

# Rôle de la respiration dans le phénomène de déshydratation en plongée : Calcul de la perte hydrique due à la respiration d'un air à faible hygrométrie issu des bouteilles de plongée.

Frédéric JULIEN, Rodolphe MAIGNAL  
UMi – GEP : <http://umi-science.org>

## I - Présentation :

Après la plongée, le plongeur ressent souvent une sensation de soif. Est-ce cette sensation est due au mode respiratoire en plongée (respiration buccale), ou à un réel déficit hydrique ? Dans ce contexte, dans quelle proportion, la respiration d'un air « sec » issu de la détente d'air comprimé dans des bouteilles de plongée, intervient-elle ?

Cette étude démontre que l'air « sec » des bouteilles de plongée induit une perte d'eau réelle lors de la respiration subaquatique par rapport à la respiration d'air naturel, mais que cette perte d'eau est négligeable en regard de la perte d'eau globale pendant une plongée.

## II- Méthode et calculs :

### a) La respiration en plongée

Pour des raisons techniques, de sécurité, et de norme (EN 12021), l'air comprimé dans les bouteilles de plongée est un air qui contient moins d'eau (sous forme gazeuse) que l'air ambiant. L'air des bouteilles de plongée est décrit comme étant un air « sec ».

Pour mémoire, la respiration physiologique est une réalisé par le nasopharynx essentiellement permettant un réchauffement et une humidification de l'air inspiré. Sous nos latitudes et au niveau de la mer l'air a une hygrométrie et une température modérées.

En plongée, la respiration est uniquement réalisée par l'oropharynx qui joue moins bien le rôle d'humidificateur et de réchauffement de l'air. Ceci amène une perte de calories et d'eau à ce niveau. Le plongeur constate un assèchement de la gorge au cours de sa plongée et une sensation de soif à sa sortie de l'eau.

Peut-on évaluer cette perte hydrique par respiration et évaluer sa participation à la déshydratation du plongeur ?

### b) Considérations théoriques

Pour effectuer cette étude, nous prendrons les paramètres techniques théoriques d'une plongée et d'un plongeur « types ».

Le plongeur « théorique » est un homme adulte moyen dont le volume courant respiratoire est de 500 ml [11].

La bouteille de plongée utilisée sera une bouteille « standard » de 15 litres contenant de l'air comprimé à 200 bars. Ainsi le volume équivalent atmosphérique est égal à 3000 litres (15 x 200), soit 3 m<sup>3</sup>.

Une partie de l'air de l'air contenu dans la bouteille ne participe pas aux échanges respiratoires.

Le volume mort que représente le détendeur de plongée est évalué en moyenne à 75 ml. Ce volume représente 15 % du volume courant :

$\text{Volume mort relatif du détendeur} = \frac{\text{volume mort moyen introduit du détendeur}}{\text{Volume courant}} \times 100 = \frac{75 \times 100}{500} = 15\%$
---

Par suite 15 % de l'air contenu dans la bouteille ne participera pas aux échanges respiratoires. Ces 15 % d'air représente un volume de 450 litres équivalents atmosphériques ( $3000 \times 0,15 = 450$ ).

D'autre part, la valeur de profondeur moyenne de la plongée que nous retiendrons pour notre étude, sera de 10 m. A cette profondeur, la pression absolue est de 2 bars. Par suite, le volume de gaz perdu par le détendeur (et ne participant pas aux échanges) est de  $450 \times 2 = 900$  litres équivalents atmosphériques.

La quantité d'air contenue dans la bouteille participant effectivement aux échanges gazeux n'est donc plus que de 2100 litres équivalents atmosphériques (3000 litres - 900 litres).

C'est cette valeur de 2100 litres d'air « respiré » au cours de la plongée que nous prendrons en compte pour nos calculs.

Notons quand même qu'il ne sera pas tenu compte dans nos calculs de l'utilisation d'une partie de l'air des bouteilles pour l'équilibrage (gonflage du gilet de flottabilité), ce qui réduirait encore davantage la quantité d'air réellement disponible pour les échanges respiratoires.

### c) Rappels physiologiques

La quantité maximum d'eau sous forme de gaz (H<sub>2</sub>O gazeux) pouvant être contenue dans l'air dépend de la température et de la pression de l'air.

