

CAP DIVE, école de plongée

Thierry Moulin

ON REPLONGE DANS

LA THEORIE

Fascicule 2



Ça commence en général par un baptême, par le bonheur de respirer sous l'eau, en apesanteur. Très vite la découverte conjointe de la vie sous-marine et de la technique excite notre curiosité et nous pousse à vouloir aller plus loin (pas forcément plus profond !).

Le plaisir de la plongée sous-marine est étroitement lié à la sécurité. C'est la raison pour laquelle l'évolution d'un plongeur passe obligatoirement par l'intégration progressive de certaines notions techniques.

Le but de ce site est de présenter certaines de ces notions d'une part aux débutants par des pages accessibles sans connaissances préalables, d'autre part aux plongeurs qui souhaitent se perfectionner.

● Quelques exemples :

Les néophytes se demandent peut-être ce que sont ces fameux **paliers de décompressions**? Parmi les pages ne nécessitant pas de connaissances préalables, vous pourrez également visiter celle qui présente les contraintes de la **plongée à l'air comprimée**,

Certains débutants trouveront une page utile regroupant une série d'exercices pour les aider à "**passer les oreilles**". Si vous aimez l'apnée et que vous voulez faire durer le plaisir, méfiez-vous des dangers de **l'hyperventilation**.

Les plongeurs en formation en lisant la page traitant des **profils de plongée** trouveront de bonnes raisons pour ne pas jouer avec la durée des paliers de décompression ni remonter trop rapidement.

● Sujets abordés

Physiologie

- La saturation des tissus
- Les paliers de décompression
- Equilibrer les oreilles
- Effets de l'immersion
- Le soufflet pulmonaire
- Le circuit de l'oxygène

Physique

- La dissolution des gazs
- La pression
- Les lois physiques

Sécurité

- L'essoufflement
- L'hyperoxie
- L'hyperventilation
- Le rendez-vous syncopal
- Les profils de plongée

Gaz respiratoires

- Plonger à l'air comprimée
- Plonger au NITROX

Histoire

- Personnages célèbres

PHYSIOLOGIE

La saturation des Tissus

Si la loi de Henry ne vous dit rien, commencez par découvrir ce qu'est la [dissolution des gazs](#) . Vous pourrez ensuite poursuivre par le le petit passage qui la concerne dans la page des [lois physiques](#) . Le phénomène de saturation des tissus en azote est, lui, brièvement décrit sur la page des [paliers de décompression](#).

Sujets abordés dans cette page :

[Pression partielle et tension d'un gaz](#)

[La période d'un tissu](#)

[La désaturation](#)

[Le coefficient de sursaturation critique](#)

● Pression partielle et tension d'un gaz

L'air que nous respirons contient approximativement 80% d'azote (N_2) et 20% d'oxygène (O_2). Si on considère que la pression atmosphérique est de 1 bar, la **pression partielle** (part de pression due à l'azote) est : $PpN_2 = 0,8$ bar. De même $PpO_2 = 0,2$ bar. Dans un verre d'eau, il y a de l'azote et de l'oxygène dissout dans les mêmes proportions. Pour définir la quantité de gaz dissout dans un liquide, on ne parle plus de pression partielle mais de tension. La tension d'un gaz dans un liquide ou un tissu s'exprime en bar. A saturation les échanges gazeux entre l'air et le liquide peuvent être considérés comme nuls : la tension d'un gaz est alors égale à la pression partielle de celui-ci dans l'air. Dans l'eau d'un verre, la tension d'oxygène est : $TO_2 = 0,2$ bar et de même, on a : **$TN_2 = 0,8$ bar.**

Au niveau de la mer, au début d'un séjour de plongée et avant la première plongée, la tension d'azote dans nos tissus est aussi de 0,8 bar : nous sommes à saturation. Il n'en va pas de même pour l'oxygène. L'oxygène est principalement véhiculé dans le corps par l'hémoglobine du sang.

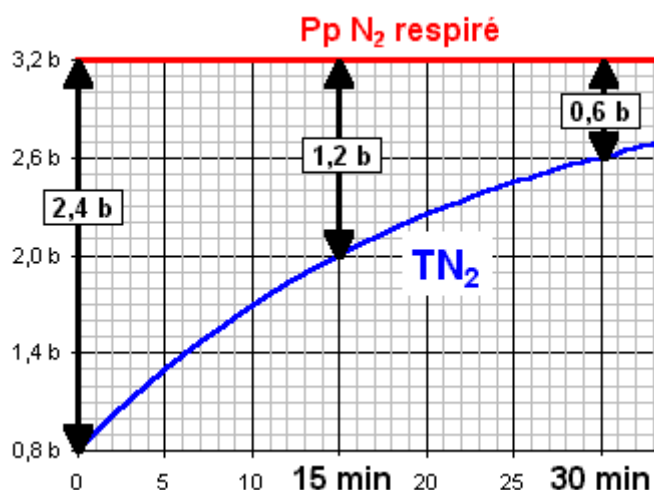
Une partie non négligeable de l'oxygène respiré circule sous forme dissoute. Cet oxygène n'a pas à inquiéter le plongeur car il sera consommé de toutes façon par nos cellules.

Le principal déchet de combustion de l'oxygène est le gaz carbonique (CO_2) qui sera acheminé par le sang (dans l'hémoglobine et sous forme dissoute) vers les poumons.

Pendant une plongée, nous exposons notre corps à une pression ambiante importante.

En plongée, la pression partielle d'azote dans l'air respiré est plus importante car cet air est à la pression ambiante. Par exemple à 30 m, la pression absolue est de 4 bar, donc $P_{p\text{N}_2}$ respiré = 3,2 bar. Si la phrase précédente vous pose un problème, allez donc faire un petit tour du côté de chez [DALTON](#) (calcul des pressions partielles) et revenez dans une minute... Ça y est ? on continue. **On se souvient qu'au début de la plongée la tension d'azote dissout dans nos tissus est de 0,8 bar.** La différence entre la pression partielle d'azote respiré et la tension d'azote dissout dans les tissus va provoquer une nouvelle saturation des tissus en azote. Ça va devenir intéressant, car les tissus ne se saturent pas tous à la même vitesse...

● La période des tissus



La période d'un tissu est le temps qu'il va mettre pour arriver à la moitié de la saturation. Dans le cas de nos plongeurs qui viennent d'arriver à 30 m, il y a une différence de 2,4 bar entre T_{N_2} et $P_{p\text{N}_2}$ respiré (3,2 - 0,8). Cette différence s'appelle le "gradient". Si nos plongeurs restent à 30 m, de l'azote va se dissoudre dans les tissus pour tendre vers la saturation.

Si on restait suffisamment longtemps à cette profondeur, tous les tissus auraient une TN_2 de 3,2 bar (bonjour les paliers !).

Les tissus qui se saturent vite (sang, graisse...) sont appelés "tissus courts". Leur période peut n'être que de quelques minutes. Les "tissus longs" (os, tendons...) ont des périodes pouvant atteindre plusieurs heures.

● La désaturation

Lorsque la PpN_2 respiré est supérieure à la TN_2 dissout dans un tissu, celui-ci se sature en azote. Lors de la remontée la pression absolue (ambiante) va baisser. Il arrivera un moment où la pression absolue sera inférieure à TN_2 . le tissu est dit en **sursaturation** et il va alors commencer à se **désaturer** en azote.

Le phénomène de désaturation suit les mêmes règles de progression que la saturation. Certains tissus se désatureront vite, d'autres le feront plus lentement (tissus courts et tissus longs).

Lors d'une désaturation normale, l'azote dissout dans le sang repassera dans l'air au niveau des alvéoles pulmonaires. Ce phénomène est assez rapide car le sang est un tissu court. Le sang qui repart alors vers les organes a une TN_2 plus faible qu'avant et s'en va irriguer les organes qui, eux, ont encore une TN_2 importante. L'azote de ces organes va alors passer dans le sang (plus ou moins vite en fonction de la période du tissu) qui l'apportera aux poumons pour un nouveau cycle

Pendant la plongée, le sang s'était saturé en azote et l'avait distribué à tout le corps. Lors de la remontée, c'est encore lui qui véhicule l'azote dans le sens contraire

Si la pression ambiante est très inférieure à la TN_2 d'un tissu, l'azote qu'il contient n'aura pas la patience de se laisser véhiculer par le sang jusqu'aux alvéoles des poumons. C'est ce qui arrive lorsqu'on remonte trop vite (la pression absolue diminue rapidement). En effet, la tension d'azote n'étant pas suffisamment compensée par la pression ambiante, l'azote reprendra sa forme gazeuse dans le tissu. On dit que le tissu est alors en **sursaturation critique**. D'où une formation de bulles d'azotes qui provoqueront un accident de décompression. Les tables de plongées sont calculées pour nous donner des profils de remontée qui empêcheront un tissu de se trouver dans une telle situation. Pour établir ces tables, on associe à chaque tissu (caractérisé par sa période), un coefficient de sursaturation critique :

● **Le coefficient de sursaturation critique**

Les premières tables de plongées ont été calculées en considérant qu'un tissu pouvait supporter une TN_2 deux fois plus grande que la pression ambiante sans que n'apparaissent de bulles dans ce tissu. Cette approximation n'était pas assez sévère. Avec l'expérience on s'est aperçu que tous les tissus n'ont pas le même seuil de tolérance. Voilà pourquoi on a été amené à déterminer pour chaque groupe de tissus l'écart maximum qu'il peut supporter entre la TN_2 et une pression ambiante plus faible.

Le coefficient de sursaturation critique d'un tissu se note **Sc**. C'est un simple nombre. Prenons le cas d'un tissu dont le coefficient $Sc = 1,6$. Cela signifie que TN_2 pourra être au plus 1,6 fois plus grande que la pression ambiante. C'est une valeur à ne pas dépasser. Les premières tables de plongées utilisaient un coefficient $Sc = 2$ pour tous les tissus !

Les Paliers de Décompression

Le but des paliers de décompression est de faire en sorte que pour chacun de nos tissus le coefficient Sc ne soit jamais dépassé. Si on connaît TN_2 et P_{abs} , on peut calculer TN_2 / P_{abs} pour vérifier qu'on est bien au dessous du coefficient Sc du tissu considéré.

L'azote représente environ 80% de l'air. Bien qu'il ne soit pas utilisé, il est présent dans tout le corps sous forme dissoute. L'oxygène est consommé par le corps qui produit en retour du gaz carbonique évacué dans les poumons. Pour respirer sans effort sous l'eau, on utilise un détendeur qui fournit de l'air à la pression ambiante.

Les poumons des plongeurs qui viennent d'arriver à une profondeur de 20m contiennent 3 fois plus d'azote que l'air du niveau de la mer car la pression à cette profondeur est le triple de la pression atmosphérique. Une certaine quantité d'azote de l'air des poumons va se dissoudre dans le sang. Le sang va apporter cet azote dissout supplémentaire jusque dans les moindres recoins du corps.

