

# UN RISQUE DE LA PLONGÉE SOUS-MARINE : LA DÉCOMPRESSION

Pierre Labarbe

## Partie des programmes de physique-chimie associée

Programme d'enseignement de spécialité de physique-chimie de la classe de première de la voie générale (en vigueur à partir de la rentrée 2019) – Mouvement et interaction – 3. Description d'un fluide au repos

**Mots-clés :** pression, loi de la statique des fluides, force pressante, dissolution, loi de Henry

## INTRODUCTION

La pratique de la plongée sous-marine n'a été rendu possible que par une succession d'améliorations techniques : découverte de la vulcanisation, recours à l'air comprimé, invention du scaphandre... Malgré les progrès réalisés, un problème est longtemps resté mystérieux, qu'on appelait alors le « mal des scaphandriers ». Les premiers plongeurs ne remontaient en effet pas indemnes de leur immersion : douleurs et blocages aux articulations, paralysies, vieillissement prématuré, voire décès. Une solution est aujourd'hui bien connue pour limiter ces effets et éviter les accidents les plus graves. En quoi consiste-elle, quel en est le principe ?

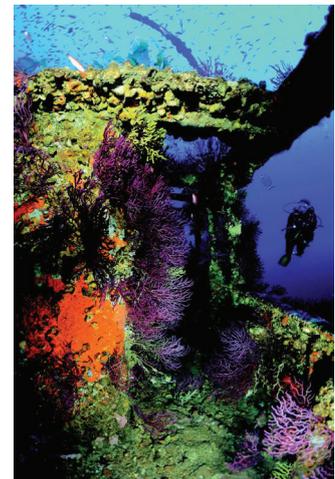


Figure 1 – La plongée, une activité de loisir dans des conditions de pression atypiques. Photo : © Jérôme Clabé et Laurence Saulnier.

## COMMENT LE CORPS HUMAIN RÉAGIT À LA PRESSION LORS DE LA DESCENTE EN PROFONDEUR ?

### La plongée, une activité sous haute pression

Quand on plonge en profondeur, la pression augmente. En surface, la pression est celle de l'atmosphère, elle est de l'ordre d'1 bar ( $10^5$  Pa). Sous l'eau, il faut y ajouter celle du fluide entourant le plongeur, il en résulte une augmentation de

l'ordre de 1 bar chaque fois que la profondeur augmente de 10 m. Cet ordre de grandeur peut se retrouver à l'aide de la loi de la statique des fluides :  $\Delta P = \rho g \Delta h$ , où  $\Delta P$  est la variation de pression et  $\Delta h$  la variation de profondeur,  $\rho$  la masse volumique de l'eau et  $g$  l'intensité du champ de pesanteur (voir figure 2).

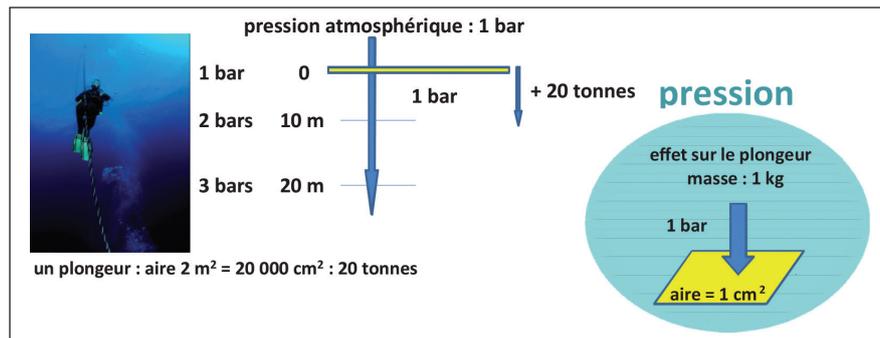


Figure 2 – La pression et la force pressante augmentent quand la profondeur augmente.

Une pression de 1 bar est celle qui résulte de la force pressante exercée par une masse de 1 kg sur une surface de 1 cm<sup>2</sup>. La surface du corps humain étant de l'ordre de 2 m<sup>2</sup>, une augmentation de pression de 1 bar tous les 10 m correspond à une augmentation de 20 tonnes. Pour que le corps d'un plongeur résiste à de telles forces, il faut que l'air qu'il respire en profondeur soit à la même pression que celle qui règne sous l'eau. On dit que la plongée se pratique en condition hyperbare et à pression variable. La conception d'un système amenant cet air comprimé en profondeur a été l'une des premières conditions pour plonger. L'utilisation de bouteilles d'air comprimé à 200 bars, associée à un détendeur est aujourd'hui la norme. La pression de l'air respiré à une profondeur de 10 m est donc de l'ordre de 2 bars, à 20 m de 3 bars, etc. Dans ces conditions les fluides de notre corps dissolvent les gaz qu'il contient, c'est ce phénomène qui est à l'origine des accidents de décompression.

