Logiques des contradictions dans les pratiques humaines subaquatiques

Approche croisée entre apnée et plongée sous-marine

Serge ELOI

LIRTES (EA 7313), Université Paris-Est Créteil

DOI : https ://doi.org/10.17184/eac.8292

Résumé : Relevant de milieux quasi extrêmophiles, les pratiques sub-aquatiques (apnée et plongée) soumettent les organismes à des contraintes qui les obligent à se transformer pour perdurer en gérant des contradictions. L'option théorique du matérialisme dialectique renvoie à l'usage de la dialectique comme pensée logique des contradictions. Si en apnée, l'accumulation de gaz carbonique conduit à limiter le temps passé sous l'eau et invite à remonter à la surface, en plongée descendre profondément et longtemps nécessite d'éliminer l'azote qui a diffusé dans les tissus et exige un temps de remontée plus long. L'apnéiste est ainsi amené à sortir de l'eau alors qu'il souhaiterait y rester tandis que le plongeur doit y rester quand il voudrait en sortir. Les techniques et procédures nécessaires à cette intromission en milieu aqueux sont discutées à l'aune des deux points de vue.

Mots-clés : Apnée, plongée, matérialisme dialectique, contradiction

Abstract: Considered as being quasi extremophile environments, subaquatic practices (apnoea and free diving) subject organisms to constraints that force them to transform themselves in order to survive by managing contradictions. The theoretical framework based on dialectic materialism consists of using the dialectic approach as a way to think logically about contradictions. While in apnea, the accumulation of carbon dioxide limits the time spent underwater and requires oneself to return to the surface, in scuba diving, diving deep for a long period of time requires oneself to eliminate the nitrogen that has diffused into the body's tissues, and demands a longer ascent time. Freedivers have to get out of the water when they'd like to stay in, while divers have to stay in when they'd like to get out. The techniques and procedures required for this intromission into an aqueous environment are discussed from both points of view.

Keywords: apnea, free diving, dialectic materialism, contradiction, scuba diving

1 Introduction

Les sciences de l'éducation ne se cantonnent pas uniquement aux domaines scolaires, universitaires ou de la formation continue. Les secteurs de l'entraînement et de l'animation sont aussi concernés par la nécessité de comprendre l'imprédictibilité et le

paradoxe dans le fonctionnement de l'homme en train d'apprendre et de se développer pour demeurer capable. Il en est ainsi dans le domaine des pratiques physiques sportives et artistiques (PPSA) où la complexité des systèmes de production de la performance se réfère autant à des connaissances scientifiquement établies qu'à des savoirs de terrain issus d'intuitions que l'usage à long terme a fini par valider. Le propos développé dans ces lignes sera plus particulièrement consacré aux pratiques subaquatiques. Dans ce secteur aussi, les acteurs font usage de connaissances mixtes. D'aucunes relèvent de démarches scientifiques tandis que d'autres, qui n'ont pas fait l'objet de recherches avérées et qui ne sont pas attestées par un protocole rigoureux d'administration de la preuve, interpellent en retour le milieu universitaire. Bien qu'inexpliquées à ce jour, ces façons de faire issues du terrain peuvent même parfois contredire les prévisions des scientifiques les plus présomptueux. C'est le cas en apnée où la médecine avait d'abord estimé la profondeur limite à 50 m, puis avait annoncé 100 m après s'être ravisée, pour finalement renoncer à tout pronostic. Ce fut aussi le cas pour les ascensions de haute altitude où il était prédit qu'il serait impossible de gravir l'Everest sans oxygène. Ainsi, l'humain semble capable de relever des défis de prime abord insoutenables en repoussant toujours plus loin ses limites. Mais quel intérêt a-t-il à éprouver ses façons d'agir aux lisières du concevable ? Ne s'agit-il que de quêtes existentielles, irréfléchies, voire absurdes, dont le seul but serait de faire porter le regard d'autrui sur soi ?

C'est sous l'angle des paradoxes suscités par les pratiques subaquatiques que sont l'apnée et la plongée que ces questions vont être abordées. La diversité des conditions de pratique entre ces deux disciplines nécessite quelques explications préalables. C'est donc à une approche croisée que nous allons procéder. L'option théorique du matérialisme dialectique retenue ici renvoie à l'usage de la dialectique, c'est-à-dire « *une pensée logique des contradictions* » (Sève, 2005, p. 83), un raisonnement qui entreprend de mettre au jour l'unité au sein de laquelle les contraires peuvent avoir différents débouchés.

- Coexister coopérativement, mais jusqu'à quel point ?
- Coexister conflictuellement, mais avec quelle(s) conséquence(s) ?

Et puisqu'il va être question de milieux aqueux, n'y a-t-il pas plus belle contradiction que celle qui consiste à éteindre le feu avec de l'eau – H_2O – constituée d'hydrogène particulièrement explosif et d'oxygène, comburant nécessaire à toute combustion ?

L'azote (N) n'est pas en reste puisqu'il est considéré comme un gaz neutre (voire gaz qui ne permet pas la vie), c'est-à-dire un gaz qui ne prend part à aucune réaction chimique alors qu'il est un élément nutritif essentiel à la croissance des cultures. En tant que composant de la chlorophylle, il joue un rôle vital dans la photosynthèse, processus par lequel les plantes vertes synthétisent des matières organiques grâce à l'énergie lumineuse, en absorbant le gaz carbonique de l'air et en rejetant l'oxygène. Ici encore, on souligne le paradoxe d'un gaz neutre qui permet pourtant la production d'oxygène.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

2 Caractéristiques des pratiques extrêmophiles

La qualification de milieu « quasi extrêmophile » c'est-à-dire *un milieu qui soumet les organismes vivants à des contraintes qui les obligent à se transformer pour perdurer* invite à recourir à une classification qui spécifie les périls encourus. À quels risques le milieu subaquatique expose-t-il ceux qui s'y aventurent ?

L'intromission dans un milieu liquide conduit le corps humain à la déprivation d'air puisque les voies aériennes supérieures sont dans l'incapacité de pourvoir en son alimentation. On peut alors évoquer une certaine forme de confinement liée à « l'enfermement en milieu aquatique » dont il est impossible de se sortir immédiatement ne serait-ce parce qu'un temps est nécessaire pour revenir à la surface (apnéiste) ou parce que les procédures de décompression ne sont pas achevées (plongeur autonome). Ce sentiment peut d'ailleurs être exacerbé dans le cadre de la plongée souterraine (spéléologique) où la sortie par le haut étant impossible, il faut opérer un demi-tour pour aller chercher l'accès emprunté à l'aller ou prolonger son périple pour trouver une autre sortie. Il peut alors naître un stress, manifestation caractéristique susceptible d'être provoquée en milieux extrêmophiles, qui nécessite que soient pris en compte les risques psychologiques. Mais l'humain qui s'aventure dans les profondeurs marines peut aussi faire quelques rencontres animalières. La confrontation à des requins, à des méduses, à des serpents, voire à des crocodiles dans certains cénotes n'est pas dénuée d'écueils. On pourra aussi évoquer la menace liée à l'assimilation de substances néfastes au fonctionnement de l'organisme que le milieu hyperbare est propice à produire. L'azote bien sûr, mais aussi l'oxygène qui sous certaines pressions devient toxique. En effet, lors d'une plongée à l'air, au-delà de 66 m la pression partielle d'oxygène atteint le seuil critique de 1,6 bar. Enfin, on ne peut mettre de côté ces croyances diffusées sous la forme de légendes urbaines qui se répandent dans tout milieu et qui font la promotion de conclusions inexactes alors même que la science peut expliquer la réalité des phénomènes. Il s'agit donc de se former en éclairant chaque risque d'une réflexion rationnelle qui permet de réévaluer les dangers encourus à leur juste valeur. La mise en perspective dialectique des éléments contradictoires qui forment toute unité peut s'avérer propice pour avancer sur cette voie.

2.1 Du rêve à la réalité

Deux vieux rêves semblent habiter l'humanité :

- Voler comme un oiseau ou un insecte, c'est-à-dire se maintenir au-dessus du sol et évoluer dans les airs.
- S'immerger et rester sous l'eau comme les animaux marins, c'est-à-dire pouvoir se mouvoir en sustentation, sous la surface de l'eau.

Le défi qui consiste à égaler la performance d'espèces animales capables de se déplacer dans les airs ou sous l'eau nécessite de s'équiper, car « *bien que les êtres humains n'aient de cesse d'étonner par leur capacité à repousser les limites de l'hostilité, il ne faudrait pas oublier qu'ils le font en s'alliant un ensemble de techniques* » (Moricot et Rosselin-Bareille, 2021, p. 137). Nous voudrions étendre le terme de « techniques » au-delà des seuls équipements dont l'humain se revêtit pour pénétrer ces milieux aux

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

« techniques corporelles » indispensables qu'il est amené à acquérir, mais aussi à celles qui permettent d'utiliser un matériel plus ou moins sophistiqué. Il semble bien alors que « *ce que les hommes gagnent en respirant sous l'eau ou en volant dans l'air, ils le perdent en liberté de mouvement* » (*Ibid.*, p. 141).

2.2 Spécificités du milieu subaquatique

Le milieu subaquatique présente au moins deux[1] caractéristiques qui nécessitent des transformations radicales pour tout humain désirant s'y introduire.

D'une part, il n'est pas possible de ventiler dans l'eau. Il faut donc, soit renoncer à cette ventilation (c'est le cas de l'apnée), soit s'équiper d'un dispositif auxiliaire permettant de la prolonger (c'est le cas de la plongée sous-marine).

D'autre part, la pénétration en profondeur dans ce milieu conduit à subir les effets de la pression ambiante : plus le plongeur descend et plus elle se fait ressentir. Cette pression est d'autant plus décisive qu'elle va avoir des conséquences sur les volumes des gaz et les échanges gazeux au sein de l'organisme. Au cours d'une plongée verticale, la pression augmente proportionnellement à la profondeur. C'est la loi de Boyle-Mariotte qui stipule qu'à température constante, la pression d'un gaz est inversement proportionnelle au volume qu'il occupe. Ainsi, plus la profondeur d'immersion est importante, plus la pression accroît, et plus le volume de gaz diminue. Pour le dire autrement, le produit de la pression d'un gaz par son volume reste constant (lorsque la température ne varie pas). Il s'en suit que si un gaz a une pression P1 et un volume V1 à une profondeur Z1 et qu'à une profondeur Z2, il a une pression P2 et un volume V2, alors la loi de Boyle-Mariotte permet d'écrire que :

$$P1 \times V1 = P2 \times V2 = \text{Constante}$$

2.3 Quelle conséquence pour l'humain qui s'immerge ?

Avant de mesurer les effets de cette équation sur notre corps, il faut rappeler que celui-ci subit déjà une pression atmosphérique de 1 bar (1013,25 mb) lorsqu'il est à la surface de la mer et quel que soit l'endroit du globe. L'intromission dans l'eau conduit à ce qu'à cette pression s'ajoute la pression hydrostatique qui va s'amplifier au fur et à mesure de la descente. Le corps humain subit alors une contrainte progressive qui augmente de 1 bar supplémentaire tous les 10 mètres (1,019 kgf cm^{-2}, soit une colonne d'eau de 10 mètres sur un centimètre carré). Ainsi, le corps est soumis à une pression de 2 bars à -10 mètres (pression ambiante[2] ou absolue = 1 bar de pression atmosphérique + 1 bar de pression hydrostatique), de 2, 5 bars à -15 mètres (1 bar de pression atmosphérique + 1,5 bar de pression hydrostatique), 3 bars à -20 m, etc. L'application de la loi de Boyle-Mariotte permet de mesurer les effets de la pression ambiante (pression atmosphérique + pression hydrostatique) sur les volumes gazeux de notre organisme et plus particulièrement de celui contenu dans nos poumons. En

[1] Ne seront pas abordées dans ce texte les questions de conductivité thermique de l'eau, de vision, de couleur, de propagation des sons, etc.

[2] On parle indifféremment de pression ambiante ou de pression absolue pour indiquer que l'on ajoute à la pression atmosphérique la pression hydrostatique. C'est en fait la pression que subit le sujet ou l'objet immergé.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

prenant en référence un plongeur doté d'une capacité pulmonaire de 6 litres, il est possible de comparer son volume à la surface et sous 10 mètres d'eau. Nous pouvons écrire que :

$$\mathbf{P1 \times V1 = P2 \times V2 \Rightarrow 1\ bar \times 6\ litres = 2\ bars \times V2 \Rightarrow V2 = \frac{1 \times 6 litres}{2 bars} = 3\ litres}$$

En l'espace de 10 mètres, le volume d'air contenu dans les poumons s'est donc réduit de moitié. Fort de cette équation, il est possible de modéliser une descente progressive et d'observer l'évolution du volume pulmonaire par tranche de 10 mètres.