Si on reste longtemps au fond, ou si on continue à descendre, ce phénomène se poursuit jusqu'à l'équilibre des quantités d'azote entre le corps et l'air des poumons. On appelle cet équilibre la "saturation".

Si les plongeurs remontent vers la surface, la pression à laquelle ils se trouvent diminue. L'azote dissout dans le corps va être soumis à la même pression. On observera un déséquilibre entre la quantité d'azote souhaitable dans le corps (compte tenu de la pression) et la quantité réelle à la suite de la plongée. L'azote ne peut sortir du corps que par les poumons (par où il est entré). Si on remonte trop vite, l'azote n'a pas le temps de se laisser acheminer par le sang vers les poumons, il se forme alors des bulles d'azote dans les tissus du corps ! Ceci peut avoir des conséquences extrêmement graves et il faut l'éviter à tout prix.

La procédure de remontée impose tout d'abord une vitesse maximum : 15m par minute. C'est à peu près la vitesse des toutes petites bulles qui environnent le plongeur. Si on a accumulé beaucoup d'azote pendant la plongée, il faudra marquer une ou plusieurs pauses pendant la remontée : on reste un certain temps à la même profondeur. La détermination du nombre de paliers de décompression, de leur profondeur et de leur durée se fait à partir de tables déjà calculées. L'emploi de ces tables est enseigné dans tous les clubs de plongée.

Quelques exemples avec les tables MN 90 (Marine Nationale 1990) :

- Si on plonge à 28m de profondeur pendant 30 minutes, les tables indiquent un palier de 6 minutes à 3m en fin de plongée. Ce type de plongée est très classique en plongée de loisir.
- Imaginons maintenant des plongeurs ayant passé une heure à une profondeur de 35m. Les tables indiquent un premier palier de 22 minutes à 6m de la surface, puis un palier de 50 minutes à 3m ! Ces plongeurs doivent avoir prévu à l'avance leur plongée de façon à conserver de l'air pour exécuter les paliers avec une bonne marge de sécurité.
- Un dernier exemple : pour une plongée de 30 minutes à une profondeur de 20m il n'est pas nécessaire de faire de palier de décompression. On veillera toutefois à ne pas dépasser la vitesse maximum de remontée : 15m par minute. Il est d'usage de toujours effectuer en fin de plongée un palier de 3 minutes à 3m de profondeur. C'est le "palier de principe".

● **Le palier de principe**

Ce palier est parfois remis en cause, arguments à l'appui. Sans vouloir rentrer ici dans le débat, je reste favorable à l'exécution de ce palier pour plusieurs raisons :

- Si, avec des plongeurs débutants, on se limite à la « courbe de sécurité » (profil de plongée n'exigeant pas de paliers en fin de remontée), on perd une bonne occasion d'entraîner ces plongeurs à « tenir un palier ». Ces 3 minutes de palier sont donc un bon apprentissage sur le chemin de l'autonomie.
- C'est lors du dernier palier qu'on peut efficacement vérifier qu'on est correctement lesté.
- La plongée à l'ordinateur incite souvent à modeler son profil de plongée en restant à la limite de la courbe de sécurité. Dans cette situation, il faut donc appréhender le « palier de principe » comme un réel « palier de sécurité », autre appellation fréquente, qui prend ici tout son sens.

● **La courbe de sécurité**

On peut extraire des tables de plongée MN 90 les durées maximales de plongée sans palier pour différentes profondeurs. Voici les principales valeurs qu'il est bon de connaître par coeur :

Profondeur	Durée
-10 m	5 h 30
-12 m	2 h 15
-15 m	1 h 15
-20 m	40 min
-25 m	20 min
-30 m	10 min
-40 m	5 min

Equilibrer Les Oreilles

J'ai personnellement connu d'énormes difficultés à "passer les oreilles" au début de ma formation de plongeur. Il ne m'était pas toujours possible de descendre au-delà de -3m en apnée.

Avec le temps, la pratique et l'expérience, aujourd'hui je peux effectuer une apnée à -20m. Sans commentaires...

IL existe une suite d'exercices d'entrainement à la BTV (Béance Tubaire Volontaire). C'est la méthode la plus douce pour "**passer les oreilles**".
Origine du document : Médecine du sport, Bd st Marcel, Paris.

Effets de l'Immersion

Cette page est fortement inspirée de certains éléments de la conférence "Hydratation et ventilation en immersion" du Pr. J. Regnard à l'hôpital de Gonesse le 1er février 97 dans le cadre du cycle de conférences : "*L'urgence médicale en plongée sous-marine*", et les schémas proviennent du livre de Jacques H. CORRIOL "*La plongée en apnée*".

Sujets abordés dans cette page :

Modification de la répartition du volume sanguin
Augmentation de la pression sanguine
Le choc thermo-différentiel (hydrocution)
Déshydratation accélérée
Elimination de l'azote

● **Modification de la répartition du volume sanguin**



Voici une représentation schématique de la distribution des volumes des poumons (en blanc), de la masse sanguine (en rouge), du coeur (en noir) et de l'abdomen (en gris) chez un sujet debout "au sec", donc soumis au champ de pesanteur terrestre. L'abdomen et la masse sanguine sont attirés vers le bas par la pesanteur (la répartition du volume sanguin n'est pas la même lorsqu'on est allongé). Il est important de noter pour la suite que les organes représentés sont souples, déformables et que leurs positions respectives résultent d'un équilibre de forces (pesanteur, élasticité, pressions relatives).



Si on s'immerge partiellement, la pression hydrostatique (pression relative) est immédiatement transmise à la partie du corps qui se trouve dans l'eau. Pour qu'un nouvel équilibre des forces s'installe, un plus grand volume sanguin va se retrouver là où les vaisseaux sont le plus extensibles : les capillaires des poumons. Ceux-ci peuvent se dilater plus facilement que n'importe quels autres vaisseaux, sans déplacer d'autres tissus, car ils sont à proximité d'une masse gazeuse : l'air contenu dans les poumons. Le coeur étant lui aussi situé dans cette région, verra son volume augmenter.



Lorsqu'on est totalement immergé, 700 ml de sang supplémentaires se retrouvent répartis dans les poumons et le coeur. Le volume des poumons est également réduit par le déplacement du diaphragme vers le haut (la poussée d'Archimède compense le poids de l'abdomen). Par ailleurs, le tissu pulmonaire gorgé de sang perd de sa souplesse. On voit donc que le simple fait de s'immerger modifie le travail du coeur (volume cardiaque plus important), l'efficacité respiratoire (volume pulmonaire moindre) et l'effort inspiratoire (poumons moins souples).

● **Augmentation de la pression sanguine**

Dans le corps en immersion, toutes les pressions relatives augmentent. Le déplacement sanguin est quasi-instantané au moment de l'immersion. Le sang en provenance des organes et qui arrive au coeur est habituellement à une pression relative nulle.

En immersion, cette pression est de 10 mm Hg. L'afflux sanguin du à l'immersion augmente donc la pression dans les veines, entraîne un bon remplissage du coeur et facilite son travail. Le résultat est une augmentation de la pression sanguine dans les artères.

La pression dans les artères est contrôlée en permanence. Comme celle-ci augmente trop, un mécanisme de régulation entre en jeu : le rythme cardiaque diminue et le diamètre des artères augmente.

● **Le choc thermo-différentiel (hydrocution)**

On vient de voir que l'augmentation de la pression dans les artères déclenche une réaction réflexe qui ralentit le coeur et élargit les artères. Ces réactions sont le fait du système nerveux **parasympathique**. C'est lui qui intervient dans le mécanisme du choc thermo-différentiel.

Sous l'action de la chaleur externe, les vaisseaux s'ouvrent sous la peau afin de favoriser la dissipation de la chaleur corporelle. La fréquence cardiaque augmente alors pour pouvoir convenablement alimenter ce volume de vaisseaux ouverts. Si après une longue exposition au soleil on se jette à l'eau, la chute de température va provoquer une fermeture des vaisseaux périphériques (vasoconstriction).

Le grand volume sanguin va donc refluer vers l'intérieur du corps : la pression sanguine va augmenter brutalement, générant une réaction toute aussi brutale du système parasympathique qui peut arrêter le coeur en quelques secondes !

● **Déshydratation accélérée**

La **noradrénaline** est une hormone qui participe à l'augmentation de la pression sanguine lorsque c'est nécessaire. Elle est sécrétée lorsque le système nerveux **orthosympathique** le commande. Le système orthosympathique est chargé d'augmenter la fréquence cardiaque et de donner du tonus aux muscles qui commandent la fermeture des petites artères. Bref, c'est un système qui augmente la pression sanguine. Le système orthosympathique et le système parasympathique se passent le relai en fonction des conditions et des exigences du moment.

En immersion, on a vu que c'est le système parasympathique qui est en éveil. Le corps contient donc peu de noradrénaline. Cette faible concentration de noradrénaline va avoir une conséquence sur les cellules de la paroi de nos vaisseaux : ces cellules vont s'écarter les unes des autres au point que l'espace interstitiel (espace entre les cellules) sera sensiblement plus grand qu'à l'habitude.

L'eau du corps pourra alors rejoindre le sang plus facilement, ce qui aura pour effet d'augmenter le volume du plasma sanguin (hypervolémie). Quand le volume plasmatique augmente, la diurèse (production d'urine) augmente également car il y a plus de sang à filtrer. Le débit urinaire qui est normalement de 1 ml / minute passe à 6 ml / minute en immersion !

● **Meilleure élimination de l'azote**

Quand on sort de l'eau, les pressions relatives reprennent leurs valeurs normales et les vaisseaux reprennent peu à peu leur taille initiale.

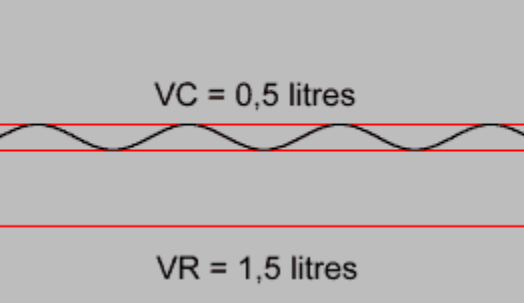
La déshydratation a augmenté la viscosité du sang et rend par conséquent plus difficile l'élimination de l'azote. C'est pourquoi il est conseillé de boire de l'eau immédiatement après la plongée.

En conclusion une petite remarque sur notre état entre l'arrivée en surface et le retour sur le bateau. Nous sommes dans l'eau jusqu'au cou, presque entièrement immergés, nos vaisseaux sanguins sont bien ouverts (sauf près de la peau s'il fait froid), l'espace entre les cellules permet une circulation facile des liquides... Ce sont d'excellentes conditions pour éliminer l'azote !

