



Plongée professionnelle et travaux en milieu hyperbare

Martin Rügger, Dominik Schwarb

suvapro

Le travail en sécurité

Suva

Division médecine du travail

Renseignements

Case postale, 6002 Lucerne

Tél. 041 419 58 51

Fax 041 419 62 05

arbeitsmedizin@suva.ch

Commandes

www.suva.ch/waswo-f

Tél. 041 419 58 51

Fax 041 419 59 17

Titre

Plongée professionnelle et travaux en milieu hyperbare

Auteurs

Dr Martin Rügger

Division médecine du travail, Suva Lucerne

Dr Dominik Schwarb

Division médecine du travail, Suva Lucerne

Illustration de couverture

Keystone

Reproduction autorisée, sauf à des fins commerciales, avec mention de la source.

1^{re} édition: janvier 2013

Référence

2869/08.f (disponible uniquement sous forme de fichier pdf)

Le modèle Suva

Les quatre piliers de la Suva

- La Suva est mieux qu'une assurance: elle regroupe la prévention, l'assurance et la réadaptation.
- La Suva est gérée par les partenaires sociaux. La composition équilibrée de son Conseil d'administration, constitué de représentants des employeurs, des travailleurs et de la Confédération, permet des solutions consensuelles et pragmatiques.
- Les excédents de recettes de la Suva sont restitués aux assurés sous la forme de primes plus basses.
- La Suva est financièrement autonome et ne perçoit aucune subvention de l'Etat.

Sommaire

Avant-propos	5
---------------------	----------

Introduction	6
---------------------	----------

A Rappels de physique

1. La pression atmosphérique	11
1.1. Unités de mesure	11
1.2. Les variations de pression sous l'eau	12
2. Relations entre la pression et le volume d'un gaz	12
2.1. Loi de Boyle-Mariotte	12
3. Comportement de la pression et du volume des composants d'un mélange gazeux	13
4. Solubilité des gaz dans les liquides	14

B Sources de danger

1. Plongée	19
1.1. Particularités du séjour sous l'eau	19
1.1.1. La poussée d'Archimède	19
1.1.2. Densité de l'eau	19
1.1.3. Densité accrue des gaz respiratoires	20
1.1.4. Réfraction de la lumière	20
1.1.5. Propagation des sons	20
1.1.6. Conductibilité thermique	20
1.2. La plongée en apnée	21
1.2.1. Hypoxie lors de la plongée en apnée	21
1.2.2. Œdème pulmonaire lors de la plongée en apnée	21
1.3. Nage et plongée à l'aide d'un tuba	22
1.4. Plongée avec casque	22
1.5. Plongée avec appareil respiratoire autonome de plongée (scaphandre autonome)	23
1.6. Plongée technique et plongée avec appareils à circuit fermé et avec mélanges de gaz	27
1.7. Plongée à saturation	29

2.	Le séjour dans les espaces remplis d'air comprimé	30
2.1.	La cloche à plongeurs	30
2.2.	Le caisson	30
2.3.	Le perçage de tunnels avec hydro-bouclier	31
2.4.	La construction en tranchée couverte	34
2.5.	Habitations subaquatiques	35
2.6.	Sas sous pression d'air	35

C Pathogénie et tableaux cliniques

1.	Conséquences d'une différence de pression sur les cavités aériques du corps	41
1.1.	Les barotraumatismes de la tête	42
1.1.1.	Barotraumatisme du conduit auditif externe	42
1.1.2.	Barotraumatisme de l'oreille moyenne	42
1.1.3.	Barotraumatisme de l'oreille moyenne avec lésion de l'oreille interne	44
1.1.4.	Barotraumatisme sinusal	44
1.1.5.	Barotraumatisme dentaire	44
1.2.	Barotraumatisme du système digestif	45
1.3.	Barotraumatisme cutané	45
1.4.	Barotraumatisme pulmonaire	45
1.4.1.	Barotraumatisme pulmonaire positif	45
1.4.2.	Barotraumatisme pulmonaire négatif	47
1.4.3.	Œdème pulmonaire des plongeurs et des nageurs	48