TABLEAU 1 – Évolution de la relation « pression absolue / volume d'air dans les poumons »

Profondeur	Pression	Volume	% du volume initial	Différence de %
Surface	1 bar	6 litres	100 %	--------
- 10 m	2 bars	3 litres	50 %	- 50 %
- 20 m	3 bars	2 litres	33,3 %	- 16,7 %
- 30 m	4 bars	1,5 litre	25 %	- 8,3 %
- 40 m	5 bars	1,2 litre	20 %	- 5 %
- 50 m	6 bars	1 litre	16,6 %	- 3,4 %

C'est donc entre zéro et dix mètres qu'intervient la plus grande variation du volume d'air ce qui explique pour une part que c'est dans cette zone que la majorité des accidents d'apnée (syncope) se produisent lors de la remontée. Plusieurs raisons sont susceptibles d'expliquer ce phénomène. Lors de la remontée, la PAO2 [3] baisse dans un rapport de 1 à 6 environ. Cela est dû aux effets conjugués de la consommation d'O2 par l'organisme durant le temps de l'apnée et par la diminution de la pression ambiante qui réduit la pression partielle et donc artérielle d'O2 à la remontée. Cette hypoxie n'est pas sans conséquence sur l'humain qui la subit. Elle entraîne des troubles psychiques qui peuvent apparaître dès que la PaO2[4] passe sous les 60 mmHg :

> « lorsque la PaO_2 devient inférieure à 40 mmHg, on note une altération des capacités intellectuelles, mais avec une conservation des mouvements automatiques, ce qui explique que l'apnéiste puisse continuer à nager alors qu'il est en train de perdre connaissance. Quand la PaO_2 devient inférieure à 30 mmHg, c'est le stade des convulsions puis de la perte de connaissance avec le risque de noyade si l'apnéiste n'est pas secouru » (Bonnet, 2013, p. 77).

La question de la pression est donc centrale. Elle permet de comprendre pourquoi cette variation importante dans cette zone proche de la surface va aussi jouer un rôle prépondérant sur les tympans puisque le volume de l'oreille moyenne (environ 5 ml) va se réduire de moitié en subissant les effets conjugués de la pression ambiante et de la dépression au sein de cette cavité. Il serait tentant d'en déduire qu'il s'agit

[3] PAO_2 : pression alvéolaire d'O_2.
[4] PaO_2 : pression artérielle d'O_2 donnée en millimètres de mercure (mmHg -millimètre de mercure).

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

d'un processus de sauvegarde des néophytes visant à les empêcher de s'aventurer plus profondément en l'absence d'un entraînement plus soutenu. Cependant, la distribution aléatoire des plongeurs qui doivent apprendre une technique d'équilibration et des plongeurs qui en sont dispensés parce qu'ils équilibrent naturellement (BTV[5]), ne plaide pas en faveur d'une telle interprétation.

3 Envisager les pratiques subaquatiques sous l'angle des contradictions

La culture dialectique n'est enseignée ni à l'école ni à l'université. Il apparaît néanmoins qu'en bien des points, elle s'avère être un réel atout pour comprendre comment sont liées les choses et comment de leur opposition, de leurs antagonismes, peut finalement se dessiner une voie transitoire ou nouvelle, car « *la catégorie nodale de la dialectique est d'évidence celle de contradiction* » (Sève, 2014, p. 592).

La première contradiction que l'on peut évoquer à propos de notre évolution en tant qu'humains dans le milieu liquide est notre capacité à flotter, car en tant que terrien soumis à l'attraction terrestre, tout nous pousse à rejoindre le sol, y compris lorsqu'il se trouve sous l'eau. Cependant, lorsqu'une personne s'introduit dans l'eau, loin de couler, elle est soumise à la poussée d'Archimède qui vient d'une certaine façon contrecarrer la pesanteur. Nous laisserons temporairement de côté les motifs qui amènent cette personne à aller dans l'eau et les résultats qu'elle en escompte pour nous concentrer sur les interactions physiques que subit tout corps plongé dans l'eau. Cependant, loin d'être négligeables, ces motifs permettent d'ouvrir des perspectives didactiques pour l'enseignement d'une pratique natatoire qui conduit selon les cas, à sauver autrui ou à se sauver soi-même d'une situation périlleuse, ou plus paisiblement à participer à une activité de loisir, à éprouver des émotions au contact d'un milieu naturel spécifique (Éloi, 2022).

3.1 Dialectique de l'action et de la réaction

Les données physiques qui accompagnent les activités aquatiques sont solidement établies maintenant. Elles relèvent de la catégorie de contradiction dialectique qui renvoie à la troisième loi de Newton ou principe de l'action et de la réaction. Il est acquis que pesanteur et poussée d'Archimède sont des vecteurs, c'est-à-dire des quantités physiques définies par une direction, un sens, un point d'application et une norme (ou intensité). Dans notre cas, pesanteur et poussée d'Archimède ont une direction identique – la verticale. Elles agissent en sens opposés – vers le bas pour la première, vers le haut pour la seconde. Cependant, leurs points d'application sont différents ; le centre de gravité pour la pesanteur et le centre du volume immergé pour la poussée d'Archimède. Il est notable que ces deux forces de sens opposés, lorsqu'elles ne sont pas alignées, peuvent engendrer un couple et par voie de conséquence, une position plus ou moins inclinée du nageur dans l'eau qui se répercute immédiatement sur son hydrodynamisme.

[5] Chez certains apnéistes, la béance tubaire volontaire (BTV) se fait naturellement, sans apprentissage.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

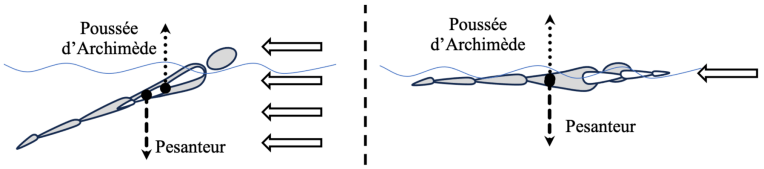


FIG. 1 : FIGURE 1A - À gauche, le couple de redressement formé par pesanteur et poussé d'Archimède. Bien souvent, il suffit d'avancer les bras pour aligner pesanteur et poussée d'Archimède. De cette façon on diminue la surface maître couple et on améliore l'hydrodynamisme.

L'apnéiste qui subit les mêmes contraintes, mais entre deux eaux va donc se lester pour rester à la profondeur voulue et en position horizontal. Pour ce faire, il va s'équiper d'un « plomb de cou » qui va contribuer à aligner pesanteur et poussée d'Archimède.

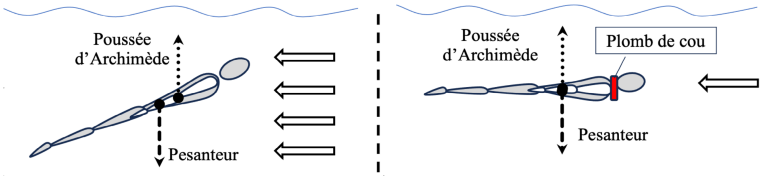


FIG. 2 : FIGURE 1B - À gauche, le couple de redressement formé par pesanteur et poussé d'Archimède. L'apnéiste s'équipe d'un plomb de cou pour se maintenir en profondeur et en position horizontale.

Par ailleurs, les intensités de ces deux forces varient en fonction des circonstances qu'expriment parfaitement leurs formules respectives.

La *pesanteur* se mesure par une intensité qui est donnée par l'équation :

$$P = m \times g$$

Où P est l'intensité du poids en Newton (N.) ; m est la masse (en kg) ; g est l'intensité de la pesanteur[6] (en N./kg).

La *poussée d'Archimède* est définie par le principe fondamental de l'hydrostatique qui s'énonce ainsi : « *Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut et égale (et opposée) au poids du volume de fluide déplacé. Cette force est appelée poussée d'Archimède. Elle s'applique au centre de masse du fluide déplacé, appelé centre de poussée* » et se mesure par une intensité qui est donnée par l'équation :

$$\|\vec{P}_A\| = \rho V g$$

[6] À la surface de la Terre, g 9,81 N/kg à la latitude de Paris. Cependant, g varie en fonction de différents facteurs, dont la latitude et l'altitude.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

Où P_A est l'intensité de la poussée d'Archimède (en Newton) ; est la masse volumique du fluide déplacé en (en kg par m^3) ; V est le volume déplacé (en m^3) ; g est la gravité en Newton par kilogrammes.

La valeur de ces deux dimensions peut évoluer en fonction de diverses circonstances.

Pour la pesanteur :

- l'altitude (9,81 au niveau de la mer) ;
- la latitude (la pesanteur est plus élevée aux pôles qu'à l'équateur ; + 0,5%).

Pour la poussée d'Archimède :

- la profondeur à laquelle s'immerge le nageur, l'apnéiste ou le plongeur sous-marin ;
- la densité de l'eau (selon qu'elle est douce ou plus ou moins salée) ;
- la température de l'eau.

Ainsi, en entrant dans l'eau, le nageur se trouve « freiné » au fur et à mesure de son intromission aquatique par une force qui va augmenter proportionnellement à son immersion, ce qui change la simple relation causale en rapport réciproque. Causes et effets sont des actions proportionnelles dont le statut permute continuellement, « *où ce qui était effet maintenant ou ici, devient cause ailleurs ou ensuite, et vice versa* » (Engels, 1878/1977, p. 52).

Seule l'analyse du rapport des forces contradictoires en présence permet de comprendre pourquoi. Ici, chaque force a une conséquence sur l'autre et leurs effets contradictoires sont réellement subis par le nageur, qui contrairement à un corps-mort[7] ou à une bouée, les appréhende « dans sa chair ». Il pourrait être rétorqué que certes, ces deux forces sont de sens opposés, mais que cela ne suffit pas à produire une unité dialectique des contraires : il ne s'agirait là que d'une simple interaction, d'ailleurs, « *il n'y a contradiction dialectique qu'entre deux contraires constituants objectivement, et non pour la seule pensée, une unité* » (Sève, 1998, p. 632). On invite alors à considérer que le devenir de ces deux forces est inéluctablement lié, car quand l'effet de l'une augmente, celui de l'autre diminue proportionnellement, et réciproquement. Ce rapport dialectique se concrétise en la pression ambiante (ou pression absolue), résultante du bilan de la pression atmosphérique et de la pression hydrostatique qui agissent l'une contre l'autre. Mais cette proportionnalité n'est vraie que jusqu'à un certain point.

En effet, la *flottabilité* d'un sujet peut varier en fonction de différentes circonstances.

- Elle peut être *positive* : la poussée d'Archimède est supérieure à la pesanteur et sans qu'aucune action ne soit nécessaire, le corps remonte à la surface ce qui veut dire que le sujet doit se livrer à quelques manœuvres s'il désire descendre plus profondément.

[7]Il s'agit du « corps-mort » maritime, bloc en béton posé au fond de l'eau qui est relié par un « bout » ou une chaîne à une bouée sur laquelle les bateaux peuvent s'amarrer sans avoir à jeter l'encre, évitant ainsi de « labourer » et détruire les fonds marins.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

- La flottabilité peut être *neutre* : dans ce cas de figure, la poussée d'Archimède et la pesanteur sont égales et le sujet reste à la même profondeur. C'est par exemple le cas de l'apnéiste et du plongeur qui désirent rester là où ils sont pour observer la faune ou la flore du milieu sous-marin.
- Mais la flottabilité peut aussi être *négative* : pourtant, la pesanteur ne devient pas comme par miracle supérieure à la poussée d'Archimède. C'est qu'un autre phénomène vient jouer en faveur de la pesanteur. Il s'agit de la pression exercée par l'eau qui se trouve au-dessus du corps du plongeur. Cette colonne d'eau est elle-même dotée d'une masse qui vient « peser » sur le sujet : sous cette pression, le corps voit son volume diminuer et la poussée d'Archimède devenir inférieure à la pesanteur. Le corps s'enfonce alors inexorablement vers les abysses et il faut recourir à quelques mouvements pour remonter à la surface. Cette bascule de l'état d'équilibre à celui de chute libre (*free fall*) est particulièrement appréciée par l'apnéiste qui se laisse alors engloutir par le milieu liquide sans effort.

Pesanteur et poussée d'Archimède sont donc des forces contradictoires qui s'opposent et dont la résultante peut annuler ou inverser leurs effets. De ces deux forces contraires résulte la plus ou moins grande flottabilité du nageur, troisième terme qui matérialise la contradiction et qui incarne en même temps ce qui fait leur unité. En poussant plus loin le principe de négations réciproques, on est amené à étudier la conséquence de la confrontation de ces deux contraires. Les valeurs de chacune de ces dimensions étant amenées à varier sous l'influence de différentes circonstances, il résulte de ce conflit différents débouchés.

L'un des termes peut l'emporter sur l'autre et la flottabilité devient positive (le sujet flotte) ou négative (le sujet coule). Mais le plongeur peut aussi s'organiser pour que les contraires coexistent de façon coopérative : la flottabilité devient alors neutre et le sujet reste en sustentation entre deux eaux sans monter ni descendre. C'est ici que des apprentissages sont nécessaires pour que le plongeur maîtrise cette flottabilité qui va garantir de ne pas détruire les fonds marins avec ses palmes ou de soulever une telle « touille[8] » qu'il devient impossible de voir quoi que ce soit. De ce soulèvement de particules résulte un brouillage total de la vue qui aboutit bien souvent à « une perte de palanquée » dont la procédure de sécurité conduit à la remontée pour se retrouver en surface ce qui conduit à une probable fin de plongée. Maîtriser sa flottabilité, c'est par conséquent se garantir de pouvoir plonger sereinement.

Il apparaît donc que cause et effet jouent ici de façon manifestement contradictoire puisque la pesanteur est initialement la cause physique de l'immersion du nageur dans l'eau, c'est elle qui « attire » le nageur vers le fond ; alors que la poussée d'Archimède (force de répulsion) en est l'effet, la conséquence immédiate, elle le « repousse » vers la surface. Ainsi, l'un ne va pas sans l'autre. « *Tout le mouvement consiste en l'action réciproque de l'attraction et de la répulsion* » (Engels, 1873-1886/1952, p. 77).