Le Soufflet Pulmonaire

Encore un drôle de nom pour ce qui nous sert de poumons (explication au bas de la page). Toutes ces pages de théorie, de physiologie n'ont d'autre but que d'éclaircir les règles de sécurité de la plongée. Cette page s'inscrit dans cette optique ; Une bonne connaissance des différents volumes pulmonaires va nous aider à mieux intégrer le mécanisme d'un accident de plongée loin d'être anodin : **L'essoufflement.**

Commençons par une petite comparaison : le cœur pompe le sang pour le faire circuler dans les vaisseaux sanguins. C'est une double pompe aspirante-refoulante à deux orifices. Avec les poumons, on a affaire à une pompe bien différente : C'est une pompe aspirante refoulante à un seul orifice (la trachée artère). Ils expulsent l'air chargé en gaz carbonique (CO₂) et aspirent l'air plus riche en oxygène (O₂) pour assurer les besoins du métabolisme (centrale énergétique).



VC = 0,5 litres

VR = 1,5 litres

● Le volume courant (VC = 0,5 l)

Nos poumons suivent sans cesse un cycle inspiration/expiration. En temps normal, au repos, ils brassent 0,5 litres par cycle. C'est-à-dire que le volume des poumons oscille entre deux valeurs distantes de 0,5 litres. Cette quantité d'air est suffisante pour alimenter notre corps en oxygène, en l'absence d'effort important.

La courbe du schéma ci-contre symbolise la variation de volume des poumons en fonction du temps, au repos.



● Le volume de réserve (VR = 1,5 l)

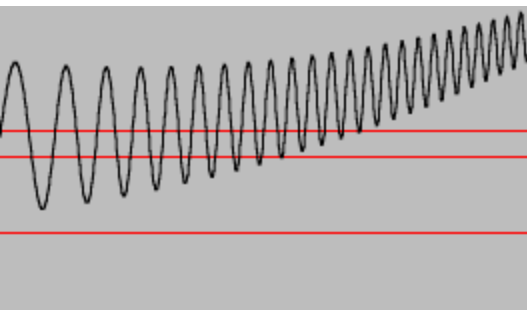
Lorsqu'on expire à fond, au maximum de ses possibilités, on a l'impression d'avoir "vidé" ses poumons. Heureusement il n'en est rien, on a simplement atteint des limites physiologiques : celles nos muscles du thorax et de l'abdomen (diaphragme). Il reste de l'air dans les poumons. Si ce n'était pas le cas, les parois des alvéoles se refermeraient à jamais...

Il reste alors dans nos poumons un volume d'air important : 1,5 litres. C'est un volume suffisant pour tenir 30 secondes en apnée en cas de pépin. Si vous en doutez, entraînez-vous à l'apnée expiratoire progressivement (avec une surveillance, évidemment). Si vous ne l'avez jamais fait, vous serez surpris du résultat. Ce volume de réserve figure sur le schéma ci-dessus.

● Le volume inspiratoire de réserve (VIR = 2,5 l)

A l'inverse, lorsqu'on "remplit" les poumons, on augmente leur volume de 2,5 litres de plus qu'après une inspiration normale. Ce volume supplémentaire est sollicité en cas d'effort : Le corps consommant plus d'énergie a besoin de plus d'oxygène. Il va falloir brasser plus d'air. Le schéma ci-contre représente la variation du volume pulmonaire pendant un effort. Il ne prend tout son sens que lorsqu'on le compare au précédent : Deux grands changements sont apparus. Premièrement, la fréquence ventilatoire (la "vitesse de respiration", FV pour les intimes) est augmentée. Deuxièmement, l'amplitude de la respiration est beaucoup plus importante qu'au repos. On se rapproche du but de cette page...

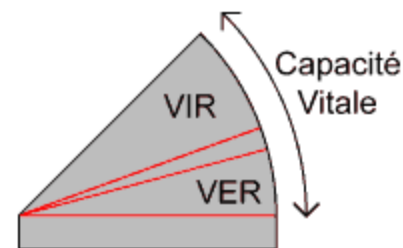
● Le volume expiratoire de réserve (VER = 1,5 l)



Pour nous aider à bien vider les poumons, la nature nous a doté de la possibilité de vider les poumons au-delà d'une expiration normale (on en parlait plus haut). Il est ainsi possible de "forcer" l'expiration en expirant 1,5 litres de plus qu'après une expiration normale. La courbe du schéma ci-dessus montre que pendant l'effort, les poumons n'hésitent pas à empiéter sur ce volume d'expiration supplémentaire

pour bien évacuer l'air chargé en gaz carbonique. Les poumons se rempliront d'autant mieux à la prochaine inspiration. On touche au but...

Il est temps de faire le total : $VIR + VC + VER + VR = 6$ litres. Cette valeur est purement indicative, c'est une moyenne. On ne me fera pas croire que le volume pulmonaire de Umberto Pelizzari (8 litres) est similaire à celui de Nathalie, petit format qui finit ses plongées avec près de 100 bars dans son bloc...



● La courbe de l'essoufflement

Les choses étant ce qu'elles sont, l'expiration est passive. Lors d'un effort, si on "oublie" de forcer sur l'expiration, le corps ne sera pas satisfait : il réclamera plus d'oxygène, il se mettra à respirer de plus

en plus vite, en continuant d'oublier d'expirer, inspirera de plus en plus, remplira les poumons, au point de nous faire suffoquer... Un comble ! En effet, l'organisme réclame de l'air alors que les poumons sont pleins... pleins d'air chargé de gaz carbonique (CO_2). Regardez bien cette courbe, voyez comme elle est effrayante.

Pour rompre le cercle vicieux, c'est simple : cesser tout effort et expirer à fond (une fois peut suffire).

● Un peu de vocabulaire

Ce dessin illustre le nom de "soufflet" pulmonaire en matérialisant la capacité vitale des poumons ($CV = VIR + VC + VER$). La respiration peut alors s'assimiler à un mouvement cyclique de ce soufflet, sans qu'il soit possible d'intervenir sur le volume résiduel. Les proportions des différents volumes cités ont été respectées sur ce schéma.

Vous êtes encore là ? C'est que ça vous intéresse. Sachez alors que la promenade dans le système respiratoire ne serait pas complète sans un petit tour attentif sur la page de [l'essoufflement](#) si ce n'est déjà fait.

Le Circuit de l'Oxygène

Je commence par implorer votre indulgence pour les dessins "à la main". C'est un côté rustique qui sied peu au web, n'est-ce pas ? . Mais l'impatience de pondre une page ne se commande pas. A ma décharge, je peux juste certifier que ce sont des dessins "maison".

Voilà donc une de ces page lisible sans connaissances préalables. La physiologie constitue une partie importante des connaissances que le plongeur se doit d'intégrer. De toutes façons, la connaissance de son corps ne fait de mal à personne.

Le parcours de l'oxygène dans le corps est une belle histoire. Il serait dommage de la bâcler, c'est pourquoi cette page est un peu plus longue que les autres.

● L'inspiration

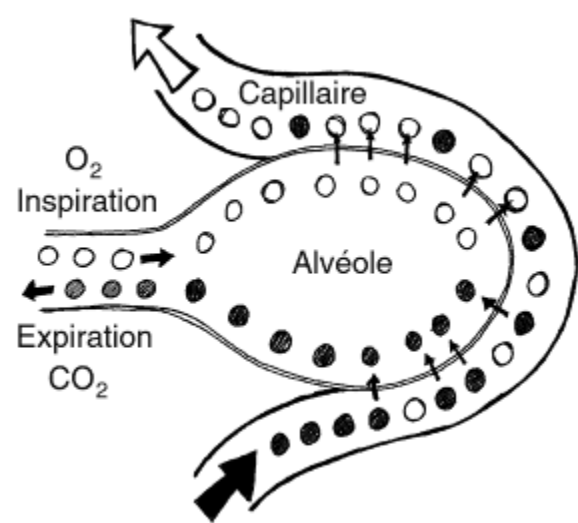
L'air inspiré par le nez pénètre tout d'abord dans les fosses nasales où il va s'humidifier et se réchauffer avant de passer dans la trachée artère (derrière la cravate), le gros tuyau qui mène aux poumons.

Quand nous déglutissons en mangeant ou en avalant notre salive, la glotte assure l'aiguillage : la nourriture va vers l'oesophage (direction l'estomac), l'air vers les poumons. Un plongeur doit savoir que même quand la glotte est bloquée, on peut y faire passer un mince filet d'air qui suffira à résoudre le "problème". Le tout est de garder son calme :)

Suivons l'air vers les poumons. Après les multiples embranchements des bronches et des bronchioles, il est distribué vers des grappes d'alvéoles, sa destination. C'est sur les parois de ces minuscules sacs que le miracle s'opère : l'oxygène va passer dans le sang et le gaz carbonique du sang va passer dans les alvéoles, prêt à être éjecté à la prochaine expiration.

● Dans les alvéoles, c'est l'osmose !

Le mot "osmose" est souvent - à tort - utilisé dans le sens de "symbiose". Que ceux qui ont gardé peu de souvenirs de leurs cours de biologie s'attardent un peu ici. Imaginez deux liquides différents séparés par une membrane poreuse.



Imaginez maintenant que les petits trous de la membrane soient justement trop petits pour laisser passer les liquides. Vous y êtes ? On continue à imaginer.

Dans le liquide, on imagine de petites molécules dissoutes (pour plus d'informations, voyez la page sur la [dissolution des gaz](#) qui, elles, peuvent passer à travers. Et bien il faut savoir que s'il y a plus de molécules d'un côté de la paroi, elles vont commencer à passer de l'autre côté. Ce mouvement ne s'arrêtera que lorsque la **concentration** des molécules sera la même de chaque côté.

C'est ce phénomène qu'on appelle l'osmose. Nous avons de la chance, car ce phénomène est qualitatif : A ma gauche l'oxygène, à ma droite le gaz carbonique. En quantités égales. Qu'importe, le gaz carbonique gère son osmose, l'oxygène également. La concentration en oxygène n'a que faire de celle d'un autre gaz. Les deux phénomènes vont se dérouler en parallèle :

La paroi des alvéoles est constituée de cellules formant une membrane très fine de part et d'autre de laquelle l'osmose va jouer à fond. Elle sépare le sang de l'air alvéolaire.