2.	Effet des gaz dissous dans l'organisme à une pression élevée	49
2.1.	Effets des gaz inertes	49
2.1.1.	Narcose à l'azote: l'ivresse des profondeurs	49
2.1.2.	Le syndrome nerveux des hautes pressions (SNHP)	50

3.	Effet des bulles de gaz dans le sang et les tissus: les accidents de décompression	50
3.1.	Formation des bulles de gaz dans le corps	50
3.1.1.	Absorption et libération de gaz par un liquide in vivo	50
3.1.2.	Sursaturation tolérée	51
3.1.3.	Formation des bulles de gaz	51
3.2.	Embolies gazeuses	52
3.2.1.	Embolies gazeuses artérielles	52
3.2.2.	Embolies gazeuses veineuses	52
3.3.	Persistance du foramen ovale	53
3.4.	Action locale des bulles de gaz dans les tissus	54
3.5.	Lésions dues aux bulles gazeuses (DCI, Décompression Illness)	55
3.6.	Les formes chroniques de maladie de décompression	56
3.6.1.	Ostéonécrose aseptique et déformations articulaires (maladie des caissons au sens strict)	56
3.7.	Lésions tardives après DCI	58
3.7.1.	Atteintes chroniques du système nerveux central et des organes sensoriels	58
3.7.2.	Troubles de l'appareil auditif et de l'oreille interne	58

4.	Effets des gaz irritants et toxiques	59
4.1.	L'oxyde d'azote	59
4.2.	Dioxyde de carbone (gaz carbonique)	59
4.3.	Monoxyde de carbone	60
4.4.	Augmentation de la pression partielle d'oxygène	61
4.4.1.	Effets sur les voies respiratoires et les poumons	61
4.4.2.	Effets sur le système nerveux central	61
4.4.3.	Les dangers de l'intoxication par l'oxygène	61
4.5.	Tolérance à l'oxygène: unité de dose pulmonaire toxique (UPTD)	62

5.	La mort en plongée	62
5.1.	Mort pendant ou immédiatement après la plongée	62

D **Prévention et traitement des accidents de plongée et de compression**

1.	Examens d'aptitude et de contrôle	67
-----------	--	-----------

2.	Formation	68
2.1.	Plongeurs sportifs	68
2.2.	Plongeurs professionnels	69
2.3.	Travailleurs en milieu hyperbare	69

3.	Tables de décompression	69
-----------	--------------------------------	-----------

4.	Équipement de plongée et planification de la plongée	72
4.1.	Tenues et accessoires	73
4.2.	Alimentation en air comprimé ou en gaz respiratoire	74
4.3.	Ordinateur de plongée	74

5.	Alerte et premiers secours en cas d'accidents de plongée et de surpression	76
-----------	---	-----------

6.	Traitement professionnel des accidents de plongée et de surpression	78
-----------	--	-----------

E **Droit des assurances**

1.	L'accident	83
-----------	-------------------	-----------

2.	Lésions corporelles assimilées à un accident	84
-----------	---	-----------

3.	La maladie professionnelle	84
-----------	-----------------------------------	-----------

4.	La négligence grave	85
-----------	----------------------------	-----------

5.	L'entreprise téméraire	85
-----------	-------------------------------	-----------

6.	Assurance des plongeurs sportifs	86
-----------	---	-----------

F **Informations complémentaires**

Avant-propos

C'est en 1985 que la Suva a publié, dans le cadre de sa série Médecine du travail, la première édition d'une brochure en deux parties intitulée «Maladies dues à des variations de la pression ambiante» et sous-titrée «Plongées subaquatiques, travaux en caissons, séjours en altitude, aéronautique». Rédigée par le Dr Hans Vogel, alors médecin du travail de la Suva, cette publication a connu un grand succès et a été réimprimée pour la dernière fois en 1992.