La saturation ou hygrométrie correspond à la quantité d'eau sous forme gazeuse présente dans l'air à une température donnée. Au-delà de 100% de saturation, l'air ne peut plus contenir d'eau sous forme gazeuse (dans certaines conditions (absence de poussière dans l'air), le taux d'humidité peut dépasser 100 % on est alors en sursaturation). La capacité de l'air à contenir de l'eau gazeuse varie en fonction de la température. Ainsi plus la température de l'air se réchauffe, plus l'air peut contenir d'eau gazeuse, et inversement.

Le tableau ci-dessous [1] donne quelques valeurs d'humidité de l'air à saturation (100 % d'humidité) pour une pression atmosphérique de 1 bar :

Température de l'air (en °C)	Pression partielle d'H <sub>2</sub> O (en mmHg)	Masse d'eau gazeuse (en g/m <sup>3</sup> d'air)
0	4,6	4,8
10	9,2	9,4
20	17,5	17,3
30	31,8	30,3
37	46,9	43,9

En France, les conditions atmosphériques habituelles établissent un taux d'humidité variant entre 40 et 100 %, mais estimé en moyenne à 60 % [7]. Ce taux varie en fonction de la température de l'air et des conditions météorologiques. Toujours en fonction de la température de l'air et des conditions atmosphériques (notamment la pression) la quantité d'eau contenue dans un même volume d'air peut varier pour un même taux d'humidité. Pour connaître la quantité réelle d'eau (gazeuse) par volume d'air, il faut donc exprimer le taux d'humidité, pour une température et une pression données.

Ainsi, au niveau de la mer, à une pression de 1 atmosphère (soit un bar ou 760 mmHg) et à une température de 20°C, la pression partielle d'H<sub>2</sub>O dans l'air est de 17,5 mmHg, pour un taux d'humidité de 100 %, ce qui représente une masse de 17,27 g d'eau par mètre cube d'air.

#### d) Calculs

Pour effectuer les calculs qui suivent nous prendrons des valeurs « moyennes » qui se veulent représentatives des conditions atmosphériques couramment rencontrées en France.

- La pression atmosphérique retenue pour les calculs sera de 1013 hPa (soit 760 mmHg ou un bar), qui représente une valeur « moyenne » au niveau de la mer.
- La température de l'air retenue pour les calculs sera de 20 °C.
- Avec les conditions précédentes, nous prendrons un taux d'humidité relative (hygrométrie) de 60%.

D'après les conditions définies ci-dessus :

$$P_{\text{H}_2\text{O}} \text{ pour } 60\% \text{ d'hygrométrie} = 17,5 \text{ (PpmmHg)} \times 60\% = 10,5 \text{ mmHg}$$

Cette valeur va servir de référence pour le reste des calculs.

Par calcul, on peut évaluer la quantité d'eau par m<sup>3</sup> d'air à la pression atmosphérique de 760 mmHg. La proportion de molécules d'eau par rapport aux autres molécules constituant l'air est de 1,38 % avec le calcul suivant :

$$\text{Quantité relative de molécules d'eau} = \frac{10,5 \times 100}{760} = 1,38\%$$

Où : Pression totale de l'air: 760 mmHg  
Pression partielle de H<sub>2</sub>O dans l'air : 10,5 mmHg  
Température de l'air : 20°C.

Pour 1 m<sup>3</sup> de cet air, soit 1000 litres, et toujours à une température de 20 °C on aura donc 13,8 litres d'eau (1000 x 1,38%). La masse d'eau peut être alors calculé ainsi :

$$\frac{\text{Volume d'eau gazeuse} \times \text{masse molaire de l'eau}}{\text{Masse Volumique molaire}} = \frac{13,8 \text{ litres} \times 18\text{gr/mole}}{24,05 \text{ litres /mole}} = 10,33\text{gr}$$

Ou [8]: masse volumique molaire à 20°C : 24,05 l / mole  
masse molaire de l'eau : 18g / mole.

Soit 10,33gr d'eau par m<sup>3</sup> d'air à 20 °c, au niveau de la mer

L'air expiré est considéré comme étant saturé en eau, donc avec un taux de 100 % d'humidité. La température corporelle est de 37°C, mais compte tenu des volumes morts anatomiques et du

réchauffement incomplet de l'air dans le système respiratoire, la température de l'air expiré est en moyenne de 35°C [9]. Nous prendrons cette température comme référence pour les gaz expirés.

D'après le diagramme de Mollier, on peut déduire que à 35°C, pour une saturation de l'air égale à 100%, on a  $p_{H_2O} = 42,18$  mmHg.

Ainsi en conservant les conditions précédentes, avec une pression atmosphérique de 760 mmHg (niveau de la mer) on peut calculer la quantité d'eau par m<sup>3</sup> d'air :

$$\text{Quantité relative de molécules d'eau dans l'air expiré} = \frac{42,18 \times 100}{760} = 5,55 \%$$

Où : Pression totale de l'air: 760 mmHg  
Pression partielle de H<sub>2</sub>O dans l'air expiré : 46,9 mmHg  
Température de l'air expiré : 35°C

Soit pour 1 m<sup>3</sup> : 1000 litres x 5,55 % = 55,5 litres d'eau

Soit une masse d'eau de :  $\frac{55,5 \text{ litres} \times 18\text{g/mole}}{25,27 \text{ litres/mole}} = 39,53$  gr d'eau par m<sup>3</sup> d'air expiré

Où [8] : volume molaire des gaz à 35°C: 25,27 l / mole  
masse molaire de l'eau : 18g/mole

La perte d'eau lors d'une respiration « aérienne » normale est donc de 29,2 gr/m<sup>3</sup> (39,53gr - 10,33gr)

Si on calcule alors la perte d'eau sur 24 heures avec une respiration dite normale :

On prends un volume courant (VT) de 0,5 litres et une fréquence respiratoire (FR) à 12 cycles/min  
Sur 24h, le volume mobilisé est de 8640 litres (0,5l/cycle x 12cycles/min x 60mn x 24h) soit 8,640 m<sup>3</sup>

Soit une perte de 8,640m<sup>3</sup> x 29,2 gr/m<sup>3</sup> = 252,3 gr

Donc un volume d'eau sur 24h de 252,3 ml

Ce volume correspond donc aux pertes insensibles de la respiration et il est comparable aux données de la littérature, 250ml par jour selon Cuvelir, Dugardin et Grib [2].

L'air provenant des bouteilles de plongée a un taux d'humidité très faible de l'ordre de 0,1 % à quelques pourcents. Cette variabilité est due au taux d'humidité de l'air pris par le compresseur, du modèle, de l'état de celui-ci, etc... La Marine Nationale préconise un point de rosée égal à -30°C pour les gaz d'alimentation plongeurs [10], soit après calcul, les valeurs dans le tableau suivant :

Valeurs d'humidité relative pour un point de rosée à -30 °C :

Températures (°C)	% humidité relative	Masse d'eau gazeuse en g/m <sup>3</sup> d'air
0	6,22	0,30
10	3,09	0,29
20	1,62	0,28
30	0,89	0,27
35	0,675	0,267
40	0,51	0,26

La norme EN 12021 impose une teneur en eau inférieure à 50 mg/m<sup>3</sup> pour une pression nominale de 200 bars.

Pour la suite des calculs, l'air des bouteilles de plongée est considéré comme totalement exempt d'eau.

Comme définit dans nos paramètres théoriques d'étude, le calcul se base sur une quantité d'air respirable au court de la plongée de 2100 litres en volume équivalent atmosphérique.

On peut donc remarquer que :

Masse d'eau contenue dans 3 m<sup>3</sup> d'air eau niveau de la mer :  $2,1 \times 10,37 \text{ gr} = 21,78 \text{ gr}$   
Masse d'eau contenue dans 3 m<sup>3</sup> d'air expiré :  $2,1 \times 39,53 \text{ gr} = 83,01 \text{ gr}$   
Masse d'eau contenue dans 3 m<sup>3</sup> d'air bouteille :  $2,1 \times 0 = 0 \text{ gr}$

Ainsi on peut calculer les différentes consommations et pertes d'eau :

Consommation d'eau par l'organisme par la ventilation à partir de 2,1 m<sup>3</sup> d'air normal : 61,23 gr (83,01 gr – 21,78 gr) soit environ 61 ml

Consommation d'eau par l'organisme par la ventilation à partir de 2,1 m<sup>3</sup> d'air sec (bouteilles de plongée) : 83,01 gr (83,01 – 0) soit environ 83 ml

La différence de perte hydrique induit par la respiration d'un air sec pour 3 m<sup>3</sup> est donc : 21,78 gr (83,01 gr – 61,23 gr) soit environ 22 ml

avec : densité de l'eau = 1

#### e) Éléments de comparaison

La perte hydrique due à la respiration d'un air sec pour un volume 2,1 m<sup>3</sup> est donc de 83 ml environ. Ceci à ramener à une perte « normale en respiration aérienne » de 61 ml représente environ + 36 %.

Si l'on compare ceci aux pertes insensibles ceci représente 8,8 % (22 ml / 250ml x 100).

Enfin rapporté au volume d'eau total d'un homme de 70kg : 0,019 % (22 gr / 70 kg x 0,6 x 100).

De plus, si l'on se réfère à l'étude de Y.Lacombe [3], cette perte d'eau respiratoire par rapport à la perte moyenne hydrique par les urines, représente : 2,75 % (22/800 X 100)

L'équipe norvégienne de Ronnestad & al.[4], a démontré une perte hydrique de 1,7gr/mn pour des exercices en ambiance pressurisé à 3,7 PA (pression absolue) soit une profondeur de 27m en mer. S'il on rapporte cette valeur à une plongée moyenne de 30mn, on obtient donc une perte de 51gr, ce qui est superposable puisque dans l'étude, les plongeurs réalisaient en plus un exercice sur cycloergometre.

### III - Analyse des résultats :

Il apparaît donc que l'air sec des bouteilles de plongée est effectivement responsable d'une perte d'eau réelle, mais que cette perte d'eau est négligeable au regard de la perte d'eau globale durant une plongée et au volume d'eau total du plongeur.

Par ailleurs ces calculs théoriques majorent les résultats car il est démontré que les pertes hydriques respiratoires dépendent de la fréquence et du volume courant, et de plus, lors de l'expiration, la première partie d'air est non saturée dû au volume mort [5]. De plus une partie de l'air que nous avons pris en considération pour les échanges gazeux sera en réalité utilisé pour la stabilisation du plongeur (gestion du gilet de stabilisation), et une autre partie ne sera pas utilisée puisqu'il est bien rare de remonter en surface en fin de plongée avec 0 bars d'air restant dans la bouteille. La déshydratation réellement induite par l'air sec des bouteilles est donc plus faible que celle obtenue par nos calculs théorique.

Par suite, cette respiration oropharyngée d'air froid et sec, est essentiellement responsable d'une déshydratation locale des muqueuses. Le froid de l'air est, quant à lui, responsable d'une perte calorique conduisant les professionnels à réchauffer l'air [6].

### Bibliographie :

- 1 - K.Schmidt-Nielsen. Physiologie animale : Adaptation et milieu de vie. Ed. Dunod ; Tableau 1.2, p7.
- 2- A.Cuvelir, F. Dugardin et M.Grib. L'humidification des voies aériennes. Info respiration. N° 58. dec 03
- 3- Y.Lacombe. Bilan hydrique au cours de plongées autonomes en lac. Thèse de médecine, Paris Ouest, 1989
- 4- I.Ronnestad, E.Thorsen, K.Segadal, A.Hope. Bronchial response to breathing dry gas at 3,7 Mpa ambient pressure. Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 1994;69(1):32-5
- 5- L.Ferrus, H.Guenard, G.Vardon, P.Varene. Respiratory water loss. Respir Physiol. 1980 mar;39(3):367-81
- 6- H.Nakayama. Body thermal drain under hyperbaric dry heliox environment with undersea excursion dive. In J Hum Ergol 1978 dec ;7(2) :177-83
- 7- S.Narçon. » Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire : contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielle sur le confort ». Thèse de doctorat en neuroscience et comportement. Laboratoire de Neurobiologie Sensorielle – EPHE, oct. 2001.
- 8- Valeurs obtenues d'après « Paul Arnaud: Cours de chimie physique », P. Arnaud, éd. DUNOD ; p 36 et 178.
- 9- G. Schoknecht and B. Stock. "The Technical Concept for Evidential Breath Testing in Germany", 13th International Conference on Alcohol, Drugs and Traffic Safety (T'95), Adelaide, AUSTRALIA from 13 August 1995 to 18 August 1995.
- 10 – « Physiologie et médecine de la plongée », ouvrage collectif coordonné par B.Boussolle, Ellipses édition Marketing, Paris 1992 ; tableau 1, p 351.
- 11- « Anatomie et physiologie humaines », de Elaine N. Marieb, éd. De Boeck Université, 2<sup>ème</sup> édition ; p 742 : figure 23.13.