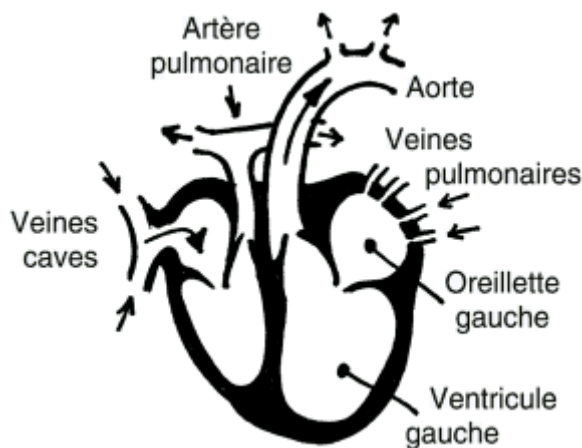
Les globules rouges du sang doivent leur belle couleur à l'hémoglobine (miam !), molécule complexe et performante : elle transporte aussi bien l'oxygène (O_2) à l'aller que le gaz carbonique (CO_2) au retour. Le corps (sur le retour) est tellement pressé de se débarrasser du CO_2 , qu'il n'attend pas qu'il y ait de la place dans l'hémoglobine. Voilà pourquoi il y a aussi beaucoup de CO_2 dissout dans le sang qui arrive aux alvéoles. Le plongeur averti comprendra donc l'importance de l'état de fatigue dans l'apparition des méchantes bulles d'azote, celles-ci apparaissant facilement en présence d'une forte concentration de CO_2 dissout. Je m'égarre, reprenons :

Le petit dessin évoque un capillaire (minuscule vaisseau sanguin) qui fait le tour de l'alvéole et il a bien raison : derrière la membrane d'une alvéole, il n'y a que du sang affamé d'oxygène et chargé de CO_2 .

Toutes proportions gardées, l'osmose est un phénomène très puissant. En moins d'une seconde, les échanges gazeux sont effectués : une partie de l'oxygène présente dans l'air alvéolaire prend la place abandonnée par le CO₂ dans l'hémoglobine du sang qui passe par là.

La surface totale de la paroi des alvéoles d'une paire de poumons normaux équivaut à la surface d'un terrain de tennis ! Certaines alvéoles ne sont sollicitées que lors d'efforts. Une inspiration nasale profonde réveille des alvéoles qui ne servent pas souvent. Pensez-y, votre corps et votre moral vous en seront reconnaissant.

● Le cœur

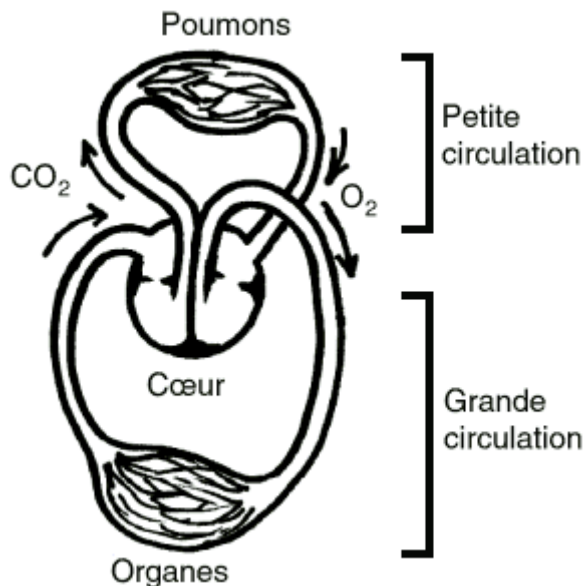


On va parler du cœur gauche (à droite sur la photo), celui qui reçoit le sang frais (oxygéné) en provenance des poumons. Il est plus gros que le cœur droit car il doit alimenter le corps entier. Les deux poches (oreillette et ventricule) sont des muscles qui se remplissent naturellement au repos, entre deux cycles. Quand ils sont bien remplis, l'oreillette se contracte pour "gonfler à bloc" le ventricule qui, de ce fait, sera plus performant quand viendra son tour de se contracter (c'est un truc qu'ont trouvé les muscles pour être plus efficaces).

Le ventricule, une fois bien tendu grâce au coup de pouce de l'oreillette, se contracte et expulse le bon sang frais par l'aorte, arrosant le cerveau au passage (l'entrée des artères carotides est visible sur le dessin) et le reste du corps par la suite. Puis le ventricule se relâche, il l'a bien mérité. Il se remplit à nouveau et le cycle recommence.

On vient de voir qu'il y a deux contractions successives, celle du ventricule et celle de l'oreillette. Voilà pourquoi le coeur fait boumboum, boumboum, et pas boum, boum, boum... Pendant ce temps-là, le coeur droit fait le même travail, pompant vers les poumons un sang gorgé de gaz carbonique, en provenance des organes.

● Au niveau des cellules



Le sang est donc lancé à travers le corps, acheminé par le réseau des artères jusqu'aux différents organes, dont les cellules vont absorber l'oxygène en échange de gaz carbonique. Les cellules, pour assurer leur fonction spécifique, ont besoin d'énergie. La fabrication de cette énergie (le métabolisme) passe par la combustion des aliments, carburant du corps. Pour pouvoir "brûler" ce carburant il faut de l'oxygène. C'est donc au niveau des cellules que l'oxygène va connaître la fin de son histoire.

Les aliments produisent essentiellement des composants carbonés, qui lors de leur combustion, vont se combiner avec l'oxygène pour donner du gaz carbonique (CO₂ ou dioxyde de carbone).

Une fois la réaction de production d'énergie effectuée, il faut se débarrasser des déchets (entre autres le CO₂). Ça tombe bien, l'hémoglobine du sang vient de se débarrasser de son oxygène et est prête à accueillir le CO₂.

Au niveau des cellules, c'est encore l'osmose qui va permettre ce double échange O₂-CO₂. La nature est décidément bien faite...

Notre hémoglobine, emportée par son élan, chargée de CO₂, se retrouve drainée aussitôt par le réseau veineux, qui ramène le sang vers les poumons.

A ce stade, la pression sanguine est très faible, à force de passer dans les petits tuyaux des capillaires du corps. C'est là qu'intervient le cœur droit : Il remet la pression pour que le sang "usé" puisse traverser avec succès les poumons ! Heureusement qu'on a inventé Darwin, hein ?

Pour finir, un peu de vocabulaire : on appelle artère un vaisseau qui éloigne le sang du cœur et veine un vaisseau qui ramène le sang au cœur. Voilà pourquoi les tuyaux qui apportent le sang frais des poumons vers le cœur s'appellent les veines pulmonaires. De même, ceux qui, sous l'impulsion du cœur droit, remplissent les poumons de sang appauvri, s'appellent les artères pulmonaires.

Ouf ! dodo maintenant. La position allongée facilite le travail des oreillettes :)

PHYSIQUE

La Dissilution des Gazs

La **loi de Henry** est un morceau pas toujours facile à avaler dans la vie d'un plongeur en formation. Voici une petite contribution qui pourra peut-être aider ceux, nombreux, qui ne sont pas très copains avec la physique.

Pour illustrer le phénomène de la dissolution, on va considérer que les molécules sont des petites boules car c'est beaucoup plus facile à dessiner. Commençons par parler des solides : si on fiche la paix aux molécules lorsqu'elles sont très proches les unes des autres, elles restent sagement collées à leurs voisines respectives, formant ainsi un bloc, un "solide". La force qui maintient cette cohésion est énorme quand, rappelons-le, les molécules sont proches.

● **Qu'est-ce qu'un liquide ?**

Maintenant on va commencer à taquiner le solide en le chauffant, c'est à dire en lui communiquant de l'énergie. Lorsque les molécules reçoivent cette énergie, elles commencent à ne plus tenir en place. Un peu comme votre corps quand vous entendez un morceau de James Brown. Nos molécules se mettent donc à danser sur place. Elles sont un peu à l'étroit mais bon, elles dansent. L'intensité de ce mouvement se mesure : c'est la température du solide. Si les molécules sont parfaitement immobile, c'est le "zéro absolu". Il n'y a rien de plus froid que le zéro absolu (moins 273,16 °C).

Si on continue à chauffer le solide, les molécules vont commencer à exécuter des figures en tournant les unes autour des autres : l'énergie qu'on leur a communiqué commence à leur permettre de rivaliser avec la force qui les maintenait quasi-immobiles.

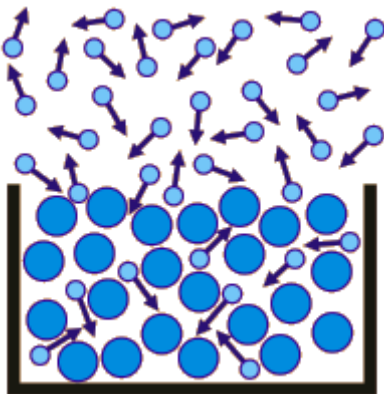
Ce phénomène s'appelle simplement la fusion. Le solide a changé d'état, il est devenu liquide ! On commence à se rapprocher de notre élément. Même dans un verre d'eau froide, les molécules se promènent.

● On met les gaz

Dans un liquide, il fait "chaud" du point de vue des molécules : ça bouge, aucune molécule n'est immobile. Qu'à cela ne tienne, on va chauffer encore pour voir ce qui se passe. Finalement, l'analogie avec la danse va encore nous servir. Puisqu'on augmente la température, les molécules emmagasinent de plus en plus d'énergie et passent du collé-serré au rock acrobatique ! On chauffe toujours... Les molécules finissent par se lâcher et entament un furieux pogo et se télescopent les unes les autres (C'est encore un Brown qui a décrit ce mouvement).

Il leur faut beaucoup de place désormais. On est en présence d'un gaz, la dissociation entre les molécules est totale. Elles percutent les parois du récipient, qui a intérêt à être assez solide pour résister à cette pression... Ça y est, le mot est lâché. Vous faites le lien avec la pression maintenant ? C'est vraiment une force qui s'applique à une surface. Moins il y aura de place, plus la densité des molécules en mouvement sera importante, plus la pression sera élevée.

● Une idée : la dissolution



Le décor est planté. Imaginons maintenant ce qui se passe à la surface d'un liquide au contact de l'air, par exemple en considérant notre verre d'eau fraîche.

Le petit dessin ci-contre montre que certaines molécules présentes dans l'air plongent dans le liquide. C'est normal, on se rappelle qu'elles se bousculent les unes les autres.

Celles qui cognent la paroi du réfrigérateur rebondissent, celles qui touchent la surface de l'eau continuent leur trajectoire.

Il y a ainsi dans l'eau un grand nombre de molécules de gaz qui font trempette. Elles se baladent entre les molécules de liquide, ressortent parfois vers l'air libre sous la pression des nouvelles venues (au fait, la "pression" du gaz dissout dans un liquide s'appelle "tension").

Le liquide n'est pas en reste. Loin d'être passif, il peut lui même éjecter des molécules de gaz. On se souvient que dans un liquide les molécules "dansent" de façon rapprochée. Si le liquide se réchauffe, la danse des molécules se fait plus violente. Les pauvres molécules de gaz sont bien malmenées ! Beaucoup sortent du liquide par la surface.

Si la température monte vite (on sort le verre de frigo), on voit apparaître des bulles (argh!...) dans le liquide.

Les molécules de gaz ne peuvent plus se promener tranquillement dans le liquide qui est maintenant trop agité pour toutes ces molécules de gaz. Elles se regroupent donc pour danser leur pogo en jouant des coudes avec le liquide...

● **La saturation**

Notre verre d'eau va finir par être à température ambiante. On observera alors un équilibre entre les molécules de gaz qui y plongent et celles qui en sortent. La valse des aller-retour continue bel et bien, mais d'une façon équilibrée (autant d'entrées que de sorties). On dit alors que le liquide est à saturation.