Nous vous présentons ici une nouvelle version de cette publication de la Suva, profondément remaniée afin de suivre l'évolution de la plongée sportive aussi bien que les dernières découvertes de la médecine hyperbare. Cette brochure ne traite plus des questions liées à la médecine d'altitude ainsi qu'à l'aéronautique et ne comporte plus d'études de cas de sorte qu'elle n'occupe désormais plus qu'un seul fascicule.

Il va de soi que les auteurs ont fait appel à des spécialistes et professionnels dans le domaine de la médecine de plongée et des milieux hyperbares. Ils remercient en particulier les docteurs Jürg Wendling (Bienne) et Christian Wölfel (Schwyz) pour leur révision critique du manuscrit, M. Markus Fuchs de la division prestations d'assurance de la Suva et ses collaborateurs pour leurs conseils en matière juridique, ainsi que MM. Robert Meier et Andreas Achermann (division sécurité au travail de la Suva Lucerne), Didier Girardin (division sécurité au travail de la Suva pour la Suisse romande, Lausanne), Franz Hattan (Hergiswil) et Ernst Voellm (Kilchberg) pour leur aide sur les questions techniques relatives à la plongée et à l'air comprimé.

De nombreuses illustrations et photographies ont également été mises à notre disposition. Nous remercions tous ceux qui nous les ont fournies. Les sources iconographiques sont indiquées dans les pages correspondantes.

Lucerne, printemps 2012

Les auteurs

Introduction

Si la plongée sportive fascine le plus grand nombre, elle ne doit pas faire oublier l'importance de la plongée professionnelle: travaux subaquatiques de construction, de montage et de recherche, sauvetages ou plongée offshore pratiquée pour la construction et l'entretien des plates-formes de forage à proximité des côtes.

Outre la plongée, il sera aussi question ici des travaux «au sec», effectués en surpression dans des tunneliers ou des caissons, qui exposent les ouvriers à une augmentation de la pression ambiante.

Séjourner dans et sous l'eau crée des dangers spécifiques que l'on ne rencontre nulle part ailleurs. Dans certaines circonstances, l'organisme humain peut souffrir de graves lésions si certaines règles ne sont pas respectées, notamment en raison de l'augmentation et de la diminution de la pression subies par le corps lors de la plongée et de la remontée, ainsi que des effets à long terme de cette pression.

Les contraintes physiques de la plongée et du travail en milieu hyperbare rendent donc nécessaire l'organisation régulière d'examen médicaux d'aptitude afin de prévenir les problèmes de santé.

La présente publication décrit les exigences posées à la médecine de plongée et des milieux hyperbares. Elle s'adresse principalement aux médecins susceptibles d'être confrontés à des accidents de plongée, que ce soit parce que leur lieu de travail est proche d'un cours d'eau, d'un lac ou d'une étendue d'eau, parce qu'ils sont consultés par des patients revenant de vacances de plongée et souffrant de troubles tardifs ou parce qu'ils doivent fournir des conseils en matière d'aptitude à la plongée.

Cet ouvrage est également destiné au personnel des caissons hyperbares thérapeutiques, aux responsables des entreprises de plongée et de construction exécutant des travaux en milieu hyperbare, mais aussi au profane intéressé par la question.

La Suva assure les salariés des entreprises qui lui sont affiliées en vertu de l'ordonnance sur l'assurance-accidents (OLAA) contre les accidents professionnels et non professionnels ainsi que contre les maladies professionnelles. De nombreux troubles de santé des plongeurs sont communément appelés «accidents de plongée», bien qu'il ne s'agisse pas d'accidents au sens de la législation en vigueur. Il est donc utile de préciser ce que l'on considère comme un accident ou une maladie professionnelle dans le cadre de la plongée ou des travaux en milieu hyperbare, et de signaler les lacunes éventuelles de l'assurance, qui doivent être couvertes en supplément de l'assurance de base en cas d'accidents.