### Le sang dissout le dioxygène et le diazote respirés

C'est au physiologiste Paul Bert en 1878 qu'on doit une première explication du mal des scaphandriers : sous pression, les liquides du corps dissolvent les gaz. Mis en présence d'un liquide, un gaz se dissout jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint et qu'une valeur de concentration à saturation soit atteinte. À température constante, la concentration en ce gaz est quasiment proportionnelle à la pression qui règne [voir graphique de la figure 3]. C'est ce que traduit la Loi de Henry. Si on double la pression, la concentration en un gaz dissous double. C'est ce qui se passe pour les plongeurs : le diazote et le dioxygène respirés se dissolvent dans le sang et sont distribués dans le corps du fait de la circulation sanguine. Le dioxygène est (au moins en partie) consommé par l'organisme mais ce n'est pas le cas du diazote. Sa concentration augmente, d'autant plus que la profondeur est élevée et que la plongée dure longtemps : on dit que le plongeur se sature. Le diazote est inerte et ne constitue donc pas un problème à la descente. Il en revanche problématique à la remontée.

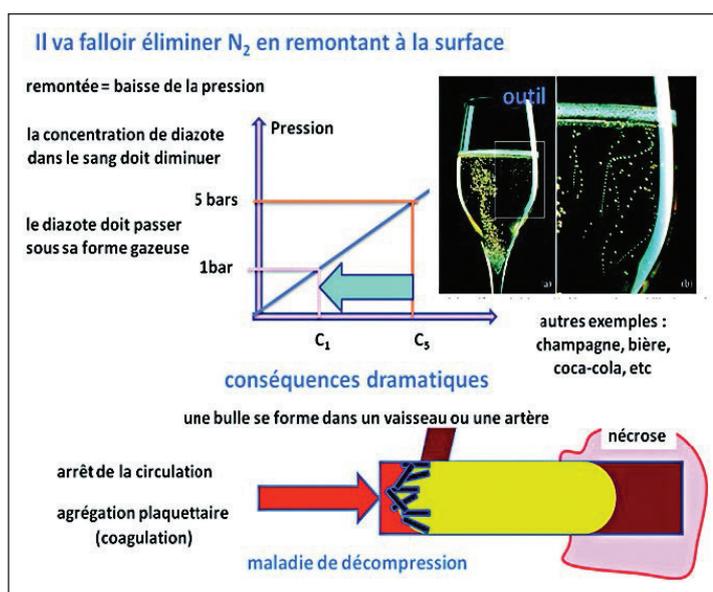


Figure 3 – Le sang d'un plongeur se transforme en boisson gazeuse dont on ouvrirait le bouchon pendant la phase de remontée. Cela peut conduire à la maladie de décompression.

### L'accident et la maladie de décompression

Au cours de la remontée, la pression ambiante diminue, la valeur de la concentration à saturation diminue aussi. Le diazote se retrouve alors en excès. La situation est similaire à celle d'une bouteille de boisson gazeuse qu'on débouche : quand on ouvre la bouteille, on fait chuter la pression et une partie du gaz en excès s'échappe [voir aussi figure 3]. Si le plongeur remonte trop vite et si, par conséquent, la pression chute rapidement, des bulles de diazote peuvent se former et entraver la circulation sanguine jusqu'à l'arrêter, provoquant un accident de décompression.

Si rien n'est fait pour éliminer les bulles de l'organisme, celui-ci va réagir à l'intrusion de ce corps étranger en provoquant notamment une agrégation de plaquettes autour des bulles à l'interface liquide/gaz [voir à nouveau la figure 3]. Cet agrégat peut être difficile à éliminer, entraînant éventuellement une nécrose des tissus placés en aval de la bulle. Il peut en résulter des douleurs voire des blocages d'articulations si ces bulles se forment dans ces régions. Mais si elles se forment au niveau du cerveau ou de la moelle épinière, les conséquences peuvent être bien plus graves.