A ce sujet, si vous voulez maintenant en savoir plus sur ce qui se passe dans notre corps quand on respire de l'air comprimé, allez faire un tour sur la page traitant de [la saturation des tissus](#).

La Notion de Pression

La pression est une force appliquée sur une surface. Par exemple, chaque cm^2 (surface) de notre peau supporte environ 1 kg (force) représentant le poids de l'atmosphère. C'est la pression atmosphérique au niveau de la mer. Nous ne la ressentons pas car notre corps est incompressible et ses cavités (estomac, poumons, sinus,...) contiennent de l'air à la même pression.

Si on s'élève de 5 000 m, la pression atmosphérique est deux fois plus faible qu'au niveau de la mer car la masse d'air au-dessus de notre tête est alors moitié moindre. A la fin de cette page se trouve un tableau des unités de pression.

En plongée sous-marine, pour mesurer la pression dans les problèmes, on utilise de préférence le bar et on considère que $1 \text{ bar} = 1 \text{ kg} / \text{cm}^2$.

Qu'en est-il dans l'eau ? Plus on est loin de la surface, plus la pression est élevée car il faut tenir compte du poids de l'eau au-dessus de nous. A -10 mètres de profondeur, chaque cm^2 de notre peau supportera le poids d'un litre d'eau (1 litre = $1\,000 \text{ cm}^3$). Sachant qu'un litre d'eau pèse environ 1 kg, la pression **due à l'eau** à -10 m de profondeur est donc de $1 \text{ kg} / \text{cm}^2$, c'est-à-dire 1 bar. Si on descend à nouveau de -10 m, la pression augmentera à nouveau de 1 bar.

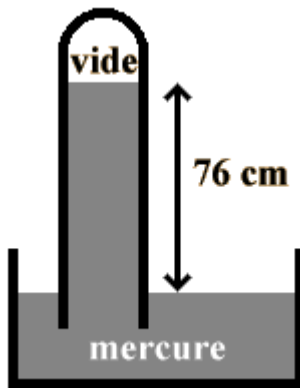
La pression absolue en plongée est la pression totale : Pression atmosphérique + Pression due à l'eau. A -10 m de profondeur, la pression absolue est de 2 bar (1 bar de pression atmosphérique + 1 bar du au poids de 10 m d'eau). A -20 m elle sera de 3 bar, à -30 m de 4 bar, etc... On remarquera que de 0 à -10 m la pression augmente de 100% alors que si on descend de -30 à -40 m, elle n'augmente que de 20%. Il est important de savoir que la pression change plus vite en fonction de la profondeur si on est près de la surface.

La pression hydrostatique est le nom savant pour la pression due à l'eau. On l'appelle aussi pression relative car c'est une pression par rapport à la surface. La relation qui unit tous ces termes est donc :

$$\mathbf{P.\text{absolue} = P.\text{atmosphérique} + P.\text{hydrostatique}}$$

Mesure de la pression :

Voici des précisions sur les unités utilisées pour mesurer la pression. Dans les bouquins d'exercices et de problèmes, on aime donner la pression en "cm de mercure" (cm Hg). Cette vieille unité date d'une expérience célèbre décrite par ce dessin :



Toricelli a retourné une éprouvette pleine de mercure (métal liquide très lourd) dans une cuve de mercure. Un vide s'est alors créé en haut de l'éprouvette. En faisant varier la position de l'éprouvette, il constata que la distance entre la surface de mercure au contact du vide et la surface de mercure au contact de la pression atmosphérique était constante et de 76 cm.

Le poids de cette colonne de 0,76 m de mercure équilibre parfaitement la pression atmosphérique. Petit calcul : le mercure pèse $13,6 \text{ g / cm}^3$, cette colonne applique donc une pression de $13,6 \times 76 = 1033 \text{ g / cm}^2 = 1,033 \text{ kg / cm}^2$.

L'unité officielle de pression dans le système international est le pascal (Pa) qui est égal à une pression de 1 newton par m^2 . Le bar, plus facile à utiliser est un multiple du pascal : $1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$. Dans les bulletins météo, on entend souvent parler de l'hectopascal, qui est le nouveau nom du millibar.

La densité de l'eau douce est 1, c'est-à-dire qu'un litre d'eau douce pèse 1 kg. Pour faire l'expérience de Torricelli avec de l'eau il aurait fallu utiliser une éprouvette d'au moins 10,33 m ! Cette distance est bien connue des installateurs de pompes aspirantes : Une telle pompe ne peut pomper de l'eau douce si elle est située à plus de 10,33 m de la surface de la nappe. En effet, au delà de cette distance elle ne pompe que de l'air et devient de ce fait une "pompe à vide". Seule une pompe refoulante placée au niveau de l'eau peut élever celle-ci au-delà de 10,33 m.

L'eau de mer a une densité de 1,026 à cause du sel qu'elle contient. Pour tous les exercices on admettra que la pression hydrostatique augmente de 1 bar tous les 10 m. En réalité elle augmente de 0,98 bar dans l'eau douce et de 1,007 bar dans l'eau de mer. Voici le calcul pour l'eau de mer :

Masse d'une colonne d'eau de mer de 10 m de haut et 1 cm² de section :

1,026 kg

Poids de cette colonne :

$p = 1,026 \times 9,81 = 10,06506 \text{ N}$ (pour la suite, on arrondi à 10,07)

Pression résultante :

$P = 10,07 / 10^{-4} \text{ Pa} = 100700 \text{ Pa} = 1,007 \text{ bar}$

On remarque que cette approximation va dans le sens de la sécurité pour l'eau de mer, pas pour l'eau douce !

Les Lois Physiques

Vous avez fait un baptême de plongée, ça vous a plu. Vous vous êtes inscrit dans un club pour passer les brevets de la fédé (FFESSM : Fédération Française d'Etudes et de Sports Sous-Marins). Dès la préparation au passage du brevet de niveau 1 (Anciennement : Brevet Elémentaire ou BE), on vous demandera de connaître certaines lois physiques. Il est nécessaire de bien comprendre le sens de ces lois car ce sont elles qui régissent les phénomènes des accidents. Une bonne compréhension de celles-ci permet de bien intégrer les règles d'évolution et de sécurité.

Si vous préparez le passage du niveau 1, commencez par :

[Le principe d'Archimède](#)

[La loi de Boyle-Mariotte](#)

Si vous préparez le passage du niveau 2, vous devez connaître :

[La loi de Henry](#)

[La loi de Dalton](#)

🔵 Le principe d'Archimède

Cette loi permet de déterminer la flottabilité d'un corps. Un bloc de 12 litres pèse à peu près 15 kg à l'air libre. Une fois immergé, ce même bloc est beaucoup plus léger (quelques kg).

Que s'est-il passé ?

A l'immersion le bloc doit faire sa place dans l'eau, il en déplace donc un certain volume (12 litres). L'eau va alors exercer une force tendant à faire remonter le bloc vers la surface, c'est la "poussée d'Archimède".

L'intensité de cette force est égale au poids de l'eau déplacée (1 litre d'eau pèse 1 kg). Dans cet exemple, la poussée d'Archimède est donc de 12 kg (toujours dirigée vers le haut).

Principe d'Archimède

Tout corps plongé dans un fluide reçoit une poussée de bas en haut égale au poids du volume du fluide déplacé.

Le poids du bloc est de 15 kg (force dirigée vers le bas). La poussée d'Archimède et le poids sont deux forces qui s'opposent, le poids l'emporte ici de 3 kg. Cette valeur est le "poids apparent" de la bouteille immergée.

Pour déterminer si un corps flotte ou coule, on calcule sa flottabilité (c'est l'opposé du poids apparent) :

Calcul de la flottabilité

Flottabilité = Poussée d'Archimède - Poids réel

Dans le cas de notre bouteille, on trouve une flottabilité de -3 kg. Une flottabilité négative indique donc un objet plus lourd que l'eau. En effet, si on lâche la bouteille dans l'eau, elle coule.

Un dernier exemple : un plongeur en combinaison équipé du bloc pèse 90 kg sur le pont du bateau. Avec tout son équipement, il occupe un volume d'environ 95 litres. S'il se met à l'eau, il aura une flottabilité de 5 kg. Cette valeur positive indique que notre homme flotte, son immersion sera difficile car il devra lutter contre la poussée d'Archimède. Pour éviter ce problème, il se lestera avec une ceinture chargée de 6 kg de plomb.

On aurait pu penser que 5 kg feraient mieux l'affaire... Mais ce serait oublier ce qui va se passer en fin de plongée : En fin de plongée, le bloc a perdu au moins 1 kg d'air. La fin de plongée correspond au moment du ou des paliers.

Si on est trop léger à ce moment-là, on remonte vers la surface et on n'arrive pas à "tenir le palier". N'en déduisez pas pour autant qu'il faille plonger "lourd" !

Le bon lestage est le lestage qui permet de tenir le palier avec une stab vide. Le surlestage peut être compensé en insufflant de l'air dans la stab, ce qui permet de tenir le palier. Mais alors, me direz-vous, pourquoi ne pas se surlester ? La réponse se trouve à la page de [l'essoufflement](#).

● La loi de Boyle-Mariotte

Un certain Robert Boyle (1627 - 1691) énonça en 1662 la loi de compressibilité des gaz : "le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il reçoit". Votre moniteur vous a sans doute montré ce que devient un ballon gonflé en surface quand on l'emmène au fond : son volume diminue, il est flasque, comme s'il était dégonflé. En fait, la pression a comprimé l'air du ballon. Celui-ci occupe donc un volume moindre. A la remontée, la pression diminue, l'air du ballon se détend et le ballon retrouve son volume initial une fois arrivé à la surface.

En 1676, Edme Mariotte (1620 - 1684) compléta la loi de Boyle en précisant "à température constante". La loi complète citée ci-dessous s'appelle donc la loi de Boyle-Mariotte. Boyle était irlandais, Mariotte était français... c'est pourquoi cette loi est surtout connue comme "loi de Mariotte" en France !

Loi de Boyle-Mariotte

A température constante, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression qu'il reçoit.

Ce phénomène est très important pour les plongeurs : nous respirons de l'air comprimé, pendant la remontée cet air va se détendre et augmenter en volume. Si on bloque sa respiration pendant la remontée, l'air contenu dans les poumons va les distendre jusqu'au point de rupture des tissus. Cet accident très grave s'appelle la "**surpression pulmonaire**" et peut être évité facilement : **ne jamais bloquer sa respiration lors de la remontée** (même en piscine)

● La loi de Henry

Quand des molécules de gaz se regroupent au sein d'un liquide, elles forment une bulle. Dans les liquides, beaucoup de molécules de gaz ne se regroupent pas, elles sont "dissoutes" dans le liquide et se promènent librement. Dans un verre d'eau, une certaine quantité d'air dissout est présent.

Cette quantité dépend de la température et de la pression atmosphérique. Si ces paramètres ne changent pas, la quantité de gaz dissout reste la même, le liquide est alors "**à saturation**".

Loi de Henry

**A température constante et à saturation,
la quantité de gaz dissout dans un liquide
est proportionnelle à la pression
qu'exerce ce gaz sur le liquide.**

Henry a remarqué que la quantité de gaz dissout dans un liquide est directement proportionnelle à la pression que ce gaz exerce sur le liquide. Si on augmente la pression du gaz, des molécules de ce gaz passeront dans le liquide jusqu'à saturation. Inversement, si on réduit la pression, le liquide se trouve en "**sursaturation**" et des molécules de gaz vont s'en échapper pour tendre vers une nouvelle saturation. Ce phénomène génère des bulles dans le liquide lorsque la pression baisse trop rapidement.

En plongée, on respire de l'air comprimé qui va se dissoudre dans le corps. L'azote de l'air n'est pas consommé par l'organisme et peut former des bulles dans nos tissus si on remonte trop rapidement d'une plongée. Ces bulles peuvent obstruer des vaisseaux, comprimer des tissus vitaux,... C'est "**l'accident de décompression**", qu'on évite en remontant lentement et en faisant des paliers.

● La loi de Dalton

Cette loi concerne la description des mélanges gazeux. Elle trouble le débutant car elle peut s'exprimer de trois façons différentes !

Dans l'air il y a approximativement 80% d'azote et 20% d'oxygène. A la pression atmosphérique il règne environ 1 bar.

La part de pression due à l'azote est proportionnelle à sa concentration dans l'air : il participe donc pour 80% à la pression atmosphérique. On dit que à la pression atmosphérique, la "**pression partielle**" de l'azote dans l'air est de 0,8 bar.

A une profondeur de 20 m, il règne une **pression absolue** de 3 bar, la pression partielle d'oxygène dans le détendeur sera donc $3 \times 20\% = 0,6$ bar. On note respectivement les pressions partielles de l'oxygène et de l'azote **PpO_2** et **PpN_2** . Une des expressions de la loi de Dalton donne la formule de calcul de la pression partielle d'un gaz dans un mélange :

Loi de Dalton - 1

$$PpGaz = \text{PourcentageGaz} \times Pabsolue$$

Une autre expression de la pression partielle d'un gaz est :

Loi de Dalton - 2

Pour un volume donné, la pression partielle d'un gaz dans un mélange est la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul ce volume.

Pour en finir avec ces énoncés, voici une dernière expression de la loi de Dalton qui découle logiquement des précédentes :

Loi de Dalton - 3

La pression absolue d'un mélange gazeux est la somme des pressions partielles des gaz qui composent ce mélange.

La notion de pression partielle est importante pour définir les seuils de toxicité des gaz. Par exemple, l'oxygène représente un danger pour les plongeurs à partir d'une pression partielle de 1,6 bar. Quand on plonge à l'air, cette valeur critique est atteinte à la profondeur de 70 m.

Les plongeurs au **NITROX** respirent un mélange enrichi en oxygène, la **PpO_2 limite de 1,6 bar** sera atteinte encore plus tôt.

Les nageurs de combat qui respirent de l'oxygène pur dans leur scaphandre à circuit fermé ne pourront dépasser sans danger la profondeur de 6 m .

SECURITE

L'Essoufflement

L'essoufflement en plongée est à prendre très au sérieux à cause de ses conséquences dramatiques s'il n'est pas traité à temps. Un plongeur essoufflé ne vide plus ses poumons (voir s'il est besoin la page sur [le soufflet pulmonaire](#)), s'il fait une remontée panique, il risque une surpression pulmonaire accompagnée d'un accident de décompression. D'autre part, un plongeur essoufflé, dans un dernier réflexe de survie, peut se noyer après avoir arraché son embout qui le "gênait" pour respirer ! Là encore, une bonne compréhension du mécanisme permettra une bonne prévention.

Sujets abordés dans cette page :

[Mécanisme de l'essoufflement](#)

[Causes et facteurs aggravants](#)

[Conduite à tenir](#)

● Mécanisme de l'essoufflement

Les poumons servent à la fois de pompe à air et de zone d'échanges gazeux. La pompe à air fonctionne en deux temps : inspiration et expiration. L'inspiration est un phénomène actif : contraction du diaphragme qui descend, contraction possible des muscles intercostaux. **L'expiration naturelle est passive**, c'est un relâchement musculaire : aucune force ne s'oppose plus à l'élasticité des poumons, qui se contractent alors en chassant l'air qu'ils contiennent.

Les échanges gazeux ont lieu au niveau des alvéoles : l'oxygène de l'air pénètre dans le sang, alors que celui-ci déverse du gaz carbonique (CO₂) dans les alvéoles.

L'expiration chasse un air chargé en CO₂ alors que l'inspiration apporte aux alvéoles un air riche en oxygène (O₂). Si la consommation d'O₂ augmente, la production de CO₂ augmentera aussi car le CO₂ est le résidu de combustion de l'O₂. **"L'hypercapnie"** est le terme qui décrit une augmentation du taux de CO₂ dans le sang. En cas d'hypercapnie, le centre de commande de la respiration (bulbe rachidien) va augmenter la fréquence ventilatoire dans le but de purger le CO₂ efficacement.

Jusque là tout semble aller bien... On se rappelle que l'expiration est un phénomène passif qui, sans intervention volontaire, utilise uniquement l'élasticité du thorax pour chasser l'air des poumons. Le risque est le suivant : Lors d'un effort, on laisse rentrer beaucoup d'air dans les poumons car la fréquence ventilatoire est importante, on expire mal car **l'expiration naturelle a un débit faible**, les poumons se gonflent, se remplissent de CO₂ en provenance du sang (hypercapnie), le bulbe rachidien commande une augmentation de la fréquence ventilatoire. C'est le cercle vicieux de l'essoufflement ! On est victime d'une respiration superficielle qui va entraîner une hypoxie (manque d'oxygène).

Avant d'aller plus loin dans ce développement, on a reconnu **le point faible du système** : l'expiration. En plongée, l'expiration doit être active et poussée un peu plus loin qu'une expiration naturelle à l'air libre, pour bien évacuer le CO₂ (qui favorise aussi **la narcose et l'accident de décompression**).

● Causes et facteurs aggravants

Les causes classiques, "traditionnelles" :

- La principale cause, toujours présente, est une **expiration insuffisante**, inefficace.
- Le **froid** provoque une augmentation du métabolisme : il faut produire plus de calories, alors on brûle de l'oxygène. Ce qui produit en retour du CO₂ : hypercapnie (première étape d'un essoufflement).
- Des **efforts musculaires** (palmage contre le courant, agitation..) vont également augmenter la consommation d'O₂. S'ils ne sont pas accompagnés et suivis d'une expiration forcée adéquate, c'est l'hypercapnie !
- Un **lestage trop important** place le corps à l'oblique, ce qui entraîne un effort supplémentaire dans les déplacements.
- Une **mauvaise forme physique ou mentale** indique un organisme qui contient déjà beaucoup de gaz carbonique : l'hypercapnie est latente. L'essoufflement n'aura pas besoin qu'on le pousse beaucoup pour se montrer.
- La **peur** a tendance à nous contracter, on "retient", on retient l'air des poumons, on s'essouffle donc plus facilement.

- Un **matériel défectueux**, un détendeur trop dur par exemple, impliquera un effort inspiratoire supplémentaire, qui viendra s'ajouter à l'effort expiratoire toujours présent (quelle que soit la qualité du détendeur, il faut toujours forcer la résistance du clapet de sortie d'air). Une bouteille mal ouverte peut également faire des dégâts.
- La **profondeur** est un élément très important. A 30 ou 40 mètres, un essoufflement survient en quelques secondes. Si on a pas immédiatement la présence d'esprit de vider ses poumons, il ne reste plus qu'à compter sur la vigilance du compagnon de palanquée le plus proche.
- La **mauvaise qualité de l'air**. Facteur important, car les petits écarts de concentration de CO₂ par rapport à la normale prennent des proportions inquiétantes sous pression (Une PpCO₂ de 0,07 bar provoque une syncope). De plus, le CO (monoxyde de carbone), gaz moderne, gêne considérablement le transport de l'oxygène par le sang (en fait, il prend la place de l'O₂ dans le sang !).

Des causes moins connues mais bien réelles :

- Lors d'une **descente rapide**, on expire moins d'air qu'on en inspire (Mariotte). En effet, la pression change très vite et n'est plus la même à chaque étape du cycle respiratoire. On accumule donc de l'air sans presque le renouveler...
- En **immersion**, la cavité abdominale a tendance à occuper plus de volume qu'au sec, pendant que la cavité pleurale (pleurale, ça veut dire "des poumons") voit le sien diminuer : les tissus qui retiennent l'abdomen (sorte de ressorts) n'ont plus à lutter contre la gravitation. Ce seul phénomène implique déjà un effort inspiratoire supérieur en immersion.
- Toujours en plongée, le **volume sanguin** se concentre plus dans les poumons (700 ml en plus), ce qui réduit un peu le volume interne des poumons, donc la capacité respiratoire.
- Du gaz sous pression contient plus de molécules par unité de volume, sa **viscosité** est augmentée, il est donc plus difficile à respirer. La réglementation professionnelle fixe un maximum de 9 grammes de gaz par litre, on a testé 15 à 18 g par litres (dans ce cas extrême, tout effort est déconseillé). L'hélium est intéressant dans un mélange par sa légèreté qui le rend facile à respirer.

C'est plus pour lutter contre l'essoufflement que contre la narcose qu'on utilise l'hélium (Pas de narcose en plongée à saturation).

● **Conduite à tenir**

Si vous êtes témoin, il va falloir devenir acteur :

- Vous avez remarqué le chapelet de bulles qui s'échappe à intervalles réguliers (courts) du détenteur d'un(e) collègue de palanquée ?
- Encore mieux : vous plongez en tendant l'oreille, le rythme rapide de son détenteur vous chatouille les oreilles ? Remontez-le de quelques mètres, sans lui demander, en maintenant son détenteur en bouche. Il sera toujours temps après de faire "stop", "souffle", "ça va ?". La baisse de pression ambiante suffit en général à désamorcer un essoufflement, surtout si la victime cesse tout effort.
- L'ex-essoufflé fait signe "OK, tout va bien". Le garder à l'oeil jusqu'au retour sur le bateau, on ne sait pas comment il récupère. Ne pas hésiter à terminer la plongée si l'essoufflement s'est produit vers la fin de la balade. Dans tous les cas, ne pas redescendre aussi bas que la profondeur à laquelle est survenu l'incident.

Si c'est vous, l'essoufflé(e), ça dépend...

- Ça dépend de vous : si vous vous apercevez que vous êtes en train de faire un essoufflement (ce qui n'est pas toujours évident), SOUFFLEZ ! C'est le moment ou jamais de travailler l'expiration forcée et d'utiliser pour ça les ABDOMINAUX. Ces muscles sont terriblement efficaces quand il s'agit de comprimer l'abdomen pour purger les poumons...
- Si vous êtes dépassé par les événements, vos partenaires sont là, près de vous... car vous ne plongez jamais seul.

L'Hyperoxie

L'oxygène nous est indispensable. Si on vient à en manquer, on risque l'**aphyxie** (manque d'oxygène). Ce que l'on sait moins, c'est que trop d'oxygène ne nous réussit pas non plus... L'excès d'oxygène (hyperoxie) peut avoir des conséquences sérieuses. Les plongeurs sont particulièrement concernés par ce risque.

Sujets abordés dans cette page :

[Mécanisme de l'hyperoxie](#)

[L'effet Paul Bert](#)

[L'effet Lorrain Smith.](#)

● Mécanisme de l'hyperoxie

Notre organisme tolère quelques variations dans la pression partielle d'oxygène respiré. Cette PpO_2 doit être comprise entre 0,17 bar et 0,5 bar. Ce sont les conditions "normoxiques". L'hyperoxie (trop d'oxygène) apparaît quand $PpO_2 > 0,5$ bar. Les effets nocifs de l'oxygène proviennent des propriétés chimiques des ions O^- (on les appelle "radicaux libres"). Ces ions sont très réactifs et peuvent altérer nos cellules s'ils deviennent trop nombreux. Les mécanismes de régulation du taux de radicaux libres sont complètement dépassés si on respire un air trop riche en oxygène.

En fonction du temps d'exposition à l'oxygène et de sa pression partielle, les radicaux libres provoqueront une altération fonctionnelle des cellules nerveuses (accident neurotoxique), voire une altération morphologique au niveau des alvéoles pulmonaires si l'exposition est très longue.

Comme on va le voir, nous autres plongeurs exploitons la connaissance de ce risque pour nous fixer une profondeur maximale en fonction du mélange gazeux respiré.

● L'effet Paul Bert

La toxicité neurologique de l'oxygène survient à partir d'une $PpO_2 > 1,6$ bar. Cette toxicité se manifeste par une crise convulsive avec perte de connaissance appelée "[effet Paul Bert](#)", du nom de celui qui l'a mise en évidence. On distingue 3 phases dans la crise hyperoxique : une phase tonique (contractions musculaires), une phase clonique (ramollissement) et une phase finale dépressive. La crise hyperoxique s'interrompt d'elle même quand on cesse l'inhalation d'oxygène.

Cette crise à caractère épileptique est **parfois** précédée de signes avant-coureurs : accélération du rythme cardiaque (tachycardie), secousses musculaires, nausées, anxiété ou confusion, troubles de la vue.

Ce seuil est atteint en plongée à l'air à une profondeur de -66 m. Lors de plongées au nitrox, il faut recalculer la profondeur limite en fonction du taux d'oxygène dans le mélange, car ici, la profondeur limite sera plus facilement atteinte. Par exemple, si on respire du nitrox contenant 40% d'O₂, il ne faudra pas dépasser -30 m.

L'apparition de cette crise est aussi fonction de la durée de l'exposition (le temps de latence est variable pour une même personne), de l'activité musculaire, et bien entendu, de la PpO₂ respirée.

● **L'effet Lorrain Smith**

L'inflammation des alvéoles des poumons, connue sous le nom "[effet Lorrain Smith](#)" apparaît après un séjour de plus de deux heures à une PpO₂ > 0,5 bar. A la différence de l'effet Paul Bert, l'effet Lorrain Smith n'est pas un accident aigu, bien qu'il provoque un oedème pulmonaire si on le laisse évoluer ! Un plongeur, respirant de l'air, qui passerait 2 heures à -15 mètres s'expose à ces lésions.

Etant donnée la durée de l'exposition, ceci concerne surtout les professionnels qui plongent à saturation (Ces plongeurs restent à la même pression pendant toute la durée du chantier. Ils n'effectueront qu'une seule décompression dans un caisson).

Les symptômes en sont : face rose, gêne respiratoire, toux, brûlures alvéolaires, oedème pulmonaire. Il faut enfin savoir qu'en fonction de la durée d'exposition et de la pression partielle d'oxygène, l'effet Lorrain Smith peut apparaître avant la crise convulsive !

L'Hyperventilation

Lorsqu'on retient sa respiration un certain temps, le besoin impérieux de respirer se fait sentir. Le plaisir de l'apnée sera d'autant plus grand si on arrive à retarder cet instant. Une condition pour bien profiter de l'apnée est d'être détendu, le plus « zen » possible. L'entraînement et l'augmentation progressive de la durée de l'apnée sont aussi des facteurs importants. Même si ces dernières conditions sont réunies, il reste le plus important : la ventilation juste avant l'apnée.

La ventilation a pour but d'éliminer le gaz carbonique du sang et charger ce dernier en oxygène pour qu'il aille aussitôt nourrir le corps. Entre deux apnées, il faut donner suffisamment de temps à notre organisme pour effectuer cette purge. Une respiration lente et profonde favorisera ce processus. Toutefois, un danger guette l'apnéiste à cet instant : paradoxalement, il ne doit pas trop se ventiler.

Explication :

L'air des alvéoles contient plus de gaz carbonique que l'air que nous respirons, car le cycle inspiration / expiration est relativement lent : pendant qu'on apporte de l'air frais aux poumons, le sang continue à déverser du gaz carbonique dans les alvéoles. Il faut savoir aussi que le besoin de respirer survient lorsque la quantité de gaz carbonique atteint un certain seuil dans les poumons.

Ce dernier point va s'avérer très important ; ce ne sont pas les organes en manque qui provoquent le besoin de respirer, mais l'évaluation de la quantité de gaz carbonique présente dans les poumons.

Si on respire profondément très vite (hyperventilation), on va purger une partie du gaz carbonique contenu dans les alvéoles pulmonaires. Le résultat de cette manoeuvre est facile à comprendre : si l'hyperventilation a été longue, il n'y a presque plus de gaz carbonique dans les poumons, il va donc falloir plus de temps que la normale pour atteindre le seuil du besoin de respirer. L'apnée va durer plus longtemps...

La faille est la suivante : le corps de l'apnéiste qui s'est hyperventilé consomme autant d'oxygène que celui de n'importe qui. Il risque d'arriver au point où ses réserves en oxygène sont proche du zéro. Il ne s'en apercevra pas car le gaz carbonique dans ses poumons n'a pas encore atteint le seuil du besoin de respirer. Alors que l'apnéiste ne se doute de rien, un manque d'oxygène du cerveau peut provoquer une syncope !

Moralité, pas d'hyperventilation avant l'apnée !!!!

Le Rendez-vous Syncopal des 7 mètres

Un nom bizarre pour un accident spécifique à l'apnée. Son mécanisme fait qu'il ne touche pas que les débutants. En gros, il menace tous ceux qui aiment pousser leurs limites un peu loin. Voici donc le mécanisme de la syncope qui guette l'apnéïste lors de la remontée d'une apnée profonde.

Après avoir pris une bonne inspiration en surface, l'apnéïste entame sa descente. La pression ambiante est communiquée à toutes les parties du corps. La pression de l'air dans les poumons augmente donc avec la profondeur (elle est transmise par l'élasticité de la cage thoracique).

L'oxygène de l'air des poumons va se diffuser plus rapidement dans le sang, donnant ainsi une impression de bien-être au plongeur, l'impression de pouvoir "tenir" longtemps !

Pendant la remontée, le taux d'oxygène dans le sang va chuter brutalement car la pression diminue et le corps continue à consommer de l'oxygène. Entre 10 et 5 mètres avant la surface, le phénomène s'accélère car la pression diminue d'autant plus vite qu'on se rapproche de la surface. On se retrouve dans la situation où le corps a un intense besoin en oxygène au moment où celui-ci se fait rare ! Le premier organe à réagir sera le cerveau : le manque d'oxygène provoque une syncope.

Une [hyperventilation](#) excessive est bien sûr un facteur très aggravant. La position de l'apnéïste pendant la remontée peut aussi favoriser la syncope : on remonte souvent en levant la tête vers la surface, ce qui a pour effet de comprimer les carotides (artères qui alimentent le cerveau) et gêner le passage du sang.

Pour éviter cet accident il faut entamer la remontée avant de ressentir le besoin de respirer. La quasi-euphorie communiquée par l'important flux d'oxygène dans le sang doit aussi être perçue comme une mise en garde !

Les Profils de Plongée

Nous apprenons tous lors de notre formation de plongeur les règles d'évolution qui nous mettent à l'abri de l'accident de décompression. Parmi celles-ci, deux sont essentielles : respecter la **durée des paliers** et respecter la **vitesse de remontée**.

Cette page se propose d'en "remettre une couche" car j'ai souvent observé des négligences qui peuvent avoir des conséquences catastrophiques.

Vous trouverez ici des arguments supplémentaires pour appuyer ces règles et inciter chacun à observer [Le bon profil](#).

🔴 **Le respect de la durée des paliers**

Plusieurs causes peuvent pousser à écourter une décompression : l'impatience (accompagnée d'un excès de confiance en soi), un bloc vide (on n'est pas remonté dès le premier passage sur réserve)...

Une fois remonté, on n'est pas parfaitement tranquille. On guette les chatouilles, les petites douleurs, on boit plus d'eau que d'habitude, on se dit que les tables ou les ordinateurs ont de la marge... Puis, les heures passant, l'inquiétude disparaît pour laisser place à un moral d'acier, prêt à repartir pour de nouvelles aventures. On s'aperçoit bientôt que tout va bien et on peut s'habituer à abrégé la décompression.

Que se passe-t-il dans notre corps après une décompression normale ? Notre organisme est en sursaturation d'azote après la remontée. Nous n'atteindrons la saturation que dans de nombreuses heures. Notre sang est plein de **microbulles** d'azote (et de gaz carbonique) qui se résorbent progressivement dans les poumons.

Si la décompression a été incomplète, ces microbulles, plus nombreuses, ont tendance à former des macrobulles (plus grosses) qui risquent d'aller se coincer quelque part avec toutes les conséquences que l'on connaît. Vous ne les connaissez pas ? continuez quand même la lecture de cette page car dans un premier temps, il est plus important d'apprendre la prévention.

Beaucoup de microbulles vont aussi prendre l'habitude de se concentrer toujours aux mêmes endroits sans que vous vous en rendiez compte.

Elles vont provoquer de mini accidents de décompression imperceptibles ou à la limite de la perception. Certains tissus vont finir par recevoir régulièrement la visite de ces bulles et vont commencer à se nécroser.

L'accident de décompression surviendra d'autant plus rapidement que le tissu est préparé, même si la plongée était "normale". L'accident peut être progressif, comme dans le cas des articulations des plongeurs professionnels victimes d'ostéonécrose dysbarique : Les cartilages atteints rendent l'articulation douloureuse et peuvent même générer une infirmité.

Même s'il est vrai que les tables ont une certaine marge de sécurité, il faut savoir qu'elle est bien mince. De plus, les tables de la Marine Nationale ont été calculées pour des personnes jeunes, entraînées et en pleine forme physique.

Et les ordinateurs alors ? Ils réagissent en fonction d'algorithmes similaires à ceux qui permettent de calculer les tables.

🌐 Le respect de la vitesse de remontée

Pourquoi impose-t-on une certaine vitesse de remontée ? Les différents tissus (nom mathématique : compartiments) ont des périodes variables. On en parle à la page traitant de la saturation des tissus. Une remontée lente est nécessaire pour désaturer convenablement les tissus rapides (ceux qui ont une période courte, qui se saturent rapidement). Les paliers serviront, eux, à désaturer les tissus lents (période longue).

Voici un tableau provenant du site UWATEC <http://www.uwatec.com> :

	Période	Organes concernés
Compartiment 1	5 min	reins
Compartiment 2	10 min	estomac, viscères, foie, système nerveux central
Compartiment 3	20 min	viscères, foie, système nerveux central
Compartiment 4	40 min	peau
Compartiment 5	80 min	peau, muscles, coeur
Compartiment 6	160 min	muscles
Compartiment 7	320 min	muscles, articulations, os, graisse
Compartiment 8	640 min	gras, articulations, os, reste du corps

Une remontée rapide génère très rapidement des bulles dans les tissus, qu'ils soient rapides ou non. Pendant une plongée, il peut arriver d'avoir à contourner un obstacle par le dessus : coque d'épave, petit sec, haut d'un tombant...

Si ce déplacement vers le haut est fait sans respecter la vitesse de remontée normale, il doit être assimilé à une remontée partielle rapide.

La vitesse de remontée préconisée dans les des tables MN 90 est de 15 m/min. C'est bien supérieur à celle recommandée par la plupart des ordinateurs, souvent de l'ordre de 10 m/min.

L'accumulation de "petites" remontées rapides lors d'une plongée donne un "profil en yo-yo" et génère beaucoup de petites bulles. Le risque est maximum lors des plongées techniques ou d'examens, lorsqu'on pratique les exercices de remontée d'assistance ou de sauvetage. Pauvres moniteurs !

Le profil en yo-yo peut provoquer des catastrophes. Les bulles libérées dans le sang lors de la remontée s'accumulent dans les capillaires des poumons. Le fait de redescendre va augmenter la pression absolue, réduire le volume de ces bulles au point de les laisser passer dans le circuit artériel vers le coeur qui va les propulser dans l'aorte. C'est là que se trouvent les entrées des carotides, les artères qui irriguent le cerveau...

● Le bon profil de plongée

On ne correspond peut-être pas au physique du jeune militaire sportif, on est peut-être aussi "un peu enveloppé", on fume, on a fait quelques efforts pendant la plongée (c'est pratiquement toujours le cas dans pas mal de région et quand on est débutant). On a ici un certain nombre de raisons pour ne jamais abrégé les paliers. Ajouter une ou deux minutes au dernier palier (à -3 m) est une saine précaution. Si tout ceci ne vous concerne pas, c'est peut-être vrai pour un autre membre de la palanquée.

Le profil de plongée idéal est le suivant : Atteindre la profondeur prévue maximale dès le début de la plongée, puis faire la balade en remontant tranquillement. Tous les sites ne le permettent pas. Lors de la remontée, en l'absence d'autres repères, il ne faut jamais dépasser une bulle visible. La respiration pendant toute la remontée (ceci comprend les paliers) doit être profonde et sans retenue. Enfin, le retour à la surface doit être très lent.

Une fois en surface, gonfler la stab et palmer le moins possible.

GAZS RESPIRATOIRES

Limites de Plongée à l'Air

L'oxygène est toxique à partir d'une certaine pression. Si on respire de l'oxygène à une pression supérieure à 1,6 bar, on risque un malaise grave (crise à caractère épileptique). L'air est composé approximativement de 20% d'oxygène et 80% d'azote. Au niveau de la mer, la pression atmosphérique est de 1 bar. La part de pression due à l'oxygène est donc de 0,2 bar (c'est la "pression partielle" de l'oxygène).

En plongée, la pression de l'air respiré dans le détendeur augmente avec la profondeur. Par exemple à une profondeur de 20m, il règne une pression de 3 bar, l'air respiré est donc lui aussi à 3 bar. La pression partielle d'oxygène dans cet air représente toujours 20% de cette pression, c'est-à-dire 0,6 bar. Si les plongeurs continuent à descendre, la pression partielle de l'oxygène respiré continue de croître et peut atteindre ou dépasser la limite des 1,6 bar (à une profondeur de 70m environ).

L'azote est toxique à partir d'une certaine pression. Sa toxicité se manifeste par ce qu'on appelle couramment "l'ivresse des profondeurs" ou plus simplement "narcose à l'azote". Un des symptômes est une forte baisse de la concentration, ce qui peut s'avérer très dangereux en cas d'incident.

Tous les sujets n'ont pas la même sensibilité à la narcose. De plus une même personne peut être plus ou moins sensible en fonction du moment. Cet état apparaît chez le plongeur entre 30 et 40m de profondeur. Au delà, tout le monde est plus ou moins **narcosé**.

En conclusion on peut dire que l'air est un gaz acceptable en plongée de loisir pour des profondeurs ne dépassant pas 40m. Les tables de plongées courantes sont prévues pour des profondeurs maximum de cet ordre.

Plonger au NITROX

On appelle "**nitrox**" le mélange **Oxygène + Azote enrichi en oxygène**. La plongée au nitrox présente des avantages : le pourcentage d'azote du mélange respiré est plus faible qu'avec l'air. Par conséquent la dissolution de l'azote dans les tissus est également plus faible. Il en résulte qu'on peut plonger plus longtemps et faire moins de **paliers de décompression** qu'avec de l'air. Après une plongée au **nitrox**, la fatigue est moins importante qu'après une plongée à l'air.

La contrepartie réside dans des risques spécifiques au **nitrox**. La part de pression due à l'oxygène (pression partielle) dans le mélange respiré ne doit pas dépasser **1,6 bar** (voir **les limites de la plongée à l'air**). Par exemple, avec un mélange à 40% d'oxygène, les plongeurs ne devront pas dépasser la profondeur de -30m. A ce sujet, on peut faire une remarque intéressante : si ces plongeurs descendent à -25m, la pression partielle de l'oxygène dans le mélange respiré sera de 1,4 bar. Cela correspond à la pression partielle d'oxygène lors d'une plongée à l'air à -60m !

Si on plonge au **nitrox**, les calculs des paliers de décompression devront être adaptés au type de mélange utilisé. Le matériel doit être entretenu en prenant des précautions particulières à cause de la grande quantité d'oxygène présente.

Ce type de plongée doit être effectuée dans un centre ou un club agréé et bénéficier d'un matériel particulier et d'un encadrement spécialement formé.

HISTORIQUE

Les Personnages Célèbres

**Classement
Historique :**

Archimède
Torricelli
Mariotte
Boyle
Henry
Dalton
Paul Bert
Lorrain Smith
Yves le Prieur
Emile Gagnan
Hans Haas
Jacques-
Yves Cousteau

**Classement
alphabétique :**

Archimède
Paul Bert
Boyle
Jacques-
Yves Cousteau
Dalton
Emile Gagnan
Hans Haas
Henry
Lorrain Smith
Yves le Prieur
Mariotte
Torricelli

Pour des biographies détaillées : <http://www.archivesmaritimes.com/>

Archimède (287 - 212 av.JC)

Physicien et mathématicien né à Syracuse en Sicile. Il est connu des plongeurs pour avoir posé les bases du calcul de la flottabilité grâce à son principe décrit sur la page [Lois physiques](#). C'était un génie, il a inventé le palan, le levier, les engrenages et le téléphone portable (vérifier ce dernier point).

● **Evangelista Torricelli (1608 - 1647)**

Physicien Italien qui a mesuré en 1643 la pression atmosphérique à l'aide de l'expérience décrite sur la page [La pression](#).

● **Edme Mariotte (1620 - 1684)**

En 1676, ce moine français complète la loi de Boyle en ajoutant "à température constante", ce qui nous donne la célèbre loi de Boyle-Mariotte de la page [Lois Physiques](#).

● **Robert Boyle (1627 - 1691)**

Irlandais, souvent appelé "père de la chimie". Il fut le premier à suggérer un classement des éléments en fonction de leurs propriétés chimiques et une distinction entre les molécules et les éléments. On le connaît surtout pour ses travaux sur les gaz, voir pour cela la fameuse loi de Boyle-Mariotte sur la page [Lois physiques](#). C'est lui qui a trouvé que l'air avait un poids. Il est le premier, en 1670, à étudier la présence de bulles dans le sang d'animaux morts

● **William Henry (1774 - 1836)**

Physicien et chimiste anglais. En 1803, il énonce la loi sur la dissolution des gaz dans les liquides. Il a sa place dans la page des [Lois physiques](#).

● **John Dalton (1766 - 1844)**

Il a formulé en 1801 la loi d'addition des pressions partielles dans les mélanges gazeux, on en trouvera les différents énoncés à la page [Lois Physiques](#).

● **Paul Bert (1833 - 1886)**

Physiologiste et homme politique français connu pour ses travaux sur les tissus vivants. En 1873, il découvre les effets sur l'organisme de l'oxygène sous pression : [la crise hyperoxique](#).

● **James Lorrain Smith (1862 - 1931)**

En 1897, il étudia l'inflammation des alvéoles pulmonaires sous une forte pression partielle d'oxygène. Cette intoxication s'appelle désormais "effet Lorrain Smith". On en parle sur la page traitant de [l'hyperoxie](#).

● **Yves le Prieur (1885 - 1963)**

Inventeur du scaphandre autonome : le plongeur transporte sa réserve d'air comprimé et gère manuellement le débit. Les premières expérimentations eurent lieu en 1926. Ce militaire inventif créa toutes sortes d'armes. Personne n'est parfait.

● **Emile Gagnan (? - ?)**

Ingénieur spécialisé dans les gaz et inventeur d'un détendeur miniature (pour l'époque). En 1943, à la demande de Jacques-Yves Cousteau, il l'adapta à la plongée sous-marine autonome à l'air.

● **Hans Haas (né en 1919)**

Biologiste marin autrichien. Il a réalisé les premiers films sous-marins, en apnée. Il est surtout connu pour ses films sur les requins et son engagement dans la protection de l'environnement.

Son site web : <http://www.hans-hass.de/>

● **Jacques-Yves Cousteau (1910 - 1997)**

Il a vulgarisé la plongée sous-marine dans le monde entier. Il a réalisé des dizaines de films sous-marins, écrit plus de 50 ouvrages. Sa renommée lui a donné les moyens de sensibiliser plusieurs générations à la beauté et la fragilité de l'environnement sous-marin.

NOUS CONTACTER :

www.capdive.com

thierrymoulin@capdive.com