A

Rappels de physique



1. La pression atmosphérique

Chaque point de la surface de la terre supporte le poids de l'air sus-jacent. Exprimé en force par unité de surface, ce poids correspond, du point de vue physique, à une pression.

1.1. Unités de mesure

L'unité de mesure de la pression est le pascal (Pa) qui équivaut à 1 N/m^2 . La pression au niveau de la mer est en moyenne de 101 325 Pa, soit 101,325 kPa. Autre unité utilisée couramment en pratique, le bar équivaut à 100 000 Pa. 1 mbar est donc égal à 100 Pa ou 1 hPa (hectopascal). La pression normale au niveau de la mer peut par conséquent être donnée comme étant de 1,013 bar ou 1013 mbar. On peut également rencontrer l'atmosphère (atm), une ancienne unité correspondant à 1 kp/cm^2 . Une atmosphère correspond à 1,013 bar ou 1013 mbar.

1 Pa	1 N/m ²		Unité de base
1 kPa	1000 Pa		unité dérivée
1 bar	100 000 Pa	= 100 kPa	unité dérivée
1 mbar	0,001 bar	= 100 Pa	unité dérivée
Pression normale	101 325 Pa	= 101,325 kPa	unité dérivée
	1013 bar	= 1013 mbar	unité dérivée

Tableau 1 Unités de pression courantes du système international (SI)

La pression atmosphérique diminue avec l'altitude. Son augmentation ou sa diminution n'est toutefois pas linéaire en raison de la compressibilité de l'air. Les variations météorologiques de la pression atmosphérique s'ajoutent aux effets de l'altitude, de sorte que la pression au niveau de la mer peut varier entre 92 et 107 kPa (920–1070 hPa). Pour simplifier, au-dessus du niveau de la mer, nous évoluons sous des pressions atmosphériques généralement inférieures à 1 bar.

1 at	1 kp/cm ²	98 100 Pa	0,981 bar
1 atm	1,033 kp/cm ²	101 325 Pa	1,013 bar
1 Torr	0,001359 kp/cm ²	133,322 Pa	0,001333 bar
1 kPa	0,0102 at	0,00987 atm	7,5 Torr
1 bar	1,02 at	0,987 atm	750 Torr

Tableau 2 Formules de conversion des unités de pression

Il est important de préciser que dans les professions techniques, c'est la surpression qui est indiquée en unités de mesure («pression manométrique ou effective»), tandis que la pression atmosphérique est définie comme le zéro. Les unités de pression doivent donc être maniées avec précaution.

1.2. Les variations de pression sous l'eau

Quand le corps est sous l'eau, il est soumis non seulement au poids de la colonne d'eau qui le surmonte, mais aussi à celui de l'atmosphère qui se trouve au-dessus. L'exemple de calcul suivant permet d'en comprendre les conséquences pour une profondeur de 10 mètres: chaque centimètre carré «supporte» une colonne d'eau de 10 m de hauteur, d'une masse d'environ 1 kg soit un poids de 1 kp/cm² ou 9,81 N/cm², 98 100 N/m², ou encore 98 100 Pa ou 0,981 bar. Ainsi, à 10 mètres de profondeur, la pression de l'eau est d'environ 1 bar. Il faut y ajouter la pression de l'air atmosphérique, qui est également d'environ 1 bar au niveau de la mer. La pression totale à la profondeur de 10 m supposée ici est donc d'environ 2 bars. A 20 m de profondeur, on aurait 2 + 1 = 3 bars de pression totale, et ainsi de suite. En raison de sa salinité, l'eau de mer est légèrement plus dense que l'eau douce. L'augmentation de la pression pour dix mètres de profondeur supplémentaires est donc légèrement supérieure, mais cette différence n'est pas importante pour notre propos.

2. Relations entre la pression et le volume d'un gaz

2.1. Loi de Boyle-Mariotte

La loi de Boyle-Mariotte (1703) dit que: à température constante, le produit de la pression (p) par le volume (V) d'une masse gazeuse donnée est une constante:

$$p \times V = \text{constante}$$

Par conséquent, si la pression exercée sur une telle masse double, son volume diminuera de moitié et si la pression diminue de moitié, c'est le volume de gaz qui doublera (fig. 1).

On sait par le principe de Pascal que la pression de l'eau s'exerce de façon égale et dans toutes les directions sur le corps humain et les organes qui le composent. Il en résulte que l'air renfermé dans le corps, par exemple dans l'intestin ou les poumons, est comprimé lorsque la pression extérieure augmente, et son volume diminue. Lorsque la pression baisse, il se dilate. Dans la mesure où le débit respiratoire du plongeur reste le même en profondeur, toutes conditions égales par ailleurs, il consommera davantage d'air en plongée, par exemple deux fois plus à 10 mètres de profondeur. Cela signifie donc qu'une quantité d'air donnée dure d'autant moins longtemps que l'on plonge profond.

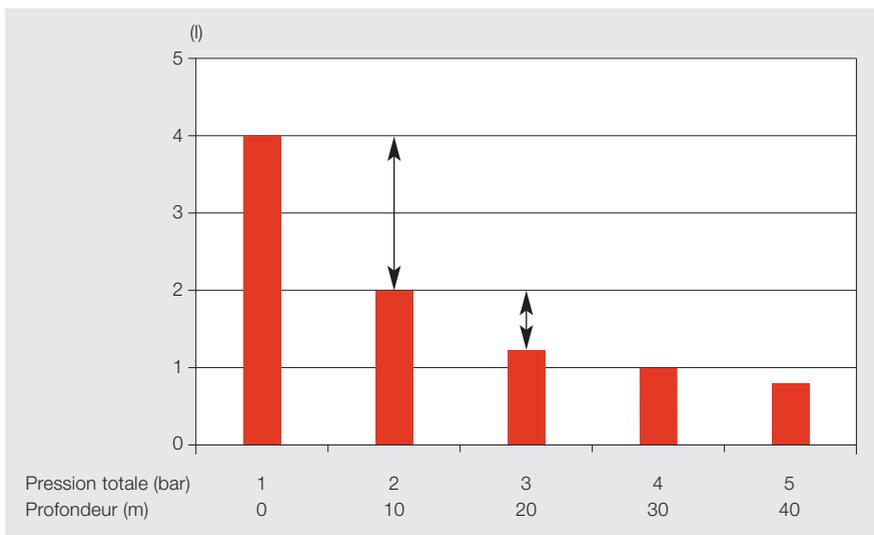


Figure 1 Relation entre profondeur, pression totale et volume gazeux (4 litres dans l'exemple). On notera que le changement de volume par unité de pression est inversement proportionnel à la profondeur.

3. Comportement de la pression et du volume des composants d'un mélange gazeux

Selon la loi de Dalton (1801), chaque composant d'un mélange gazeux exerce la même pression que celle qu'il produirait s'il occupait à lui seul tout le volume du mélange. La pression totale est donc égale à la somme des pressions partielles de tous les gaz du mélange. En d'autres termes, chaque composant d'un mélange participe à la pression totale en proportion du volume partiel qu'il occupe (fig. 2).

L'air atmosphérique sec a la composition suivante, en pourcentages du volume:

Azote	78,09
Oxygène	20,95
Argon	0,93
Gaz carbonique	0,03

Tableau 3 Composition de l'air atmosphérique (simplifiée)

A cela s'ajoutent des traces d'hydrogène, d'ozone et de gaz rares. Pour simplifier, on peut dire que l'air se compose de 21 % d'oxygène et 79 % d'azote.