## POURQUOI REMONTER À LA SURFACE EN EFFECTUANT DES PALIERS DE DÉCOMPRESSION ?

### La formation de bulles, un mécanisme coûteux en énergie

L'agrégation de molécules de diazote pour former des bulles nécessite en fait la création d'une interface liquide/gaz. Or, il faut pour ce faire lutter contre les forces de cohésion qui existent entre les molécules du

liquide (liaisons hydrogène notamment). Du point de vue thermodynamique, cette transformation nécessite de l'énergie. Plus précisément, il existe un rayon critique en dessous duquel le phénomène de croissance des bulles n'est pas spontané (voir figure 4 et encadré). Si des bulles de petite taille (dont le rayon  $r$  est inférieur au rayon critique  $r_c$ ) viennent à se former, l'énergie du système augmente, ce qui est contraire au sens d'une évolution spontanée. Dans ces conditions, les bulles se désagrègent pour diminuer l'énergie du système. Il en résulte qu'une solution sursaturée en diazote est en fait relativement stable. Si un processus de remontée permet au plongeur de maintenir son organisme dans cet état, il peut alors éviter l'accident de décompression.

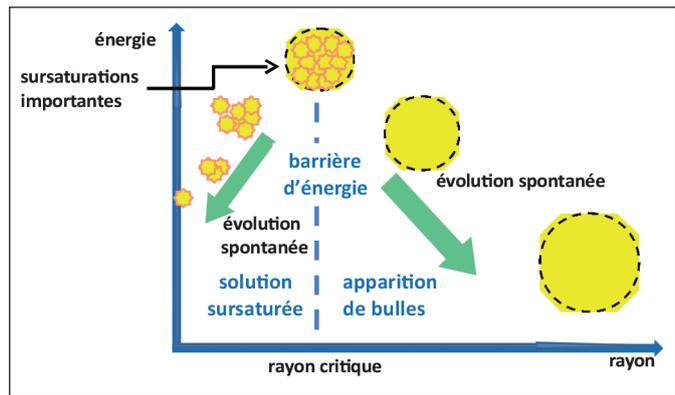


Figure 4 – L'apparition de bulles de diazote dans le sang n'est thermodynamiquement favorable qu'à partir d'un rayon critique de ces bulles.

### Une remontée trop rapide, cause de l'accident de décompression

En cas de remontée trop rapide du plongeur, des bulles de plus grosse taille peuvent se former. Si leur rayon atteint le rayon critique  $r_c$ , alors le système peut évoluer spontanément dans le sens de la formation des bulles. La croissance des agrégats fait diminuer l'énergie du système. C'est dans ces conditions que peut se

#### Sursaturation et nucléation

La stabilité d'une bulle de diazote dans le sang résulte de la compétition entre une contribution volumique et une contribution surfacique :

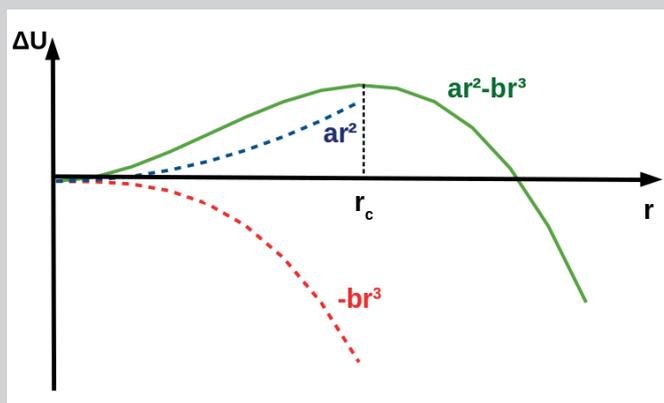
- ▶ la formation de cette bulle sphérique de rayon  $r$  et de surface  $S = 4\pi r^2$  nécessite la création d'une interface liquide/gaz. La variation d'énergie associée est

$$\Delta U_{\text{interface}} = W(\bar{F}_{\text{pression}}) = \int \bar{F}_{\text{pression}} \cdot \bar{d}r = \int P S dr = \int \frac{2\gamma}{r} 4\pi r^2 dr = \int 8\gamma\pi r dr = 4\pi\gamma r^2.$$

$P$  est donnée par la loi de Laplace  $P = \frac{2\gamma}{r}$ .

- ▶ cette formation est facilitée par l'état de sursaturation en diazote du sang, elle libère une énergie  $\Delta u_{\text{volume}} = \frac{4}{3}\pi r^3 (u_{\text{gaz}} - u_{\text{liquide}})$  où  $u_{\text{gaz}}$  et  $u_{\text{liquide}}$  sont les énergies volumiques de la phase gazeuse et de la phase liquide. Si la concentration est supérieure à la concentration de saturation, alors  $u_{\text{liquide}} > u_{\text{gaz}}$  : l'état gazeux est plus stable que l'état liquide, ou encore  $\Delta u = u_{\text{gaz}} - u_{\text{liquide}} < 0$ . Le terme volumique est donc négatif.

