

Tout savoir sur le fonctionnement des recycleurs

Actuellement, l'effort de développement des recycleurs se concentre sur une résistance respiratoire faible afin de garantir le confort respiratoire optimal. Ce document d'information présente le fonctionnement des recycleurs en fonction des principaux facteurs physiologiques et externes qui ont une incidence sur la résistance respiratoire et le travail respiratoire.



Que ce soit au cours des interventions civiles ou militaires, les plongeurs doivent pouvoir travailler selon diverses contraintes. En raison du froid, de l'obscurité, du bruit et de la difficulté d'orientation générale, les activités qui à terre peuvent sembler simples sont susceptibles de représenter sous l'eau une charge physique et mentale extrême pour les intervenants.

Pour atteindre leur site d'intervention sous l'eau et mener à bien leur mission, les plongeurs doivent souvent rester immergés pendant longtemps. Ils se fient pour cela à leur recycleur, qui leur permet de se concentrer pleinement sur leur travail, quelles que soient les conditions ambiantes. Plus la distance couverte à la nage est longue, plus le plongeur doit pouvoir respirer aussi facilement que possible. Avec une résistance respiratoire réduite au minimum, le plongeur peut travailler plus longtemps et de façon plus sûre, puisque son énergie est concentrée sur son intervention, qui est risquée.

Pour que l'utilisateur puisse respirer confortablement, le recycleur doit impérativement être adapté à des facteurs tels que la ventilation, la résistance respiratoire, le travail inspiratoire et expiratoire et les différences de pression.

Les facteurs relatifs à l'anatomie humaine sont principalement prédéfinis, mais le sexe et l'âge du plongeur engendrent des différences. Il est essentiel que le recycleur permette à l'utilisateur de respirer confortablement. L'utilisation d'un recycleur exige de tenir compte de différents aspects, notamment le dosage de gaz frais, le circuit respiratoire et l'absorption de CO₂. Le branchement des différents composants du système et leur positionnement par rapport à la transversale (concernant le débit de gaz) sont aussi des facteurs importants.

Chez Dräger, nous avons pris en compte tous ces facteurs lors du développement de nos derniers équipements de plongée. Vous trouverez ci-après de plus amples détails, illustrés par des exemples réels.

COMMENT FONCTIONNE UN RECYCLEUR ?

Les deux éléments techniques principaux du recycleur sont le circuit respiratoire et l'alimentation en gaz frais.

Le circuit respiratoire est constamment alimenté en oxygène et en mélange gazeux par le détendeur automatique. Le circuit respiratoire est en premier lieu composé du sac inspiratoire. À partir de ce sac, le gaz respiratoire circule dans le tuyau de gaz jusqu'à l'embout buccal. Deux vannes directionnelles situées devant et derrière l'embout buccal permettent au gaz de circuler dans le bon sens. Le gaz expiré circule dans le tuyau de gaz jusqu'au sac expiratoire. Si les sacs atteignent une limite de pression prédéterminée, la soupape de surpression rejette le gaz excédentaire dans l'eau jusqu'à ce que la pression retrouve un niveau normal. Le gaz expiré passe par une cartouche de filtration remplie de chaux sodée, qui absorbe tout le dioxyde de carbone. Le gaz ainsi traité retourne ensuite au sac inspiratoire où il se mélange au gaz frais.



LAR 8000

Le LAR 8000 est un recycleur destiné aux opérations tactiques spéciales. Il fonctionne en circuit fermé ou en circuit semi-fermé. Cet appareil offre une résistance respiratoire très faible, une bonne longévité et une grande facilité d'utilisation.

VENTILATION

Nos appareils respiratoire et cardiovasculaires régulent l'échange gazeux qui permet l'absorption de l'oxygène et l'évacuation du dioxyde de carbone par notre corps (Schmidt et al., 2000). En cas d'effort physique, notre besoin énergétique augmente, ce qui stimule notre activité cardiovasculaire et respiratoire. La ventilation est le processus par lequel s'opère l'échange gazeux dans nos poumons. Au repos, l'individu moyen ventile environ 0,5 litre d'air par inspiration. Dans les moments d'effort physique, ce volume peut passer à 2 ou 3 litres. Les personnes entraînées à l'endurance physique peuvent même inhaler jusqu'à 4 litres en une inspiration (Weineck, 2000). La capacité pulmonaire dépend toutefois du sexe, de la taille, de la position du corps et du niveau d'entraînement physique.

Le volume respiratoire peut se mesurer d'après le débit volumique. Le volume respiratoire par minute (VRM) se mesure en multipliant le volume inspiratoire par la fréquence inspiratoire par minute. Un individu au repos qui inspire 18 fois 0,5 litre par minute a donc un VRM de 9 l/min. Si en cas d'effort physique la personne inspire 2,5 litres à raison de 40 fois par minute, son VRM passe donc à 100 l/min. Les personnes entraînées à l'endurance physique peuvent même atteindre un VRM plus élevé (Stegemann, 1991).

Il est également possible d'exprimer la ventilation en volume fréquence respiratoire. L'unité de mesure internationale de la ventilation est le volume fréquence expiratoire (V), à savoir le produit du volume d'air expiré (V_{ex}) et de la fréquence respiratoire (f). Le volume inspiratoire par minute (V_I) se calcule en multipliant le volume inspiratoire (V_{in}) par la fréquence respiratoire. Lors d'une respiration complète, le volume d'air inspiré et le volume d'air expiré sont très similaires. Cependant, on inspire généralement plus d'O₂ que l'on expire de CO₂ (Schmidt et al., 2000).

RÉSISTANCE RESPIRATOIRE

Lors de la ventilation, les voies aériennes sont exposées à une résistance respiratoire. Il s'agit de la résistance qui s'oppose au débit de gaz respiratoire. En conditions normales, au repos, on peut considérer l'expiration comme un processus passif causé par la force avec laquelle le tissu pulmonaire retrouve naturellement sa forme normale. En situation d'effort physique, l'expiration nécessite une intervention active. Cela est dû au fait que la résistance au débit d'air ne peut plus être dépassée par l'élasticité du tissu pulmonaire seule. À l'inverse, l'inspiration est généralement un processus actif même en conditions normales, parce qu'il faut surmonter la résistance au débit d'air exercée par les voies aériennes et l'élasticité du tissu pulmonaire. Au repos, on dit que l'écoulement du gaz dans les voies aériennes est « laminaire ». Des volutes de gaz peuvent néanmoins se former aux points étroits (Stegemann, 1991). En situation d'effort physique, l'écoulement du gaz dans les poumons peut passer de laminaire à turbulent (Tammeling et al., 1980).

La procédure de test définie par la norme européenne relative aux appareils de plongée à recyclage de gaz (NF EN 14143) spécifie deux points de mesure de la pression externe en vue de déterminer la résistance respiratoire. Le premier point se situe au niveau de la bouche. Le second se situe au niveau de la cage thoracique, au plus près du centre des poumons. La différence de pression entre ces deux points sert à déterminer la résistance respiratoire qui survient lors de l'utilisation de l'équipement de plongée. Les tests sont effectués à un niveau de pression externe de 6 bar, avec un V'_E de 62,5 l/min. La limite maximale autorisée de résistance respiratoire est de ± 25 mbar (CEN TC 79).

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DE L'IMMERSION

En situation d'immersion totale, le corps humain est exposé à des modifications hémodynamiques causées par les variations de pression. Environ 500 à 800 ml de sang est stocké dans le thorax. Les vaisseaux sanguins pulmonaires et le côté droit du cœur se remplissent davantage de sang (Böhm et al., 2004). Le volume systolique du cœur augmente et la fréquence cardiaque diminue. Ce mécanisme est renforcé par le réflexe de plongée, qui est déclenché par les récepteurs buccaux. L'influence du réflexe de plongée sur l'appareil cardiovasculaire s'accroît à mesure que la température baisse. Le taux de réduction de la fréquence cardiaque varie en fonction des individus (EHM, 2003).

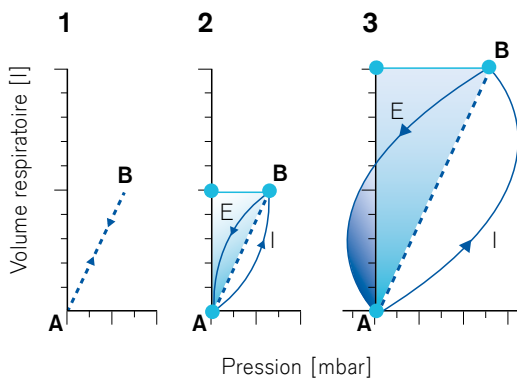
Les changements hémodynamiques provoqués par la pression hydrostatique peuvent aussi avoir une incidence sur le fonctionnement des poumons. L'augmentation du volume des capillaires pulmonaires peut avoir pour effet d'uniformiser le débit sanguin vers les poumons. Mais comme les capillaires pulmonaires se remplissent de plus de liquide, ils ne peuvent pas absorber davantage d'oxygène (Böhm et al., 2004). Par ailleurs, le diaphragme est susceptible de remonter, ce qui réduit un peu plus la vitalité du plongeur (Wenzel et al., 2002). Les études relatives à la performance sous haute pression menées en chambre sous pression montrent une baisse significative de la fréquence respiratoire et du volume respiratoire. Ces phénomènes sont dus à l'augmentation de la densité de l'air respiratoire (Tetzlaff et al., 1998 ; Tetzlaff et al., 1999).

Lors de la plongée avec un recycleur, l'augmentation du travail respiratoire s'explique principalement par des facteurs de mécanique des fluides. À mesure que la pression ambiante monte, la pression partielle et la densité du gaz augmentent. Sous ces effets, l'écoulement du gaz peut passer de laminaire à turbulent. Ce mécanisme a notamment été observé dans les moments d'effort physique intense et à des profondeurs importantes (Wenzel et al., 2002). Les expériences menées montrent que même lorsqu'un plongeur essaie consciemment d'inspirer et d'expirer le volume d'air le plus élevé possible, le volume maximal qu'il peut traiter en une minute à une profondeur de 30 mètres (4,0 bar) équivaut environ à la moitié du volume correspondant en surface (Camporesi et al. 2003).

TRAVAIL RESPIRATOIRE

Quelle est la quantité de travail respiratoire nécessaire pour inspirer et expirer un volume donné de gaz à une profondeur donnée ? Le travail respiratoire désigne le rapport entre la pression (P) et le volume (V), que l'on peut représenter par diagramme pression-volume (Schmidt et al., 2000). La résistance particulière à laquelle est exposé chaque mouvement respiratoire nécessite un travail respiratoire, que l'on peut définir en termes volumiques, en multipliant P par V. Par ailleurs, les phases inspiratoire et expiratoire forment des courbes respiratoires dont la hauteur peut être considérée comme le degré de résistance respiratoire à surmonter. Si lors de l'inspiration, il ne faut surmonter que la résistance élastique, toute modification de volume est à peu près proportionnellement égale à la modification de pression de la résistance respiratoire. Le diagramme pression-volume illustre l'interdépendance des deux facteurs sous la forme d'un tracé linéaire. Lors de l'expiration, le même tracé linéaire doit se répéter dans le sens inverse (fig. 1). Dans ces conditions, la résistance respiratoire serait pour ainsi dire inexistante.

Toutefois, sous l'effet de la résistance visqueuse supplémentaire, la courbe fléchit lors de l'inspiration (I) ; (fig. 1, diagramme 2). La courbe ne se redresse (2 B) qu'à la fin de l'inspiration, lorsque l'écoulement d'air s'arrête. Il en va de même pour la courbe expiratoire (E). Celle-ci s'accroît et elle ne se redresse qu'à la fin de l'expiration (2 A). En situation d'effort physique intense, lorsque la respiration s'accélère et devient plus profonde, l'inclinaison de la courbe est plus extrême lors de l'inspiration (I) et de l'expiration (E), compte tenu que plus la fréquence respiratoire (f) augmente, plus la résistance visqueuse est importante qu'elle ne le serait au repos.



Trois diagrammes pression-volume : le diagramme 1 représente un cycle respiratoire supposé présentant uniquement une résistance élastique. Le diagramme 2 représente une respiration normale au repos. Le diagramme 3 représente une respiration plus profonde et plus rapide. La courbe I correspond à l'inspiration et la courbe E à l'expiration. Le point A correspond au début de l'inspiration et à la fin de l'expiration. Le point B correspond à la fin de l'inspiration et au début de l'expiration (modélisation d'après Schmidt et al., 2000).

On peut calculer le travail respiratoire nécessaire à une respiration en fonction de l'aire délimitée par les courbes inspiratoire et expiratoire (Tammeling et al., 1980). Plus l'aire est grande, plus le travail respiratoire que doit effectuer le plongeur de combat est important. Pour le plongeur de combat, ce travail respiratoire est ressenti comme une résistance respiratoire accrue. On considère généralement que les plongeurs de combat sont d'une condition physique supérieure à la moyenne. Pour autant, leur performance physique est altérée en cas d'exposition prolongée à une résistance respiratoire accrue (et qui rend le travail respiratoire plus ardu). L'augmentation de la résistance respiratoire entraîne une fatigue plus rapide du plongeur de combat.

INFLUENCE HYDROSTATIQUE DE LA POSITION DU SAC RESPIRATOIRE

Le sac respiratoire d'un recycleur à circuit fermé ou semi-fermé fonctionne comme un « contre-poumon » à partir duquel le plongeur inspire.

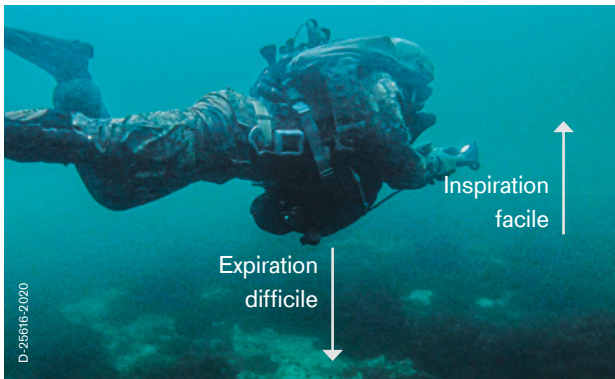
La taille, la position et la forme du sac dépendent de la façon dont le recycleur est conçu. Les recycleurs modernes sont dotés de deux sacs respiratoires, l'un est destiné à l'inspiration, l'autre à l'expiration. Concernant les sacs respiratoires, il existe trois configurations courantes. Dans les deux premières, les sacs sont intégrés au corps du recycleur. En fonction du design, le plongeur porte le recycleur et les sacs sur la poitrine ou sur le dos. Dans la troisième configuration, les sacs sont posés sur l'extérieur de la coque et fixés au niveau des épaules du plongeur, sur le devant ou sur l'arrière.

La position des sacs respiratoires a une forte incidence sur la résistance respiratoire et l'hydrostatique du recycleur. La charge hydrostatique correspond à la quantité de pression positive ou négative que les poumons du plongeur doivent produire pour surmonter la différence de pression entre le centre des poumons et le point le plus bas du volume de gaz présent dans le sac respiratoire.

Si les sacs respiratoires du recycleur sont situés sur le dos du plongeur, l'inspiration est plus difficile que l'expiration lorsque le plongeur est en position normale de nage, c'est-à-dire tourné vers le bas. Si le recycleur est porté sur la poitrine, les sacs respiratoires sont au-dessous des poumons lorsque le plongeur est en position normale de nage. Il en résulte une résistance respiratoire plus faible à l'inspiration qu'à l'expiration.

Si le plongeur nage en position normale avec le recycleur sur sa poitrine et qu'il fait un tour sur lui-même (par exemple pour inspecter la coque d'un navire), cela modifie les conditions hydrostatiques du système qu'il forme avec son recycleur. Si le recycleur était auparavant sous le plongeur, il est désormais plus près de la surface de l'eau (toutes proportions gardées). Pour le plongeur, il est alors plus difficile d'inspirer et plus facile d'expirer. Les plongeurs qui utilisent pour la première fois un recycleur tactique à oxygène placé sur la poitrine trouvent parfois désagréable d'expirer face à une pression accrue.

À chaque fois qu'un plongeur utilise un appareil respiratoire, il fait face à une résistance respiratoire plus élevée et qui rend le travail respiratoire plus difficile. Lors de l'utilisation d'un recycleur, toute l'énergie nécessaire à la circulation du gaz dans les tuyaux, dans les différents raccords et dans le réservoir de chaux provient obligatoirement du plongeur lui-même. Cela signifie que la conception du recycleur, notamment la forme des voies d'air, le diamètre du tuyau de ventilation et le design de la cartouche d'absorption du CO₂, a une forte incidence sur le volume de travail respiratoire que doit effectuer le plongeur.



Avec un sac respiratoire porté sur la poitrine et une position normale de nage, il est plus difficile pour le plongeur d'expirer.

Lors du développement du LAR 8000, la priorité de Dräger était d'améliorer le confort respiratoire. Compte tenu de la plage d'applications actuelle de l'appareil, le volume de travail respiratoire nécessaire (en fonction de la profondeur) est jusqu'à 50 % moins élevé (à 20 mètres de profondeur) qu'avec les modèles précédents tels que le LAR 7000. Ce facteur est d'autant plus important que le recycleur est utilisé à des profondeurs plus grandes, en raison de l'utilisation alternative d'oxygène et d'azote.

En divisant par deux le volume de travail respiratoire du plongeur, le recycleur permet à celui-ci de consacrer davantage d'énergie à sa mission.

Dr. Tobias Dräger
Directeur général

Diving Consultant Group

Bibliographie :

Böhm F., Welslau W. (2004) : Physiologische Besonderheiten beim Tauchen. Extrait de : Handbuch Tauch- und Hyperbarmedizin. Landsberg/Lech : Ecomed Verlag. CEN TC 79 (2013) : Respiratory equipment – Self-contained re-breathing diving apparatus. Camporesi E.M., Bosco G. (2003) : Ventilation, gas exchange, and exercise under pressure. Extrait de : Brubakk A.O., Neuman T.S., eds. Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving, 5^e éd. Édinburgh, R.-U. : Saunders, 77–114. EHM (2003) : Tauchen noch sicherer (9. Aufl.), Cham : Müller Rüschiikon Verlags AG. Schmidt R.F., Thews G. (2000) : Physiologie des Menschen (28. Aufl.). Springer Verlag, Berlin ; Tammeling G.J., Quanjer P.H. (1980) : Physiologie der Atmung. Thoma, Frankfurt-sur-le-Main : pmi –pharm-und medical-information-Verlags-GmbH. Stegemann J. (1991) : Leistungsphysiologie, Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports (4. Aufl.), Stuttgart : Thieme. Tetzlaff K., Neubauer B., Buslaps C., Rummel B., Bettinghausen E. (1998) : Respiratory responses to exercise in Divers at 0.4 MPa ambient air pressure. Extrait de : Int. Arch. Occup. Environ. Health 71 : p. 472–478. Weineck J. (2000) : Sportbiologie, 7. Aufl. Balingen : Spitta-Verl ; Wenzel J. ; Muth C.M. (2002) : Physikalische und physiologische Grundlagen des Tauchens. Dt Z Sportmed 53 : p. 162–169.

Sources complémentaires :

Heather E. Held et David R. Pendergast (2013) : Relative effects of submersion and increased pressure on respiratory mechanics, work, and energy cost of breathing ; J. Appl. Physiol. 114 : p. 578–591. Lanphier E.H., Camporesi E.M. (1993) : Respiration and exertion. Extrait de : Bennnett P. et al. : The physiology and medicine of diving (4. Aufl.), Londres : Saunders. R. E. Moon, A. D. Cherry, B. W. Stolp, E. M. Camporesi (2009) : The Physiology and Pathophysiology of the Hyperbaric and Diving Environments Pulmonary gas exchange in diving ; J. Appl. Physiol. 106 : p. 668–677. Passmore M.A., Rickers G. (2002) : Drag levels and energy requirements on a SCUBA diver. Extrait de : Blackwell Science Ltd. Sports Engineering 5 : p. 173–182. Pendergast D.R., Tedesco M., Nawrocki M., Fisher N.M. (1996) : Energetics of underwater swimming with SCUBA. Extrait de : Med. Sci. Sports Exerc., vol. 28, n° 5 : p. 573–580. Tammeling G.J., Quanjer P.H. (1984) : Physiologie der Atmung II. Thoma, Frankfurt-sur-le-Main : pmi-pharm-und-medical-information-Verlags-GmbH. Tetzlaff K., Frieger L., Reuter M., Haber J., Mutzbauer T., Neubauer B. (1999) : Expiratory flow limitation in compresses air divers and oxygen divers. Extrait de : Eur. Respir. J. Oct ; 12(4) : p. 895–899. Tetzlaff K., Staschen C.M., Koch A., Heine L., Kampen J., Neubauer B. (1999) : Respiratory pattern after wet and dry chamber dives to 0.6 MPa ambient pressure in healthy males. Extrait de : Respir. Physiol. Dec. 1 ; 118(2–3) : p. 219–26. Warkander D.E., Nagasawa G.K., Lundgren C.E. (2001) : Effects of inspiratory and expiratory resistance in divers' breathing apparatus. Extrait de : Undersea Hyperb. Med., Summer ; 28(2) : p. 63–73.

Drägerwerk AG & Co. KGaA
Moislinger Allee 53–55
23558 Lübeck, Allemagne
Tél. : +49 451 882-0
Fax : +49 451 882-2080

www.draeger.com