De fait, l'une n'a de valeur que dans son rapport à l'autre. Ce simple constat conduit à énoncer cet aphorisme aussi patent que déroutant, mais riche d'enseignements pour

[8]La « touille » est le terme qui désigne le résultat obtenu lorsque le plongeur soulève le dépôt des fond aquatique. Dans certains milieux, lorsque plusieurs plongeurs sont passés avant (en carrière, dans une épave, dans un siphon), il devient parfois impossible de lire les valeurs affichées sur l'ordinateur fixé à son poignet.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

les sciences de l'éducation : pour mieux flotter, il faut s'immerger davantage, ou pour le dire plus radicalement, se noyer permet de survivre. Cet état de fait constitue d'ailleurs un enjeu didactique crucial tout au début de l'apprentissage de la nage chez l'enfant (voire chez l'adulte débutant), car il s'agit de lui faire comprendre que c'est en « se coulant » dans l'élément liquide qu'il va contradictoirement se maintenir à la surface. Le défi de la démarche didactique est alors de lui faire accepter cette immersion en l'invitant à explorer activement ses effets. C'est alors qu'il pourra rejeter définitivement cette représentation-obstacle qui a la vie dure et qui laisse accroire qu'il peut « couler comme une pierre ».

Une fois les principes physiques énoncés, il s'agit de pouvoir agir sur la réalité en mobilisant quelques moyens pratiques, car se pose la question de pouvoir descendre, se maintenir à une profondeur désirée, puis remonter en pouvant s'arrêter aux paliers de décompression, et tout cela, en faisant les efforts les moins coûteux. En effet, la consommation d'oxygène est une problématique constante pour l'humain qui s'immerge, qu'il soit apnéiste ou plongeur sous-marin.

3.2 Se lester pour descendre vers les profondeurs

L'être humain est un homéotherme, c'est-à-dire que c'est un organisme qui doit conserver sa température interne autour de 37° C. Pour parvenir à cette homéostasie thermique, différents mécanismes d'apport ou de perte de chaleur sont mobilisés. Radiation, convection, conduction et transpiration vont être activées en fonction des conditions dans lesquelles le corps va évoluer. La neutralité thermique de l'eau est de 32° C. Or, l'eau dans laquelle nous plongeons n'atteint jamais cette température. La solution largement adoptée pour se préserver de ce déficit de chaleur consiste à se nantir d'une « seconde peau » en néoprène, matériau dans lequel on introduit du gaz sous forme de bulles microscopiques. Cet isolant plus ou moins épais[9] va avoir comme contrepartie l'augmentation de la flottabilité du nageur. Deux paramètres vont majorer l'intensité de la poussée d'Archimède. Le volume de la combinaison[10] qui va venir s'ajouter au volume initial du nageur, mais aussi la densité du matériel. Pour rappel, l'intensité de la poussée d'Archimède est le produit de ρ (la masse volumique du fluide déplacé), de V (le volume déplacé) et de g (la gravité en Newton). S'équiper d'une combinaison va donc nécessiter de se lester pour parvenir à s'enfoncer sous la surface de l'eau. Voici le point de vue de l'apnéiste :

> Pour l'apnéiste qui a gonflé ses poumons au maximum, la ceinture de plombs et/ou un plomb de cou sont des équipements indispensables. Mais jusqu'à quel point doit-il se lester ?
>
> Pour l'*apnée verticale*, trop de poids conduit à un effort excessif pour remonter. Les risques de syncope seront augmentés. Pas assez : c'est pour descendre qu'il faudra lutter démesurément en puisant dans sa réserve d'oxygène avant même d'avoir entamé la descente. Si la règle enseignée dans les clubs est que l'état d'équilibre doit se situer à dix mètres, diffé-

[9] Les combinaisons les plus répandues peuvent avoir des épaisseurs allant de 1 à 9 millimètres.

[10] Le calcul de la surface corporelle donne 2,062 m^2 pour un homme d'une taille de 1,8 m et de 90 kg. Une combinaison de 2 mm ajoute un volume de 4,124 litres ; 10 litres pour une combinaison de 5 millimètres.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

> rentes stratégies sont adoptées en fonction du niveau de l'apnéiste et de son ressenti.

Certains préconisent un surlestage en arguant que plus vite l'immersion en profondeur se réalise et plus vite les réflexes d'immersion [*diving reflex*] se mettent en place. Pour d'autres, c'est durant la remontée qu'il faut faciliter l'effort et la flottabilité positive doit se retrouver avant les dix mètres ce qui permet à l'apnéiste de cesser ses efforts à partir de cette zone et de se laisser remonter comme un bouchon.

> Pour l'*apnée horizontale*, trop de poids et l'apnéiste va frotter le fond de la piscine. Pas assez, et il va devoir lutter pour ne pas remonter à la surface. Par ailleurs, l'équilibre général doit permettre un déplacement entre deux eaux totalement à l'horizontale, ce qui nécessite une répartition judicieuse des lests afin que le corps ne soit pas soumis à un couple de redressement.

Maintenant le point de vue du plongeur sous-marin :

> Le plongeur sous-marin est équipé d'un procédé lui permettant de ventiler sous l'eau grâce à un premier étage de détendeur (celui qui se trouve sur le robinet du bloc de plongée) qui détend l'air haute pression (HP de 200 à 300 bars) pour l'amener à une pression intermédiaire exploitable (PI de 8 à 10 bars). Les bouteilles peuvent avoir une contenance de 7 à 15 litres et peuvent être réunies pour constituer des bi-bouteilles.

Mais les blocs peuvent être en métal, en aluminium ou en carbone. Si l'avantage de ces deux derniers est leur poids hors de l'eau, leur inconvénient est qu'ils acquièrent une flottabilité positive en fin de plongée lorsque l'air qu'ils contiennent s'amenuise. Au début de la plongée, cette masse non flottante est compensée par l'apport d'une combinaison plus épaisse que celle de l'apnéiste puisque le séjour en profondeur du plongeur sous-marin sera plus long. Par ailleurs, il dispose d'un système de gonflable de sécurité appelé plus communément gilet stabilisateur. En gonflant cette outre d'air, le plongeur va augmenter son volume (et la valeur de la poussée d'Archimède) et remonter vers la surface. En le vidant, il obtiendra le résultat inverse. D'une façon générale, la flottabilité du plongeur sous-marin est toujours positive. Il devra donc se lester pour pouvoir descendre dans l'eau.

En fait, le plongeur a à sa disposition deux moyens de flottabilité : ses poumons et son gilet stabilisateur. En gonflant l'un ou l'autre, il obtient le même effet, c'est-à-dire une augmentation du volume immergé qui contribue à accroître la valeur de la poussée d'Archimède. Il s'avère cependant que l'un et l'autre ont des modes d'utilisation différents :

> Le gilet stabilisateur doit être vidé pour descendre et gonflé pour remonter. Lorsqu'il s'agit de rester à la même profondeur, le plongeur doit trouver le juste réglage qui lui permet de se maintenir tout en ayant une respiration confortable. Le remplissage des poumons participe aussi de cette

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

> flottabilité. C'est ce qui est désigné par le terme de « poumon ballast ». Pour éviter de gonfler et dégonfler sans cesse le gilet stabilisateur, on peut remplir les poumons et « respirer haut ». De cette façon, il est possible de remonter pour passer un obstacle, puis en soufflant et en « respirant bas » de redescendre pour retrouver sa profondeur initiale.
>
> Cependant, il est dangereux de se servir du poumon ballast pour remonter à la surface. En gonflant ses poumons et en bloquant sa ventilation, le plongeur s'expose à un risque de surpression pulmonaire. En effet, puisque la pression ambiante diminuant au fil de l'ascension, les gaz vont augmenter de volume et risquer de créer de sérieux dommage aux poumons si l'air n'est pas expulsé. Le poumon ballast doit donc être réservé à un réglage fin de la flottabilité et le gilet stabilisateur (ou les palmes) à un changement de profondeur. Là aussi, les moyens adéquats doivent être utilisés au risque de provoquer un barotraumatisme dont les conséquences peuvent être dramatiques.

Ainsi, comme pour l'apnéiste, la même question peut se poser au plongeur sous-marin. Jusqu'à quel point doit-il s'alourdir ?

> S'il se charge trop de plombs, il va devoir surgonfler son gilet stabilisateur afin d'en augmenter le volume pour se maintenir à la profondeur désirée. Cette option conduit à augmenter la surface maître couple et à réduire l'hydrodynamisme du plongeur. Par voie de conséquence, cela va l'amener à fournir plus d'efforts pour parcourir une distance donnée. Il va donc consommer plus d'air ce qui aura une incidence sur son autonomie et le contraindra à remonter plus tôt à l'air libre.
>
> À l'inverse, s'il ne se leste pas assez, mais réussit à descendre parce que sa flottabilité est à la limite du négatif, il risque de ne pas pouvoir contrôler sa remontée et être incapable de marquer les stops à chacun des paliers préconisés. De fait, l'air à un poids[11] et tout ce qui est consommé pendant la plongée est aussitôt expulsé dans l'élément liquide. Une bouteille de 15 litres gonflée à 220 bars détient 3.330 litres d'air en surface soit 3,96 kg d'air au départ de la plongée. Lors d'une remontée avec 100 bars dans la bouteille, il ne reste plus que 1.500 litres d'air, soit un déficit en lest de 1,9 kg au dernier palier, à 3 mètres de profondeur. Comment le plongeur peut-il éviter de « percer » s'il n'est pas assez lesté ?

Ici encore, des contradictions se font jour. Chaque milieu (eau douce ou eau plus ou moins salée), chaque condition de température (nécessitant une combinaison plus ou moins épaisse) conduit à réévaluer le lestage et ses effets sur le rapport « pesanteur/poussée d'Archimède ». La maîtrise de ces conditions changeantes ne peut donc passer que par une expérimentation personnelle étayée par les connaissances scientifiques. Des apprentissages sont de ce fait nécessaires pour progresser dans la maîtrise des pratiques subaquatiques.

[11] L'air pèse environ 1,2 grammes par litre à la surface de la mer.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

Pour autant, le corps humain n'est pas démuni. En effet, il a été mis en évidence que des processus d'adaptations réflexes non conscients viennent œuvrer en arrière-plan de l'activité volontaire des plongeurs. Certes, pour certains, la douleur des tympans est un souci majeur auquel il va falloir remédier dès le début de la pratique par des apprentissages ciblés. Cependant, notamment pour l'apnéiste, l'immersion conduit à observer des modalités d'adaptations spontanées qui ne nécessitent pas d'apprentissages particuliers. Dans le domaine des pratiques subaquatiques, lorsque le corps humain est soumis à certaines conditions particulières, des processus archaïques ancestraux sont convoqués et permettent – dans une certaine mesure – de suppléer nos insuffisances de terriens. L'immersion subaquatique relève donc d'une pratique humaine complexe. D'un côté, des processus physiologiques et chimiques hérités du développement phylogénétique de l'humanité qui contribuent à rendre possible des immersions plus ou moins prolongées. De l'autre, l'apprentissage de techniques et/ou procédures relatives à l'usage de dispositifs nécessaires à l'adaptation au milieu aqueux qui permettent d'amplifier les processus primitifs d'adaptations de notre patrimoine génétique.

4 Des dispositions réflexes dès l'entrée dans le milieu aquatique

Les mécanismes archaïques ancestraux hérités de notre développement phylogénétique se manifestent principalement sous la forme de trois réflexes d'immersion [*diving reflex*] qui vont œuvrer en arrière-plan de l'activité des apnéistes : la bradycardie, la vasoconstriction et le *blood shift*.

> La *bradycardie* a été mise en évidence par Paul Bert (1870). Elle consiste en une réduction réflexe du rythme cardiaque lors de l'apnée. Elle est le résultat de mécanismes cardiomodérateurs vagaux. Elle peut être amplifiée par une simple immersion du visage dans l'eau, car les récepteurs thermiques du visage sont sensibles à la température de l'eau. Plus l'eau est froide et plus les effets de la bradycardie sont flagrants.

Cette décroissance de la fréquence cardiaque qui peut atteindre 40%[12] conduit à une diminution de la consommation énergétique du myocarde ce qui retarde le transport de l'oxygène vers les tissus, contribue à un ralentissement des échanges métaboliques et permet des apnées plus longues. Bien que la bradycardie soit un réflexe d'immersion, c'est-à-dire provoqué par une simple immersion de surface du plongeur, il a été montré qu'elle est amplifiée par la pression exercée sur le corps lors de la descente en profondeur. À titre d'exemple, il a été observé que chez un apnéiste d'élite, lors d'une plongée en *No Limit* [13] à -138 mètres, la bradycardie aboutit à une fréquence cardiaque de 41 battements par minute (Lemaître, 2014, p. 181-182).

> La *vasoconstriction périphérique* est un phénomène concomitant de la bradycardie qui aboutit à une diminution du diamètre des vaisseaux sanguins

[12] En 2009, lors de son record du monde d'apnée statique (11 min et 35 sec), Stéphane Mifsud annonce une fréquence cardiaque de 18 battements par minute.

[13] La plongée en *No Limit* est la plongée pratiquée dans le film « Le grand bleu ». La descente s'effectue à l'aide d'une gueuse et une fois la profondeur visée atteinte, le plongeur gonfle un ballon qui le hisse vers la surface.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

> et notamment des vaisseaux artériels de petit calibre qui sont situés aux extrémités des membres. Des études montrent que le rétrécissement de la section de ces artérioles peut conduire à une réduction de 65% du débit sanguin dans ces parties du corps (Andersson et Schagatay, 1998).

Cela se traduit concrètement par des picotements aux extrémités des doigts que tout apnéiste a ressentis, au moins lors de sa période d'initiation. Il apparaît aussi que le froid stimule la vasoconstriction ce qui conduit certains apnéistes à renoncer au confort d'une combinaison épaisse pour profiter des effets de ce « rafraîchissement ». La vasoconstriction permet de diriger le sang vers les organes nobles (principalement cerveau, cœur, poumons) afin de les alimenter au mieux en O_2.

Bradycardie et vasoconstriction périphérique sont donc des processus convergents qui permettent au corps de faire une économie substantielle d'oxygène ; est alors privilégiée l'alimentation des organes nobles du corps au détriment de l'approvisionnement musculaire.

> Le *blood shift* (ou érection pulmonaire) est un processus réflexe d'adaptation plus spécifique de la profondeur d'immersion. Il permet d'éviter l'écrasement de la cage thoracique au fur et à mesure de la descente et donc de l'augmentation de la pression ambiante. Le terme d'« érection pulmonaire » vient de la comparaison avec les corps turgescents que sont les organes sexuels féminins et masculins.

Il serait plus exact de parler de *transfert sanguin* pour évoquer la migration de ce liquide vers le thorax (poumons, cœurs, vaisseaux intrathoraciques). La cage thoracique peut tolérer une certaine déformation, mais le volume pulmonaire de l'apnéiste décroît au fur et à mesure que la profondeur augmente (à 40 mètres, la pression est de 5 bars, le volume des poumons est le cinquième de ce qu'il est en surface – *cf.* tableau 1). Il s'ensuit une dépression due à une réduction du volume pulmonaire ce qui attire vers l'espace libéré une partie des viscères abdominaux. La nature ayant horreur du vide, le sang afflue vers les capillaires pulmonaires pour combler la dépression intrathoracique. Bien que le phénomène soit proportionnel à la profondeur d'immersion, le volume résiduel[14] de 1,5 litre est atteint à partir d'environ[15] 30 mètres. Cet afflux sanguin d'environ 1 litre à 30 mètres est une adaptation de notre organisme qui :

> « *contribue à augmenter la rigidité pulmonaire et explique l'absence d'écrasement de la cage thoracique, dont les seules caractéristiques mécaniques ne permettraient pas de résister à la pression hydrostatique* » (Lemaître, 2014, p. 231).

À ce point, le volume de la cage thoracique ne se modifie plus même si l'apnéiste continue de progresser vers le fond et que la pression continue d'augmenter. Ce transfert de

[14] Le Volume Résiduel (VR) est le volume d'air restant dans les poumons après une expiration forcée. Il est compris entre 1 et 1,5 litre d'air.

[15] Tout dépend de la capacité thoracique du sujet. Si le volume de 5 litres semble être la norme pour le commun des mortels, pour les experts il peut atteindre 9 litres.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

sang a été quantifié : « *en 1974, une expérience est faite sur Jacques Mayol*[16] *en introduisant un cathéter dans la veine sous-clavière, à partir du pli du coude, permettant de calculer un afflux sanguin pulmonaire de 1200 ml. Ces données ont été confirmées plus récemment par des expériences menées en chambre hyperbare* » (Lemmens, 2016, p. 24).

> La *contraction de la rate* peut s'ajouter aux 3 processus précédemment cités. Cet organe spongieux et mou situé dans l'abdomen juste au-dessous de la cage thoracique est également soumis aux effets de la pression ambiante : la compression splénique aboutit en effet à augmenter le taux d'hématocrites[17] et à la libération d'hémoglobine, principal transporteur d'O_2.

Pour ces modalités d'adaptations spontanées, nul apprentissage n'est nécessaire, car il s'agit de « *réflexes issus probablement de nos origines thalassiques et connus jusqu'à Schaefer*[18] *uniquement chez les mammifères marins* » (Lemmens, 2016, p. 22). C'est donc assez récemment (1968) qu'ont été découverts ces processus physiologiques d'adaptation communs aux mammifères marins et aux humains. Pour autant, ces mécanismes ancestraux ne suffisent pas à expliquer les performances atteintes par certains compétiteurs. Seul l'entraînement peut permettre d'amplifier ces acquis issus de nos prédispositions génétiques. Il s'agit alors de réveiller ces réflexes ancestraux en sommeil pour en obtenir leur quintessence.

5 Des techniques et procédures nécessaires

S'il est patent que le plongeur est suppléé pour une part par des mécanismes réflexes hérités, il reste que s'immerger sous l'eau pour y demeurer toujours plus longtemps nécessite de maîtriser quelques techniques. La plus impérieuse est certainement celle qui consiste à équilibrer la pression ambiante avec la pression de l'oreille moyenne (équilibre sans lequel la douleur sur le tympan empêche toute progression vers le fond). Cependant, il s'avère rapidement nécessaire de maîtriser d'autres procédures permettant d'utiliser des dispositifs plus ou moins sophistiqués (qui vont du pince-nez au scaphandre autonome, voire au recycleur). Il faut donc distinguer les savoir-faire des apnéistes de ceux des plongeurs sous-marins, même si certains relèvent de logiques comparables. Dans ce cadre, il est manifeste que les apnéistes n'ont recours à aucun moyen de ventilation durant leur plongée alors que les plongeurs sous-marins sont équipés d'un matériel la permettant. Cette disparité amène à discriminer la *ventilation*, manœuvre qui conduit au renouvellement régulier de l'air des poumons (par l'inspiration et l'expiration) de la *respiration*, processus d'échange gazeux entre le système respiratoire et le système sanguin[19], échange pouvant perdurer un certain temps même en l'absence de ventilation.

[16] En 1976, Jacques Mayol est le premier apnéiste à avoir atteint la profondeur de 100 mètres.

[17] L'hématocrite correspond au volume occupé par les globules rouges dans le sang.

[18] C'est Schaefer qui en 1968 a décrit et mesuré pour la première fois ce mécanisme sur Robert Croft, le premier apnéiste atteignant 70 mètres (Lemmens, 2016).

[19] L'échange gazeux se réalise à la jonction des alvéoles pulmonaires et des capillaires qui les enveloppent. Grâce à différents processus physiologiques et chimiques, l'oxygène (O_2) inhalé passe des alvéoles vers le sang des capillaires et le dioxyde de carbone (CO_2) du sang des capillaires vers l'air alvéolaire.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

5.1 Pour l'apnéiste : maîtriser des techniques corporelles

L'apnée semble de prime abord être la plus rudimentaire des pratiques puisqu'il est possible de s'immerger sans aucun équipement. Mais les apparences sont trompeuses, car pour rester longtemps dans l'eau ou y descendre profondément, il faut maîtriser plusieurs techniques corporelles parmi lesquelles on peut citer :

a) Les techniques de respiration préparatoires à l'apnée visant à l'abaissement du rythme cardiaque et à l'optimisation de la dernière inspiration avant immersion.
b) Les techniques permettant de maintenir l'équipression de part et d'autre du tympan durant la descente.

Rien que pour rétablir l'équipression, on peut utiliser au moins trois manœuvres : Valsalva, Frenzel et BTV (ou béance tubaire volontaire). Notre propos n'est pas de développer les intérêts et les limites de chacune de ces méthodes qui visent toutes à ouvrir les trompes d'Eustache pour permettre d'équilibrer la pression ambiante et la pression de l'oreille moyenne afin de s'affranchir de la tension douloureuse exercée sur les tympans. Tout un chacun a utilisé en montagne ou dans l'avion (sans en connaître forcément le nom) la manœuvre de Valsalva qui permet d'obtenir cet équilibre en forçant l'expiration de l'air des poumons par la bouche ou par le nez, orifices que l'on a pris soin au préalable de fermer avec ses lèvres ou de pincer avec ses doigts. En empêchant l'éjection, on augmente la pression dans la cavité buccale ce qui amène à faire fuir l'air emprisonné par les seules issues restantes, les trompes d'Eustache. Cette manœuvre permet ainsi de rétablir l'équipression de part et d'autre des tympans.

> Cependant, cette technique, plutôt sévère, trouve ses limites chez les apnéistes qui veulent descendre au-delà des 20 mètres. Il est alors nécessaire de procéder à un apprentissage plus spécifique, celui de la manœuvre de « Frenzel » qui permet de restaurer l'équilibre d'une façon plus douce. Il s'agit ici d'utiliser la langue comme piston pour propulser l'air contenue dans la bouche vers les trompes d'Eustache, manœuvre dont la maîtrise nécessite de procéder à quelques séances d'entraînement.

Mais là encore, les velléités des apnéistes les plus audacieux réclament qu'ils se forment à une autre technique complémentaire : le « mouthfill » (ou remplissage de la bouche). Cette nouvelle technique devient indispensable, car pour utiliser la manœuvre de Frenzel, il faut continuer d'alimenter la bouche en air bien qu'au fur et à mesure de la descente l'augmentation de la pression ambiante conduise à la réduction du volume d'air qu'elle contient (-50% dès les 10 premiers mètres). Sans air disponible dans la cavité buccale, la manœuvre de Frenzel est impossible. Cette progression vers les profondeurs où la pression devient toujours plus conséquente nécessite une méthode spécifique pour réalimenter la bouche en air, c'est-à-dire « faire descendre » l'air depuis les poumons placés plus haut (puisque l'apnéiste descend tête en bas) vers la bouche placée plus bas. La manœuvre s'avère d'autant plus ardue que l'air est plutôt porté à remonter vers la surface. Ici encore, il faudra procéder à quelques apprentissages.

c) La technique de la carpe, procédé mis en œuvre lors de la préparation de l'apnée et qui permet aux apnéistes les plus performants (qui atteignent les 60 m et plus)

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

d'augmenter leur volume d'air dans les poumons au-delà de leur capacité normale. Mais attention, si le gain de volume en air (et donc en O_2) est significatif, le risque de surpression pulmonaire n'est pas nul. Cette technique est réservée aux apnéistes de haut niveau.

d) Les techniques de relâchement (yoga, méditation pleine conscience, etc.) favorisent la diminution de la consommation d'O_2 durant l'apnée.

e) Les techniques de palmage pour augmenter le rendement des efforts fournis.

Ce sont ces compétences acquises lors des sessions d'entraînement qui permettent à l'apnéiste expérimenté d'être capable de réaliser des performances inaccessibles au novice. L'énumération non exhaustive qui a précédé a pour seul objectif de montrer à quel point les techniques corporelles apprises sont le complément indispensable des réflexes archaïques décrits plus avant.

Causes et effets sont toujours indissociables. La liberté d'action et la sensation de bien-être de l'apnéiste contribuent à le libérer petit à petit des restrictions initiales de la durée de son séjour sous l'eau. Le plongeur sous-marin peut s'affranchir dans une certaine mesure de cette durée, mais cela a aussi des limites. Celles de la mise sous pression des gaz assimilés par le corps humain ou embarqués dans des réservoirs complémentaires qu'il doit emporter avec lui.

5.2 Pour le plongeur autonome : s'approprier des procédures

La comparaison entre la plongée et l'apnée offre bien des raisons d'évoquer le contradictoire. Certes, les problématiques des plongeurs sous-marins rejoignent en certains points celles des apnéistes, car la gestion de la pression ambiante reste le souci majeur pour tous ceux qui veulent évoluer en profondeur. Cependant, contrairement à l'apnéiste, le plongeur sous-marin peut ventiler sous l'eau et cette possibilité va irrémédiablement changer les procédures de gestion du séjour subaquatique. Pour mesurer la spécificité d'une plongée sous-marine, Brun et Bernabé[20] évoquent la notion d'« engagement » qu'ils assimilent au couple « temps-profondeur » (2015, p. 193). Il s'agit d'en comprendre les raisons.

L'histoire des deux disciplines ne s'étale pas sur la même échelle de temps, car :

> « Si l'immersion en apnée remonte sans doute à la Préhistoire, si les Grecs de l'Antiquité étaient tournés vers la mer et le monde sous-marin, la respiration d'air sous pression est une activité relativement récente dont les premiers comptes rendus datent de 1755[21] » (Foret, 2020, p. 199).

L'air est un mélange gazeux constitué pour l'essentiel, d'azote[22] (78,08 %), d'oxygène (20,95 %) et pour moins de 1 % de gaz dits « rares » (argon, néon, krypton, xénon,

[20] En 2005, Pascal Bernabé a établi un record de plongée autonome avec bouteilles à une profondeur de 330 m. Ce record a été battu en 2014 par le plongeur égyptien Ahmed Gamal Gabr qui a atteint 332,35 m.

[21] Paul Bert a écrit *La pression barométrique*, ouvrage majeur pour comprendre la décompression, en 1878.

[22] On évoque souvent l'azote bien qu'il s'agisse en fait de diazote (N_2). N2 est constitué de 2 atomes d'azote. De la même manière, il serait plus précis de dire dioxygène (O_2). O_2 est constitué de 2 atomes d'oxygène.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

hélium) auxquels s'ajoutent de la vapeur d'eau, divers aérosols (poussières, micro-organismes), mais aussi des gaz polluants et des particules. Pour simplifier les calculs et parce que cela n'exerce pas une influence critique sur les raisonnements qui vont suivre, on admettra que l'air est constitué de 79% de diazote (N_2) et de 21% dioxygène (O2).

6 L'azote : une place à part

L'azote est décrit comme un gaz inerte, c'est-à-dire un gaz qui n'a pas de réactions chimiques avec son environnement dans des conditions normales de pression ou de température. Pourtant, il joue un rôle prépondérant dans la gestion de nos périples sous-marins. Le terme « azote » (de *a* – privatif et *zōós* – vivant), vient du grec *ázôtos*, nom donné par Lavoisier pour dire que ce gaz ne permet pas la vie. C'est l'écossais Daniel Rutherford qui l'a isolé en 1772. Le symbole N, provient lui du latin *nitrogenum* (*nitron gennan*, « formateur de salpêtre »). Il est considéré comme un gaz inutile bien qu'il serve à fabriquer des protéines et à produire les bases azotées présentes dans l'ADN. En revanche, il est un élément nutritif essentiel à la croissance des cultures. C'est en effet un composant de la chlorophylle qui joue un rôle prépondérant dans la photosynthèse. En fait, historiquement, c'est paradoxalement l'oxygène qui est venu « contaminer » l'atmosphère durant la période de grande oxygénation de l'atmosphère terrestre (Great Oxidation Event, GOE) qui s'est produite plus avant, entre 2,5 et 2,2 milliards d'années. On ne doit donc notre existence sur terre qu'à cette « pollution » qui s'est installée durant 300 millions d'années et qui s'est déroulée en plusieurs phases avant d'aboutir à une certaine stabilité de la composition de l'air toujours en vigueur actuellement.

On l'aura compris, la gestion de l'azote est un véritable souci que le plongeur doit prendre à bras le corps s'il veut pouvoir réaliser ses plongées en toute sécurité.

6.1 L'intérêt des modélisations

Cela a été dit plus avant, pour qui veut évoluer dans l'eau, tout est question de pression. En progressant vers les profondeurs aquatiques, le corps est soumis à des contraintes de plus en plus importantes ce qui n'est pas sans conséquences sur les échanges gazeux. Pour appréhender ce système complexe, il faut construire un modèle permettant de se représenter ce qui se trame dans un corps humain qui ventile sous la surface de l'eau.

Modéliser consiste en une double visée. D'une part, il s'agit de construire une représentation dont la finalité est d'appréhender le complexe afin d'en avoir une représentation pour soi-même, base de discussion nécessaire pour en parler également avec d'autres. En ce sens, la modélisation invite au débat et à la remise en question : c'est la visée descriptive. D'autre part, le modèle doit permettre de moduler certaines valeurs des variables du système. Il engage à faire des tentatives sans risque puisqu'il n'est qu'une représentation de la réalité : c'est la visée praxéologique. Modéliser consiste alors en :

> « l'action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

> perçu complexe, et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une action délibérée au sein du phénomène ; raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles » (Lemoigne, 1999, p. 5).

Différents modèles sont apparus au fil des différentes découvertes scientifiques. Ils portent le nom de ceux qui les ont inventés ou modifiés. On peut citer le modèle de Haldane (1908) repris par Workman (1965) puis amélioré par Bühlmann (1983). Pourtant, ils ne sont qu'une approximation des mécanismes réels. En effet, alors même que ces modèles incorporent une marge de sécurité importante, il est régulièrement relevé des accidents dont les motifs ne sont pas identifiés. Bien que le profil de l'immersion ne laisse apparaître aucune erreur de procédure, le plongeur a néanmoins subi un accident de plongée dit « inexpliqué » que l'on nomme à tort « immérité ». Il y a de fait certainement une explication au problème qui est survenu, mais il est impossible d'incorporer dans le modèle tous les facteurs qui peuvent influer sur l'issue d'une plongée : l'âge du sujet, son état de santé, sa condition physique, son embonpoint, son état de fatigue, son taux d'hydratation, les efforts qu'il a pu fournir pendant ou après la plongée, etc. Quoi qu'il en soit, « *le risque zéro n'existe pas et la sécurité ne peut être garantie à 100%* » (Brun et Bernabé, 2021, p. 219).

6.2 Les modèles en plongée sous-marine

Il existe différents modèles en plongée sous-marine. Cela ne présente pas d'intérêt ici de les présenter tous. Il semble préférable d'indiquer les options retenues par leurs concepteurs. Comme cela a été décrit auparavant, l'azote pour atteindre les tissus les moins accessibles va prendre un certain temps qui dépend du trajet que le sang doit parcourir, mais aussi de la durée nécessaire aux passages des différentes membranes permettant l'accès à ces tissus. Lorsque le temps d'acheminement des gaz est considéré comme étant le facteur prépondérant, c'est-à-dire que le transport des gaz par le sang est le facteur limitant, l'algorithme de décompression repose sur un « modèle par perfusion ».

En revanche, lorsque l'on estime que ce sont les mécanismes d'absorption, c'est-à-dire, les temps de passage à travers les différentes parois obstacles qui sont décisifs, alors il s'agit d'un « modèle par diffusion ». Par exemple, les modèles de Haldane puis de Bühlmann sont des modèles par perfusion alors que les ceux d'Hempleman puis de Hennessy sont des modèles par diffusion. Ce n'est pas le lieu ici d'entrer dans le détail des différences qui ont conduit ces concepteurs à opter pour l'un ou l'autre des modèles, d'autant plus que

> « la vérité est qu'entre perfusion et diffusion, on ignore quel est le facteur limitatif. Il est d'ailleurs fort probable que, selon les organes et selon leurs emplacements, c'est tantôt l'un et tantôt l'autre » (Belin, 2005, p. 11).

Il est juste nécessaire de savoir que les ordinateurs embarqués sous l'eau pour gérer le profil des plongées reposent sur l'un ou l'autre de ces modèles. C'est donc à partir

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

de ces modélisations que sont indiqués les paliers qu'il faut impérativement respecter au cours de la remontée. Comment sont définis ces paliers ?

6.3 M-Value et paliers

L'idée de palier est la conséquence directe de l'impossibilité de remontée au-dessus d'une certaine limite sous peine de se mettre en danger. C'est comme si, pour assurer une décompression adéquate, il fallait rester sous un plafond de verre virtuel qui remontait lentement vers la surface, vitesse proportionnelle à la durée et à la profondeur de la plongée réalisée. Haldane (1908) a constaté qu'il était possible d'accélérer le processus de décompression en remontant par paliers successifs. Cependant, il a été observé que l'azote pénètre à des vitesses différentes en fonction de la nature des tissus (*e.g.* muscle *vs* os). L'idée de compartiment naît alors avec pour principe que l'on regroupe dans un compartiment les tissus qui présentent la même vitesse de saturation. Dans le prolongement de ces travaux, Workman opte pour un modèle qui prend en compte la tension maximale que chaque compartiment peut supporter sans générer les symptômes de la maladie de la décompression. Cette limite virtuelle est appelée M-Value pour valeur maximum. Il y a donc une M-Value par compartiment. Par la suite, les principes de conservatisme ont conduit à surévaluer les valeurs des modèles pour majorer les marges de sécurité et diminuer les risques, car dans le cadre de la plongée,

> « il n'existe toujours aucun modèle universel qui décrirait parfaitement l'interaction de tous les éléments à prendre en compte et qui serait capable de générer des protocoles de décompression fiables, quels que soient les gaz utilisés, les gammes de pressions subies ou les durées d'exposition » (Belin, 2005, p. 4).

Il faut donc utiliser les modèles pour ce qu'ils sont, en cherchant à les améliorer au fur et à mesure des découvertes scientifiques qui viennent les préciser et de la pratique qui vient les valider.

Pour des questions pratiques et physiologiques, l'idée de rejoindre la surface par palier s'est donc imposée. Une hauteur de 10 pieds (soit trois mètres) par palier a été adoptée. Pour des plongées engagées, il faut donc s'arrêter un certain temps à différents paliers (à 9 m, puis à 6 m et enfin à 3 m) avant de rejoindre la surface. Le temps de chaque palier est donné par des tables[23] ou par un ordinateur que le plongeur fixe à son poignet.

> À titre d'exemple, pour une plongée à l'air, une palanquée qui descend à 40 m sur une épave et qui y reste 45 minutes doit respecter 1 minute de palier à 9 m, 18 minutes à 6 m et à 45 minutes à 3 m soit une durée totale de remontée de 68 minutes (qui comprend le temps de remontée entre le fonds et les différents paliers).

[23] En France, on se forme avec les tables MN90 (Marine Nationale de 1990).

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

Tout le temps passé à ces profondeurs nécessite aussi de faire le calcul de l'air à emporter, ce qui peut conduire à ajouter des bouteilles jusqu'à obtenir un volume d'air comprimé suffisant. Les plongeurs doivent alors se demander si le jeu en vaut la chandelle. Pour subvenir en air à la plongée décrite ci-dessus, un plongeur consommant 20 litres/minute en surface devra s'équiper d'une bi-bouteille de 15 litres (soit un total de 30 l) gonflée à 230 bars et espérer qu'aucun incident ne se produise. Cas d'école, car il faut toujours prévoir qu'un incident peut arriver.

6.4 Une difficulté centrale : la gestion des gaz

Quand on met en contact un gaz sous pression et un liquide, le gaz se dissout dans le liquide. C'est typiquement ce qui se produit lorsque l'on utilise une machine qui pulse du gaz carbonique dans de l'eau plate pour en faire de l'eau gazeuse. La métaphore est pour le moins brutale, mais bien qu'il soit plus progressif c'est à un phénomène comparable auquel le plongeur est confronté. Sous l'effet de la pression ambiante qui augmente avec la profondeur, les différents gaz constituant l'air respiré vont se dissoudre progressivement dans le sang et les tissus. Cela est mis en évidence par la loi de Henry (1803) qui stipule qu'« *à température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide* ». La loi de Henry s'applique aux solutions dans lesquelles le soluté ne réagit pas chimiquement avec le solvant ce qui est bien le cas en plongée puisque le gaz qui nous intéresse, l'azote, bien que largement présent dans l'air que nous respirons est inerte, c'est-à-dire qu'il n'est pas consommé par l'organisme. La loi de Henry permet d'expliquer la nature des échanges gazeux qui s'opèrent au niveau des poumons entre l'air et le sang, mais aussi dans tous les organes corporels. La question se pose donc du devenir des gaz respirés quand les conditions environnementales de pression évoluent.

Une autre métaphore permet de le comprendre. Lorsqu'on libère trop rapidement la tension[24] présente dans un liquide, on obtient le même effet que lorsque l'on ouvre une bouteille de soda (ou de champagne) sans précautions. Le gaz contenu se détend alors trop rapidement et produit des bulles qui augmentent le volume du breuvage. Le récipient n'étant pas élastique, cette dilatation aboutit à une éjection violente du fluide par le goulot de la bouteille. Il est facile d'imaginer les dommages causés par une telle manœuvre sur le corps humain. Les modèles de décompression doivent donc envisager que le temps de remontée doit permettre de détendre progressivement les gaz contenus dans notre corps pour l'expulser par les poumons puis la bouche.

6.5 Proportionnalité des gaz respirés en fonction de la profondeur d'évolution

Comme cela a été dit plus haut, l'air est principalement constitué de molécules de dioxygène (O_2) et de molécules de diazote (N_2) respectivement pour 21% et pour 79% de l'air. Ces molécules se déplacent en toutes directions d'autant plus aléatoirement qu'elles entrent en collision et d'autant plus vite que la température est élevée. Cette agitation a pour effet leur diffusion dans le milieu par un franchissant plus ou moins aisé des barrières qui se dressent sur leur chemin. Ce que l'on nomme diffusion n'est

[24] On parle de tension pour indiquer qu'il s'agit d'un gaz dissous dans un liquide.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

finalement que le bilan net des molécules qui franchissent ces barrières dans un sens ou dans l'autre (entrée ou sortie).

6.6 Quel devenir pour l'O_2 et le N_2 lors d'une plongée ?

La diffusion de l'oxygène ne pose pas de problème parce que d'une part, la proportion de ce gaz dissous dans le sang ne représente que 2% puisque le reste de l'O_2 est transporté par l'hémoglobine, protéine des globules rouges capable de stocker de grandes quantités d'oxygène sous forme combinée. Sous forme combinée, c'est-à-dire dire que l'O_2 qui est lié à l'hémoglobine n'est plus dissous en solution, il ne participe donc plus à la pression partielle de l'O_2 (PpO_2). D'autre part, l'O_2 étant consommé par les cellules dont il est le carburant, la portion restante qui doit diffuser à travers les tissus lors du retour sanguin est négligeable.

Tel n'est pas le cas pour l'azote (N_2) qui n'est pas consommé par l'organisme (gaz neutre) et qui diffuse alors dans tous les tissus jusqu'à atteindre un état d'équilibre pour lequel sa tension est semblable partout dans le corps.

7 L'azote, un gaz pas si neutre

L'azote est donc un gaz à part puisque bien que ne servant à rien, il joue un rôle prépondérant dans les accidents de décompression. On relèvera ici encore la contradiction.

7.1 Au-dessus du niveau de la mer

Lorsqu'un équilibre est trouvé entre la pression exercée par le gaz et la tension dans le liquide, c'est l'état de *saturation*.

À la surface de l'eau, la pression atmosphérique ne variant que très peu, les organes et le sang sont saturés en azote et le système est stable.

Lorsque le plongeur progresse vers les profondeurs, il va changer la valeur de la pression ambiante. Ainsi, tout au long de son périple il va subir des variations de pression dépendantes des profondeurs auxquelles il évolue. La pression de l'air qu'il respire va donc changer et modifier l'état d'équilibre initialement établi en surface.

Cependant, ce mécanisme ne se fait pas instantanément. L'inertie de cette diffusion amène à ce que le temps passé soit une composante déterminante du système. En effet, pour être assimilé, l'azote doit passer des poumons au sang (diffusion par les parois alvéolaires), être transporté par le sang (débit relatif au diamètre des vaisseaux sanguins), puis du sang aux cellules (diffusion par les parois cellulaires des différents tissus) ; et inversement lors de son élimination. Si le transport de l'azote par le sang se fait à la vitesse de l'écoulement sanguin, le passage de l'azote des cellules vers le sang se fait par simple diffusion. Il est en conséquence plus lent et dépend de la perméabilité des parois à franchir. L'absorption (lors de la descente) et la restitution (lors de la remontée) ne sont de ce fait pas des phénomènes instantanés et il est impératif de prendre cette caractéristique en compte lors de la remontée dans ce qu'il est convenu d'appeler les procédures de décompression.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

7.2 Pendant la descente et le séjour au fond

La tension (pression partielle d'un gaz dans un liquide) va donc évoluer proportionnellement à la profondeur de plongée, mais aussi au temps passé à cette profondeur. Lors de la progression vers le fond, les échanges gazeux vont viser à rétablir un nouvel équilibre compatible avec la pression ambiante. L'état stable de surface va alors être rompu. Puisqu'un état d'équilibre est toujours recherché, l'azote va investir les différents tissus du corps. Cette phase est appelée *sous saturation* puisque l'azote n'a pas encore eu le temps d'investir totalement les différentes parties du corps. La pression exercée par le gaz est alors supérieure à la tension, c'est-à-dire à la pression partielle de ce gaz dans le liquide sanguin et les divers tissus.

Rapidement, les modèles de décompression ont bien pris en compte que cette diffusion se faisait à différentes vitesses en fonction des caractéristiques des organes approvisionnés : organes mous, muscles, os, cerveau, etc. ne présentent pas les mêmes capacités d'absorption. La phase de sous saturation correspond donc à la période durant laquelle le plongeur progresse vers la profondeur visée puis y séjourne et où l'azote s'immisce peu à peu dans les différents « compartiments » de notre corps jusqu'à obtenir l'équilibre entre la pression du gaz dans les poumons et la tension dans les tissus. Les compartiments[25] regroupent ainsi les tissus ou organes qui sont investis d'une cinétique de saturation et de désaturation identique. En fait, ces compartiments sont le résultat de modèles mathématiques qui regroupent en leur sein les tissus[26] de notre corps qui nécessitent un temps similaire pour arriver à saturation. L'état de *sous saturation* est donc la phase où l'azote se répand dans notre corps jusqu'à ce qu'il en soit saturé. Une fois l'équilibre atteint, c'est à nouveau l'état de saturation, mais avec des valeurs différentes de celles qui avaient cours à la surface ou à une autre profondeur. Néanmoins, si le séjour du plongeur est court, le temps nécessaire pour atteindre l'état de saturation (d'équilibre) n'est pas suffisant. Les différents compartiments ne sont pas saturés et le temps de décompression en est amoindri.

7.3 Au cours de la remontée

Lors de la remontée, la pression ambiante va évoluer et décroître proportionnellement tout au long de l'ascension. Le corps va donc se trouver en état de *sursaturation* puisque la tension dans les organes et le sang sera supérieure à la pression ambiante qui diminue lors du retour à la surface. Après avoir franchi les différentes barrières (cellulaires, capillaires, alvéolaires) et transité par les vaisseaux sanguins, l'azote est expulsé par les poumons.

> Lorsque la remontée s'effectue lentement (dix mètres par minute est la norme), le processus d'évacuation de l'azote se déroule dans de bonnes conditions et la formation de microbulles (inévitable) est sans conséquence. En revanche, si la remontée se fait trop rapidement, c'est l'effet bulles de soda décrit plus avant qui est appelé *sursaturation critique*.

[25] Le modèle de Buhlmann ZH-L16 prend en compte 16 compartiments.

[26] Quatre tissus simples peuvent être distingués : le tissu épithélial (par exemple l'épiderme) ; le tissu conjonctif, qui permet la liaison entre différents tissus ; le tissu musculaire qui permet le mouvement (muscles striés squelettiques, lisses ou cardiaque) ; le tissu nerveux (central et périphérique) qui permet la régulation de notre organisme. Un tissu composé est une combinaison de tissus simples.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

Se produit alors un *dégazage anarchique*, des microbulles se forment et s'amalgament. Ce mécanisme est dû au fait que les parois intérieures des vaisseaux sanguins sont irrégulières. Des micro-noyaux gazeux s'y attachent. Les microbulles entrent en contact avec ces micro-noyaux gazeux, s'y agglomèrent et forment des bulles de plus en plus grosses, volume accentué par une remontée trop rapide. Ces bulles peuvent en venir à obstruer des vaisseaux sanguins avec comme conséquence une ischémie, c'est-à-dire une diminution, voire un arrêt de la circulation artérielle conduisant à un manque d'oxygénation de ces régions du corps. On pense immédiatement aux dégâts que peut produire la sous-alimentation en oxygène du cerveau par les artères cérébrales. Mais ces bulles peuvent aussi se développer directement dans les tissus et appuyer sur les nerfs en provoquant des douleurs ou des lésions. Des microbulles formées dans la moelle épinière peuvent alors porter atteinte à la motricité du plongeur. C'est ainsi que se produisent les accidents de décompression (ADD) et/ou l'apparition des symptômes des maladies de décompression.
La plongée idéale est donc une plongée où la descente se fait rapidement, où le temps de séjour au fond est réduit et où la remontée se fait lentement.

7.4 Pour le plongeur sous-marin : respecter des procédures

Le plongeur sous-marin est donc amené à respecter un ensemble de règles intangibles. Ce sont elles qui vont garantir que le risque pris lors de la pénétration dans le milieu aqueux reste acceptable. Elles concernent autant les savoirs spécifiques à maîtriser que la connaissance du matériel utilisé car :

> « le harnachement des corps, autorisant le dépassement des capacités humaines naturelles et la pénétration d'environnements hostiles, impose des techniques de soi sur soi : apprendre à respirer, à voir, à toucher, à décider, à prendre des initiatives relève du couplage aux objets techniques » (Moricot et Rosselin-Bareille, 2021, p. 146).

Cette assimilation des procédures concerne autant le temps qui précède la plongée, que celui passé sous l'eau ou celui qui va le suivre. Il est donc évident que les modèles qui ont été réalisés pour des plongeurs militaires d'une trentaine d'années et en pleine forme vont s'appliquer à d'autres plongeurs dont les caractéristiques sont bien souvent très différentes. Au-delà des procédures directement liées à la plongée, il est souvent rappelé celles qui devraient s'appliquer au quotidien. Notre vie trépidante est-elle compatible avec un tel « régime » ?

Avant la plongée

> Le maintien d'une bonne forme physique, une alimentation saine, une hydratation régulière, la non-consommation d'alcool, l'entretien du matériel, un repos de qualité permettent d'aborder la plongée plus sereinement et d'en diminuer les risques.
>
> La phase d'équipement est également décisive et il faut arriver à « se mettre dans sa bulle » pour ne rien oublier et pour que l'entrée dans l'eau

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

> ne soit pas le moment d'une mauvaise surprise (bouteille non ouverte, combinaison étanche mal fermée, lampe oubliée…).

Pendant la plongée

> Il faut être totalement à ce que l'on fait. Bien que la sécurité en dépende, cette indispensable concentration est altérée par les soucis quotidiens qui empiètent parfois sur le moment présent et viennent détourner l'attention de ce qui importe. Cette dispersion conduit à aller à l'encontre de ce que le bon sens dicterait en temps normal. Les vérifications avant l'entrée dans l'eau ou celles qu'il faut faire à la surface de l'eau font partie d'un rituel qu'il faut respecter systématiquement. La planification des plongées est aussi un élément de sécurité. Il faut se dire avant ce que l'on va faire et faire ensuite ce que l'on s'est dit – *Plan your dive and dive your plan.* Les temps de séjour au fond ne sont pas extensibles. Les « temps fond » de remontée et de paliers doivent être respectés scrupuleusement.

Après la plongée

> Pour la simple raison qu'à la suite d'une plongée, l'azote résiduel va mettre entre 12 et 24 heures pour s'évacuer en totalité, tout effort est à proscrire après la plongée. De la même manière, prendre l'avion après une plongée constitue un danger puisque les cabines sont pressurisées à 0,8 bar[27], c'est-à-dire moins que la pression ambiante à la surface de la mer ce qui engendre un déficit qui peut favoriser un *dégazage anarchique.*

Le plongeur sous-marin se doit de respecter un ensemble de procédures. Toutes ne peuvent pas être apprises en une seule fois. Ici aussi, un entraînement progressif doit offrir les occasions de réitérer les expériences qui vont permettre de consolider les savoir-faire en toute sécurité.

En énumérant toutes ces règles qui semblent particulièrement drastiques, la question se pose de savoir qui de l'apnéiste ou du plongeur est le plus libre.

7.5 La liberté : une question de point de vue

Ce qui distingue fondamentalement l'apnéiste du plongeur sous-marin est la possibilité d'une ventilation. Impossible chez le premier, elle est l'apanage du second. La conséquence immédiate en est une durée de séjour subaquatique au bénéfice du plongeur autonome, avantage qui a comme contrepartie principale la nécessité du respect d'un ensemble de procédures de décompression. L'apnéiste n'est pas concerné par ce mécanisme :

> Certes, il remplit ses poumons et dans ce réservoir d'air est bien contenu 79% d'azote. Cependant, l'inertie des mécanismes de saturation est

[27] Les cabines d'un avion sont pressurisées, car à l'extérieur, à 10.000 m d'altitude, la pression est de 0,264 bars.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

> telle que le peu de temps passé sous l'eau (bien que les pressions puissent être importantes) ne permet pas d'atteindre une incorporation d'azote suffisante[28] pour générer des risques de sursaturation critique lors de la remontée. Même si dans certains cas très rares, la répétition d'apnées profondes peut entraîner une saturation en azote suffisante pour aboutir à un accident de décompression neurologique, le principal risque de l'apnéiste ne réside pas dans l'accumulation de ce gaz, mais dans un seuil critique de dioxyde de carbone (CO_2) produit lors d'un effort intense ou d'efforts répétés sans temps de récupération suffisants.
>
> Pour le plongeur, c'est l'inverse. Le temps passé sous l'eau permet le déroulement des processus de saturation. L'azote incorporé doit donc impérativement être expulsé lors de la remontée. Cependant, la problématique du CO_2 ne joue pas pour lui puisque le principe de la plongée avec des réservoirs auxiliaires consiste à expirer dans l'eau l'air « vicié ». Ainsi, à chaque cycle respiratoire, c'est un air « frais » qui est inspiré alors que l'air pauvre en oxygène et chargé en gaz carbonique est rejeté.

Finalement, la question de la liberté doit se discuter à l'aune des desseins que chaque pratiquant se fixe. Ce que l'apnéiste gagne en légèreté et en fluidité, il le perd en temps d'immersion, mais avec la perspective de pouvoir renouveler ses immersions. Ce que le plongeur autonome gagne en temps passé sous l'eau, il le perd en lourdeur d'équipement, en harnachement et en temps impérativement passé aux paliers. C'est là une grande leçon de la vie, on ne peut pas tout avoir.

8 Mise en perspective des pratiques subaquatiques

La comparaison entre les deux pratiques conduit à mettre en relation ce qu'elles ont de spécifique et ce qu'elles ont de contradictoire. Néanmoins, la question du contexte dans lequel elles s'expriment mérite quelques commentaires.

8.1 Des contextes variés qui pèsent sur les pratiques

On s'est jusqu'alors beaucoup attaché au point de vue de l'humain qui s'immerge. Il serait fantaisiste de penser que les modalités de toutes les immersions sont identiques. Dans les lacs, les rivières, les carrières, les gravières, les mers ou les océans, les conditions ne sont pas les mêmes. L'eau peut être claire ou turbide, chaude ou froide, salée (plus ou moins) ou douce, la lumière peut y être resplendissante ou au contraire il peut y régner une obscurité totale. Autant de variations qui invitent le plongeur ou l'apnéiste à s'adapter et à adapter son matériel.

> Chez « Esox Diving » dans la carrière de Chênesaint à la Roche-en-Brenil (Côte-d'Or), à partir d'une profondeur de 15 mètres, la température est

[28] On relève néanmoins des narcoses à l'azote chez les apnéistes de l'extrême qui pratiquent le *no-limit*. Avec -214 m, l'autrichien Herbert Nitsch détient le record du monde de *no-limit*. Lors de sa remontée, il a effectué un palier de 1 min à 9 m avant de poursuivre plus lentement sa remontée jusqu'à la surface. La durée de l'apnée est de 4 min et 30 sec. Profondeur atteinte et durée d'immersion confère à cette apnée un caractère exceptionnel.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

> à 6° C, été comme hiver. Bien que l'on puisse y plonger en combinaison humide, la combinaison étanche est requise pour les plongées dépassant la demi-heure. Le noir y est total à partir de 20 mètres. Les lampes sont donc obligatoires.
>
> À « la gravière du fort », à Holtzheim (Bas-Rhin), la température de l'eau est dépendante de la température extérieure (souvent supérieure à 10° C). Des millions de moules recouvrent le sol et tout ce qui se trouve dans l'eau. Ces moules d'eau douce filtrent l'eau et la rendent cristalline, ce qui permet d'avoir une luminosité parfaite au plus profond à 40 mètres. Les lampes sont inutiles.

Deux réservoirs d'eau douce, deux ambiances différentes, deux conditions de la pratique de l'apnée et de la plongée distinctes même si l'on y retrouve les mêmes poissons (sandre, perche, carpe, brochet, gardon, esturgeon, etc.).

> À la Roche-en-Brenil, les plongées peuvent être engagées, car il est possible de descendre jusqu'à 55 mètres de profondeur. On traverse des forêts noyées sous l'eau et il n'est pas rare de rencontrer quelques spécimens d'une moule (Anodonte) grosse comme la main (20 cm et plus). À la gravière du fort, c'est par millions que les moules (Quagga) ont investi les lieux. D'une taille beaucoup plus modeste (1,5 cm) elles prolifèrent et filtrent des milliers de mètres cubes d'eau tous les jours ce qui rend la visibilité exceptionnelle.
>
> En allant plonger dans les calanques à Marseille sous les chaleurs de l'été, il est possible d'éprouver quelques difficultés à supporter la combinaison qui s'avère pourtant utile dans l'eau et au contraire de ressentir un froid glacial dû à un mistral piquant en d'autres saisons. L'eau peut y être très claire par mer calme ou plus trouble lorsque les fonds ont été brassés. Selon les lieux, les fonds sont désertiques ou attrayants.
>
> À Safaga en Égypte, la mer est tiède, la luminosité y est éclatante jusqu'à 40 m et acceptable jusqu'à 100 m. Les fonds sont magnifiques, la densité et la variété de poissons, de coraux et de végétaux exceptionnelles. L'eau y est un peu plus salée qu'en méditerranée ce qui offre une flottabilité plus importante en comparaison des conditions marseillaises. Cette différence est particulièrement amplifiée lorsque l'on retourne dans l'eau douce des carrières, des gravières ou des rivières (un litre d'eau pèse 1,027kg en Méditerranée, 1,041kg en mer rouge et bien sûr, 1kg en eau douce).

8.2 Des contradictions communes

Parmi les contradictions communes aux deux modalités, on note celle qui relève de la catégorie d'attraction/répulsion. En identifiant la catégorie de contradiction dialectique comme étant un rapport, celui d'une action engendrant une réaction, et en poussant la démonstration jusqu'à définir que ce processus est universel, c'est-à-dire qu'il est un processus dialectique permanent et constant qui lie causes et effets et

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

conduit à envisager leur systématique réciprocité, on atteint à la généralisation du mode d'investigation qui doit inviter le chercheur à débusquer, en tout processus, les contradictions et les états fluctuants de leur rapport. Là est la justification d'une démarche qui consiste à s'instruire des catégories philosophiques pour mieux appréhender les concepts scientifiques.

On atteint donc par le chemin particulier choisi ici (celui des pratiques subaquatiques) au principe de l'action réciproque dont l'attraction et la répulsion sont l'une des modalités. Mais ce qui est remarquable, c'est que ce principe procède de la même logique pour expliquer autant l'attraction gravitationnelle des planètes que l'attraction du simple aimant[29] (pour lequel l'attraction est permanente), ou celui de l'électroaimant (qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie magnétique alternative), reconstitution artificielle de ce phénomène naturel réalisée par les humains.

C'est en cela que les concepts spécifiques débordent du milieu dont ils sont issus pour constituer des catégories philosophiques. Comme le souligne Sève, « *si tout n'est pas dialectique, il y a pourtant du dialectique en tout* » (2005, p. 96). De la sorte, il devient possible de comprendre à quelles conditions des équilibres perdurent, des déséquilibres s'opèrent, amenant alors à un retour à l'état initial ou au contraire, à un changement permanent (Éloi, 2022).

> Attraction terrestre et poussée d'Archimède jouent donc l'une contre l'autre et leur résultante s'exprime sous la forme de la flottabilité du sujet immergé. Soit il flotte, soit il coule, soit il se maintient entre deux eaux. La condition du changement de profondeur reste que l'une des forces l'emporte sur l'autre, mais que cet état est transitoire, réversible, voire qu'il peut se trouver une forme d'équilibre. On en vient donc à formuler qu'il convient de s'enfoncer plus pour mieux flotter.

Ce constat a pour conséquence que le sujet subaquatique va devoir agir pour contrecarrer les phénomènes physiques auxquels il est soumis. Ainsi, pour s'affranchir des contraintes du milieu, il s'est équipé de palmes et s'est doté par la même d'une certaine autonomie. Cela est vrai autant pour l'apnéiste que pour le plongeur autonome. Mais palmer est un exercice consommateur d'oxygène, il faut donc s'en dispenser autant que faire se peut. Ainsi, le plongeur autonome qui s'est adjoint un dispositif supplémentaire sous la forme d'une bouteille remplie de gaz comprimé qui est particulièrement lourde compense cet équipement par un système de gonflage de sécurité qui le libère de la contrainte du palmage pour la montée ou pour la descente. Se pose alors la question du lestage qui donne lieu à des interprétations différentes.

> Pour l'apnéiste, la question du poids à embarquer se pose en termes stratégiques. Faut-il mieux se lester suffisamment pour avoir une flottabilité négative dès les premiers mètres et se ménager une descente aisée (on convoque ainsi plus rapidement les réflexes d'immersion), ou au contraire,

[29] Dipôles magnétiques dont les pôles s'opposent, mais sont inséparables.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

> faut-il se lester moins, accepter de fournir des efforts au début de la descente pour retrouver plus vite, à la remontée, la phase de flottabilité positive qui va faciliter le retour à la surface ?
>
> Pour le plongeur sous-marin, la question se pose en d'autres termes. Ici aussi, il faut « jouer » entre deux options. Se surlester nécessite de compenser par le gonflement du gilet stabilisateur, ce qui va réduire l'hydrodynamisme et nécessiter de faire plus d'efforts de palmage et donc de consommer plus. La durée de la plongée sera sûrement écourtée, mais au moins, les arrêts aux paliers seront garantis.

L'option du sous-lestage peut aussi s'avérer séduisante, mais la diminution de la quantité du gaz comprimé dans la bouteille au fur et à mesure du séjour sous l'eau va réduire son poids[30] et compromettre les arrêts nécessaires aux paliers imposés par le processus de décompression. On en vient à formuler cette pensée contradictoire : *pour pouvoir remonter en toute sécurité, il faut se lester*. On réalise à quel point l'exigence de flottabilité requiert une harmonisation fine entre le volume d'air contenu dans le gilet stabilisateur et celui des poumons. Si l'on ajoute que le port d'une combinaison étanche (qui permet de s'affranchir en partie des problématiques de température) constitue un troisième volume d'air à gérer, on comprend que la maîtrise de la flottabilité n'est jamais définitivement réglée.

8.3 Les contradictions spécifiques à l'apnée selon les phases

Certaines contradictions sont plus spécifiques à l'apnée. C'est le cas du moment de sortie de l'apnée, c'est-à-dire de la reprise de respiration, lorsque l'apnéiste estime qu'il est arrivé à sa limite. Le néophyte pense que ce qui l'incite à reprendre sa respiration est un taux d'O_2 particulièrement bas dans ses poumons. Pourtant, c'est une fausse représentation des mécanismes physico-chimiques qui se déroulent véritablement.

> En réalité, et cela constitue le point nodal de la programmation de l'entraînement en apnée, c'est le taux élevé de CO_2 (dioxyde de carbone) qui invite l'apnéiste à reprendre sa respiration. Les procédures d'entraînement sont donc orientées classiquement selon deux directions : d'une part, le travail en hypercapnie (CO_2 ++) qui consiste à enchaîner les efforts avec peu de temps de récupération, ce qui conduit à une augmentation de la concentration de CO_2 dans l'organisme que l'apnéiste va devoir apprivoiser.
>
> D'autre part, le travail en hypoxie (O_2 - -) qui repose sur une prolongation de la durée des apnées afin de priver l'athlète d'O2 et de favoriser son accoutumance à ce manque.

Cette contradiction entre la croyance initiale du pratiquant et la réalité des processus physiologiques une fois intégrée par l'apnéiste change sa représentation des risques

[30] Ce phénomène est largement amplifié dans le cas de bouteilles en aluminium qui ont une flottabilité positive en fin de plongée

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

encourus en cas de prolongation de la durée de l'apnée. Il sait alors qu'il dispose encore de suffisamment d'O2 et que la question du report de la ventilation n'est pas une question de vie ou de mort, mais une question de volonté ; ce qui change tout. En effet, une apnée se caractérise par des phases bien identifiées (Lemaître, 2015, p. 29) : une phase préparatoire, une phase de confort et une phase de lutte.

> L'apnéiste débute donc par une première phase préparatoire à l'apnée. Bien qu'il existe différentes méthodes dont l'objectif consiste à réduire le rythme cardiaque autant qu'à remplir au maximum ses poumons d'air, les dangereuses techniques d'hyperventilation sont à bannir, car elles contribuent à retarder artificiellement le moment de l'envie de ventiler.

Ici aussi se fait jour une nouvelle contradiction, car si l'hyperventilation permet effectivement de prolonger la phase de bien-être de l'apnéiste, elle masque artificiellement les signaux d'alerte qui concourent à lui sauver la vie ; or, ces signaux permettent de provoquer l'interruption de l'apnée conduisant ainsi à éviter le seuil syncopal avec la perte la connaissance et le risque de noyade[31] qui l'accompagne.

Il s'agit donc de mettre à profit cette période de préparation afin d'atteindre un état de plénitude propice à la prolongation de l'arrêt de la ventilation. La plupart des apnéistes de haut niveau pratiquent le yoga. Il s'agit là d'une démarche à long terme qui requière un entraînement assidu et prolongé. Le yoga vise à harmoniser postures et ventilation. En s'en inspirant, l'apnéiste amateur peut s'adonner à des exercices qui lui permettront de se relaxer avant le début de son apnée. À titre d'exemple, on peut évoquer la respiration carrée qui permet de retrouver son calme et de se recentrer sur l'instant présent. La respiration carrée ou *samavritti* est une technique issue du pranayama qui consiste en une prolongation de l'inspiration, de la rétention et de l'expiration. *Sama* veut dire « égale » et *vritti* « la vague, l'onde ».

Cet exercice contribue à travailler sur les trois états de la ventilation :

> « l'inspiration permet de recevoir l'énergie au travers du souffle, la rétention consiste alors à suspendre le souffle et à savourer cette énergie. Dans l'expiration, vos pensées et émotions sont évacuées avec le souffle » (Lemaître, 2015, p. 311).

Il nécessite d'adopter une posture assise confortable et d'inspirer et d'expirer en prenant conscience des mouvements de l'abdomen. En ventilant par le nez, on cherche à gonfler et dégonfler son ventre. La respiration est dite carrée parce que les 4 phases sont de durées égales. On commence par inspirer 3 secondes, puis on bloque 3 secondes. Ensuite, on expire 3 secondes puis on bloque à nouveau 3 secondes, et ainsi de suite. Lorsque l'on se sent bien, on peut alors augmenter le temps des 4 phases.

[31] On retrouvera une version humoristique de cette pratique dans le film « le grand bleu » ou le compétiteur japonais, à la suite d'une hyperventilation préparatoire, tombe en syncope avant même de s'être mis à l'eau.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

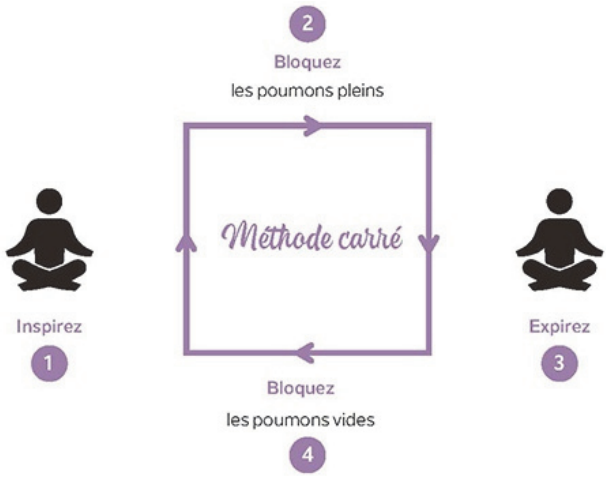


FIGURE 2 - Se recentrer grâce à la respiration carrée (Histel-Barontini, 2021, p. 22)

Cet exercice est une bonne préparation à l'apnée, car

> « en contrôlant volontairement le souffle, nous agissons sur notre système nerveux autonome qui nous permet ainsi de réguler nos émotions et de nous calmer. En augmentant l'oxygénation sanguine du cerveau cet outil améliore également la concentration » (Lara Histel-Barontini, 2021, p. 22).

Bien d'autres exercices sont propices à favoriser l'entrée en apnée. Il appartient alors à chacun d'établir les routines qui lui conviennent le mieux.

Lorsque l'apnéiste est prêt[32], l'immersion peut débuter.

« La phase suivante est une phase de confort et de bien-être. L'apnéiste évolue en toute plénitude sans ressentir les effets de la cessation de la ventilation ». C'est à ce moment que l'apnéiste peut arriver à prolonger son apnée par des techniques de relaxation (méditation pleine conscience par exemple). Le « check corporel » est une bonne manière de détourner sa pensée des sensations désagréables qui peuvent survenir. La vérification corporelle consiste à contrôler que chaque membre est bien relâché.

On procède donc à une visite systématique de chaque partie de l'organisme depuis les doigts de pieds jusqu'au sommet du crâne. Ainsi, on détecte les parties du corps qui sont tendues et l'on peut les relâcher ce qui contribue à réduire la consommation d'oxygène. En détournant notre conscience de tout ce qui ne concerne pas l'instant présent, on évacue les facteurs anxiogènes également consommateurs d'oxygène. Cet outil particulièrement adapté à l'apnée statique (apnée de surface ou *free fall*) peut aussi être utilisé lors d'apnées dynamiques, mais avec un entraînement plus soutenu, car toutes les parties du corps ne sont pas accessibles à un relâchement systématique.

[32]Lorsque l'apnéiste est en compétition, il doit respecter la chronologie imposée par les organisateurs. Il doit donc caler le début de sa préparation avec le compte à rebours de son immersion.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

« Puis vient la phase de lutte : elle se caractérise par des spasmes du diaphragme qui apparaissent de plus en plus fréquemment et qui deviennent toujours plus puissants au fur et à mesure que l'apnée se prolonge ». Cette phase inconfortable est la plupart du temps la cause de cessation de l'apnée. Pourtant, fort de la connaissance selon laquelle ce n'est pas le manque d'O_2, mais la tolérance au seuil de CO_2 qui est en cause, l'apnéiste amateur peut décider de prolonger son apnée par sa seule volonté et sans aucun risque vital.

Se joue alors un dialogue intérieur où il s'agit de façon récurrente de faire la part des choses entre ce qui est encore supportable et ce qui amène à la sortie de l'eau, échappatoire qui met un terme à cette phase déplaisante de combat. Ici encore apparaît un paradoxe que la pratique va contribuer à dépasser. Pour contrôler cette phase de combat et contrairement à ce qui semble logique, il faut « renoncer » à lutter… il faut se relâcher : c'est à cette condition que les contractions diaphragmatiques vont devenir de plus en plus supportables. Les différentes méthodes que sont

> « le yoga, la méditation et les techniques de ventilation développées par l'apnéiste permettent de réduire le rythme cardiaque, la consommation en oxygène de repos (-32%), et jouent ainsi un rôle conséquent dans la durée de l'apnée » (Lemaître, 2014, p. 30).

Il s'agit donc d'avancer sur le chemin de la décontraction en construisant un itinéraire de préparation propre, des routines personnelles de concentration et de gestion des spasmes dont l'apnéiste sait qu'irrémédiablement ils apparaîtront. Les accueillir avec une certaine forme d'acceptation s'avère alors plus profitable que de s'évertuer à les combattre à tout prix, attitude qui n'aboutit qu'à l'effet inverse, c'est-à-dire à un envahissement contreproductif de l'espace de la conscience qui focalise la pensée sur le ressenti des effets douloureux. Au contraire, accepter permet de maîtriser ces réactions, de réduire la consommation d'O_2 et de mieux résister aux impulsions spontanées qui conduisent à agir sous le joug des émotions. Paradoxalement, en déplaçant la focalisation de la conscience, de nos émotions vers une forme choisie d'activité volontaire (check corporel par exemple), il devient possible de reprendre le contrôle de la situation. La crainte de l'accident, appuyée par des spasmes de plus en plus puissants et fréquents, peut alors être raisonnée. Dans ces conditions, l'apnéiste peut mettre à distance les sensations qu'il ressent, se dire qu'il lui reste encore une réserve d'oxygène suffisante et que la situation difficile qu'il vit n'est qu'un « tour » que son corps lui joue pour l'inviter à ventiler. Il s'agit alors de déjouer cette « mystification » en accueillant cet avertissement comme un jalon de la séquence d'apnée et non comme un signal de fin. À cette condition, l'apnéiste peut reprendre l'ascendant sur la situation. Accepter, ce n'est donc pas capituler, mais au contraire canaliser son énergie vers des tâches spécifiques. L'apnéiste peut ainsi retrouver une certaine forme de sérénité, voire un certain plaisir à avoir anticipé ce qui se produit.

Une autre contradiction doit être appréhendée par l'apnéiste, c'est celle de la gestion du froid. Comme cela a été montré plus avant, le froid favorise le déclenchement des réflexes d'immersion, car « *plus la température de l'eau est basse, plus la bradycardie et la vasoconstriction sont marquées aidant de la sorte à minimiser les*

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

dépenses énergétiques » (Lemaître, 2014, p. 202). Cependant, chez les amas apnéistes coréennes, « *la consommation en O_2 est stable lorsqu'elle porte une combinaison alors qu'elle augmente rapidement après une heure d'apnée dynamique sans vêtement isotherme* » (*Ibid.*). Là encore, la gestion de la contradiction est au cœur des choix que les apnéistes vont devoir réaliser.

8.4 Les contradictions spécifiques à la plongée sous-marine

Le plongeur sous-marin n'est pas exempté de ces contradictions qui pavent les pratiques subaquatiques. Se pose légitimement la question du libre retour à l'air libre qui est particulièrement prégnante dans le cas de la plongée spéléologique (sous plafond).

> L'augmentation considérable de la durée d'une plongée en comparaison de la durée du séjour de l'apnéiste peut donner l'illusion d'une très grande liberté d'action. Pourtant, plus le temps passé sous l'eau s'allonge, plus le moment de la sortie est retardé. Par ailleurs, les dispositifs embarqués par le plongeur et leur lourdeur (bien que relativement négligeable dans l'eau) sont malgré tout, des entraves permanentes à une évolution souple et fluide. La mise à l'eau et la sortie de l'eau peuvent parfois devenir problématiques lorsque la mer est agitée.

En comparant les deux pratiques, on en déduit qu'elles conduisent l'une comme l'autre à la gestion de paradoxes similaires, bien qu'opposés. L'accumulation de gaz carbonique au cours de l'apnée d'une part, et la saturation des tissus en azote durant la plongée d'autre part, conduisent à des prescriptions contraires. Dans le cadre de l'apnée, c'est le temps passé sous l'eau qui invite à remonter à la surface ; dans le cadre de la plongée, c'est l'inverse, la durée du séjour nécessite de le prolonger. L'analyse conduit alors à proposer cet aphorisme. Tandis que l'apnéiste est amené à sortir de l'eau alors qu'il souhaiterait y demeurer, le plongeur doit y rester alors qu'il voudrait en sortir.

Conclusion

La pratique de ces disciplines sportives qui se déroulent en milieux quasi extrêmophiles, puisque non soutenables à long terme, amène à repenser les notions de complexité et donc d'imprédictibilité. Pratiquer la plongée ou l'apnée ne peut pas se limiter à appliquer des règles apprises sur terre et exécutées dans l'eau. La méthode de formation fédérale qui repose sur une pédagogie par objectif (PPO) vieille de 40 ans laisse perplexe. Le vécu de paradoxes récurrents amène à la gestion de contradictions qui nécessitent des adaptations permanentes, des interventions qu'il faut réaliser plus ou moins rapidement en fonction de l'évolution de la situation. La prise de risque à laquelle semble consentir l'humain qui s'immerge ne peut donc être déjouée par l'application d'une procédure aussi stricte soit elle. Il faut indubitablement se pencher sur l'hypothèse de Gilles Raveneau :

> « la pratique normalisée de la plongée fait une place au risque et à la prise de risque, tout en en effaçant les traces au fur et à mesure, de sorte qu'il

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

> s'agirait d'une activité où la règle consisterait dans la transgression même du système normatif » (Raveneau, 2006, p. 613).

Il reste que pour celui qui aime à mettre la tête sous l'eau pour éprouver le bien-être d'un périple entre deux eaux, l'aventure est aussi collective. Les membres d'une palanquée ne sont pas isolés. Ils partagent. Visiter les fonds marins, explorer une épave, s'adonner à la biologie marine *in situ* sont autant de points d'intérêts qui confèrent à ces pratiques un caractère collectif. Si, la formation d'un plongeur autonome vise (comme son nom l'indique) à lui conférer une plus grande autonomie, elle ne peut se construire que dans la relation à cet autre qui veille sur soi et sur qui l'on veille en retour. Les pratiques subaquatiques sont indéniablement des pratiques à risques, mais le chemin qui permet de les contrôler ne peut se construire que sur la base des aléas que la déambulation sous-marine procure. Prendre à bras le corps les contradictions conduit à s'interroger sur la logique des comportements adoptés et sur leur caractère plus ou moins rationnel. La confrontation au réel conduit parfois à des issues insoupçonnées. L'intrigue singulière qui se trame lors de chaque immersion provoque un suspens invitant les protagonistes à anticiper le développement ultérieur de leurs actions. Éprouver la sensation d'être en sustentation ; épier un poisson, chercher une plante ou une algue ; être capable de comprendre le comportement d'un animal ; savoir où fouiner pour trouver ce que l'on veut observer ; visiter une épave, témoin englouti de l'histoire de l'humanité ; tomber sous le charme d'un paysage aquatique ; faire des rencontres inopinées ; autant d'aspirations qui contribuent à tenir en haleine les plongeurs qui s'introduisent dans le milieu subaquatique. On ne peut que suivre Alfred Hitchcock lorsqu'il nous suggère que « *la vie, ce n'est pas seulement respirer, c'est aussi avoir le souffle coupé* ».

Références

Andersson, J.P. & Schagatay, E. (1998). Arterial oxygen desaturation during apnea in humans. *Unsersea and Hyperbaric Medecine*, 25-1, 21-25.

Belin, J-M. (2005). *Les Modèles de décompression*. Mémoire d'Instructeur Régional FFESSM.

Bert, P. (1878). *La pression barométrique*. Masson.

Bonnet, F. (2013). *La plongée en apnée – De l'information à la prévention des risques*. Diplôme Inter Universitaire de Médecine Subaquatique et Hyperbare. Université de Franche-Comté.

Brun, F. et Bernabé, P. (2015). *Le guide de la plongée en recycleur*. Éditions GAP.

Brun, F. et Bernabé, P. (2021)._Le guide de la plongée Nitrox Trimix Tek._ 3e édition. Éditions GAP.

Detay, M. et Thomas, P. (2018). *Les extrémophiles dans leurs environnements géologiques – Un nouveau regard sur biodiversité et sur la vie terrestre et extraterrestre*. Planet Terre. https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/extremophiles.xml

Éloi, S. (2022). *Approche socio-instrumentale de l'activité humaine. Développement dialectique dans le champ des Pratiques Physiques Sportives et Artistiques*. Habilitation à Diriger des Recherches. Université Paris Est Sup. https://hal.u-pec.fr/tel-04013809

Engels, F. (1873-1886/1952). *Dialectique de la nature*. Paris Éditions sociales.

Engels, F. (1878/1977). *Anti-düring*. 3e édition. Éditions sociales.

Foret, A. (2020). *Plongée plaisir 4*. 10e édition. Éditions GAP.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901

Histel-Barontini, L. (2021). Outil 3. La respiration carrée. Dans L. Histel-Barontini (Dir.), *La boîte à outils de la relaxation* (p. 22-23). Dunod.

Lemaître, F. (2014). *L'apnée – De la théorie à la pratique*. Sous la direction de Frédéric Lemaître. Presses universitaires de Rouen et du Havre.

Lemaître, B. (2015). *Manuel d'entraînement à l'apnée*. Turtle prod éditions

Lemmens, B. (2016). Retenir son souffle pour la conquête de l'extrême : physiopathologie de l'apnée. *Info respiratoire,* 133, 21-25.

Lemoigne, J.-L. (1999). *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod.

Marx, K. et Engels, F. (1845-1846/1968). *L'idéologie allemande*. Trad. H. Auger et coll. Éditions sociales.

Moricot, C. et Rosselin-Bareille, C. (2021). Quand des hommes respirent sous l'eau et volent dans l'air. Entre cultures matérielles et incapacités naturelles. *Techniques & Culture* 75, 136-149.

Raveneau, G. (2006). La plongée sous-marine, entre neutralisation du risque et affirmation de la sécurité. *Ethnologie française*, 36, 613-623. https://doi.org/10.3917/ethn.064.0613

Sève, L. (1998). *Sciences et dialectiques de la nature*. Lucien Sève Coord. La dispute.

Sève, L. (2005). *« De quelle culture logico-philosophique la pensée du non linéaire a-t-elle besoin ? »*. Dans J. Guespin-Michel (Dir.), Émergence, complexité et dialectique (p. 49-202). Odile Jacob.

Sève, L. (2014). *Penser avec Marx aujourd'hui, t. III, « La philosophie »*. La Dispute.

Published in : N. WALLIAN, M.-P. POGGI et G. LEFER SAUVAGE (Eds.), *Les savoirs de l'extrême. Médiation-appropriation en contextes*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813004901, doi : 10.17184/eac.9782813004901