La variation d'énergie interne du sang lors de la création d'une bulle est donc la somme de ces contributions  $\Delta U = 4\pi\gamma r^2 + \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta u$ . La courbe représentative des variations de  $\Delta U$  a la forme suivante (voir figure 5), ce qui permet de compléter la figure 4.



Le rayon critique s'obtient par dérivation :

$$\frac{d\Delta U}{dr} = 0 \text{ pour } r=r_c$$

$$\text{tel que } 8\pi\gamma r_c + 4\pi r_c^2 \Delta u = 0$$

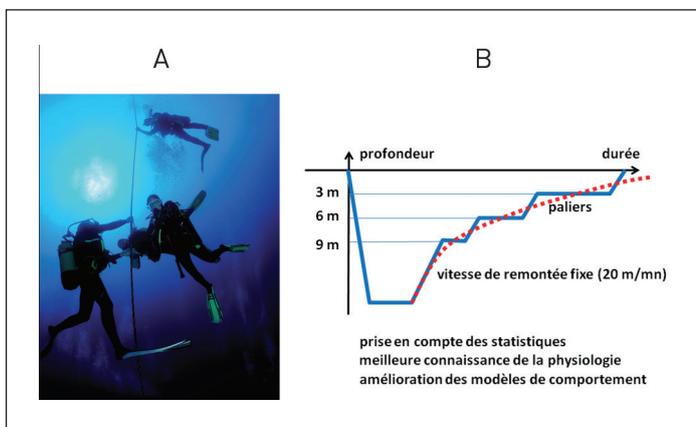
$$\text{c'est-à-dire } r_c = \frac{-2\gamma}{\Delta u}.$$

Figure 5 : Le bilan énergétique de la formation d'une bulle de diazote dans le sang est la contribution d'un terme surfacique positif [en  $r^2$ , lié à la création d'une interface liquide gaz] et d'un terme volumique négatif [en  $r^3$ , lié à la stabilité de la solution sursaturée en diazote]. © Pierre Labarbe.

produire un accident de décompression. Les plongeurs en apnée sont moins soumis à ce risque. Ils restent en général moins longtemps sous l'eau, ce qui limite la dissolution des gaz dans leur sang. Ils peuvent donc remonter plus rapidement que des plongeurs en bouteille.

### Les paliers de décompression pour faciliter l'élimination du diazote en évitant la formation de bulles

La technique des paliers de décompression consiste à faire remonter un plongeur de manière à l'écartier des conditions d'équilibre et à provoquer des échanges gazeux qui permettront l'élimination du diazote. La hauteur de remontée doit cependant rester suffisamment faible pour rester dans le domaine où les bulles de gaz formées ne dépassent pas le rayon critique. En pratique, la hauteur entre 2 paliers est de 3 m (voir [figure 6](#)). Le plongeur doit alors rester quelques temps à la même profondeur (de 3 à 25 minutes), de manière que le diazote soit partiellement éliminé. Il recommence alors ce processus, autant de fois et aussi longtemps que nécessaire, en fonction de la profondeur à laquelle il a plongé et de la durée de sa plongée. Il existe des tables de décompression utilisées dans le cadre professionnel ou pour la plongée de loisir dans lesquelles les durées des paliers sont répertoriées.



## CONCLUSION

La plongée sous-marine peut constituer un loisir sûr. Il s'est d'ailleurs développé un réseau d'encadrants bien structuré au niveau national et international. Toute certification nécessite cependant quelques connaissances physico-chimiques de base pour, sinon comprendre en profondeur les phénomènes sous-jacents, du moins avoir conscience des dangers associés et des procédures de sécurité à respecter. Au-delà des problèmes de décompression, il peut notamment être utile de comprendre comment se comporte un gaz dans des conditions où la pression évolue. Bien que limité, le modèle des gaz parfaits peut alors constituer un outil intéressant de la physique-chimie pour y parvenir.

## SOURCE PRINCIPALE

La chimie et le sport, EDP Sciences, 2011, ISBN : 978-2-7598-0596-9, « Comprendre la physico-chimie par la plongée sous-marine. Comprendre la plongée sous-marine par la physico-chimie » par Pierre Letellier.

Pierre Labarbe est professeur agrégé de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen