 20 et 40 et peut pratique), C.O.M.E.X. 74 (ne plus utiliser), C.O.M.E.X. 91 (plongée professionnelle), M.T. 92 (Ministère du Travail, plongée professionnelle), U.S. NAVY, P.A.D.I. (dérivée de l' U.S. NAVY avec des limites), Bühlmann (utilisée par les ordinateurs)...

Un plongeur peut utiliser les tables qu'il veut dans le cadre de la FFESSM. Par contre la FFESSM impose l'utilisation des tables M.N. 90 lors des exercices et des examens des brevets fédéraux.

Le compartiment directeur est le compartiment le plus « atteint » (notion tenant compte de la tension d'azote et du seuil critique).

4.1 Courbe de sécurité (rappels niveau 2)

La courbe de sécurité délimite le type de plongées ne nécessitant pas de paliers de décompressions (aucuns des compartiments n'atteint un seuil critique de saturation)

Prof	12	15	18	20	22	25	28	30	35	38	40
Durée	135	75	50	40	35	20	15	10	10	5	5

Tableau 1 : Courbe de sécurité

Question : considérant qu'on ne tient compte que du compartiment 120 pour les plongées très longues, à quelle profondeur peut-on rester indéfiniment sans faire de paliers (selon les tables MN90) ?

Réponse : $S^c = T_{N_2} / P_{absolue}$ donc à la surface $T_{N_2} = 1.54 \text{ bar}$.

*$P_{absolue} = 1.54 * 100 / 80 = 1.925 \text{ bar}$ soit une profondeur de 9.25m*

4.2 Pour finir

En se rattachant à ces éléments de calcul de table il est possible de faire plusieurs remarques concrètes dans le quotient et la sécurité du plongeur :

- Le compartiment de plus longue durée est de 120 minutes (c'est un choix) et on considère que l'équilibre est atteint au bout de 6 périodes, il faut donc attendre 12 heures (6×120 minutes) pour estimer ne plus avoir de dettes d'azotes. Cela correspond aux 12 heures à attendre pour ne pas avoir d'azote résiduel, donc ne pas être concerné par les plongées successives. A titre de contre exemple, les SUUNTO gèrent des compartiments de 240 minutes, ils considéreront donc comme série de plongée (plongées successives), toutes les plongées effectuées les dernières 24 heures.

CAEN PLONGÉE	NIVEAU 4	2008/2009
--------------	----------	-----------

- L'azote résiduel, dans le cadre de plongée successive, est obtenu en ne retenant que le compartiment C_{120} .
- Il ne faut pas mélanger les procédures de sécurité. On ne peut pas compenser une remontée trop rapide par un temps de palier allongé. Les paliers sont calculés pour une situation expérimentale donnée (remontée à 15 mètres minutes, ce qui permet d'ignorer les effets des micros-bulles). Si ce cadre n'est pas respecté, il n'est plus applicable. C'est pour cela que la procédure d'urgence de retourner à mi profondeur en moins de 3 minutes (temps pour que les effets liés aux micro-bulles, entre autre, se manifeste) et d'y rester 5 minutes (temps pour que le filtre pulmonaire puisse "traiter" l'ensemble de ces micros-bulles) est imposé. Cela permet de reprendre le processus de décompression dans le cadre des MN 90.

Donc, bonnes plongées et gardez à l'esprit ce qui fait la pertinence des procédures de décompression que nous utilisons dans le cadre de notre activité de loisir.