Selon la loi de Dalton, la pression partielle de l'oxygène est de 21 kPa (0,21 bar) à la pression normale, de 42 kPa (0,42 bar) à 10 mètres de profondeur sous l'eau et de 126 kPa (1,26 bar) à 50 mètres sous l'eau.

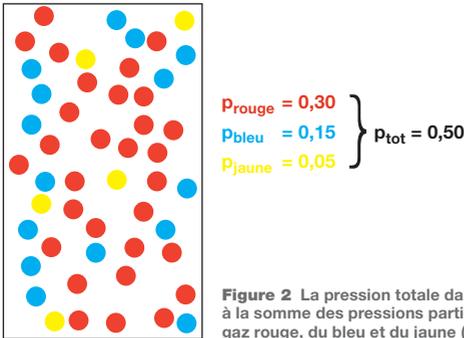


Figure 2 La pression totale dans un volume donné correspond à la somme des pressions partielles, en l'occurrence celles du gaz rouge, du bleu et du jaune (loi de Dalton).

En règle générale, l'activité biologique d'un gaz dépend de sa pression partielle, selon les propriétés physiques considérées, telles que la solubilité ou la vitesse de diffusion.

4. Solubilité des gaz dans les liquides

La loi de Henry (1803) peut être formulée ainsi, pour simplifier: la concentration gazeuse C (molaire) d'un gaz X dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle p qu'exerce ce gaz sur le liquide et à une constante de solubilité α (fig. 3):

$$C_x = p_x \times \alpha_x$$

La constante de solubilité varie selon le gaz et le liquide mis en contact; elle diminue lorsque la température augmente.

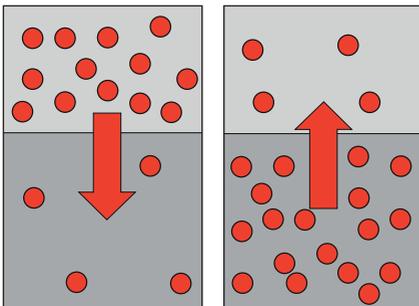


Figure 3 Solubilité d'un gaz dans un liquide en fonction de la pression partielle (loi de Henry)

Il faut un certain temps pour que la quantité de gaz prévue par cette équation soit entièrement dissoute dans le liquide, autrement dit qu'un équilibre s'établisse entre la pression de ce gaz au-dessus du liquide et dans le liquide. Si la pression baisse, les molécules de gaz qui s'échappent du liquide sont plus nombreuses que celles qui sont absorbées par celui-ci. Des bulles se forment lorsqu'une sursaturation critique est atteinte. Tous les gaz inertes ont une action narcotique, qui dépend de leur pression partielle et de leur poids moléculaire, et qui est fortement influencée par la différence de solubilité dans les graisses et dans l'eau. Le rapport entre ces deux coefficients (graisse-eau) est donc une mesure importante du pouvoir narcotique. Il est nettement plus élevé, par exemple, pour le xénon que pour l'hélium, l'hydrogène et l'azote, comme le montre le tableau 4. Il n'est donc pas utilisé pour la plongée, contrairement à ces trois derniers gaz.

Gaz	Poids moléculaire	Coefficient graisse/eau	Pouvoir narcotique
Hydrogène	2,016	3,2	0,46
Hélium	4,003	1,8	0,235
Azote	28,013	5,3	1,0
Xénon	131,29	20 (-)	25,6

Tableau 4 Différences de solubilité de l'hydrogène, de l'hélium, de l'azote et du xénon dans l'eau et les graisses.



B Sources de danger



1. Plongée

1.1. Particularités du séjour sous l'eau

L'être humain qui s'immerge dans l'eau se retrouve dans un milieu qui lui est devenu étranger au fil de son évolution et dans lequel il ne peut survivre plus de quelques minutes sans un équipement adapté. Lorsque l'on entre dans l'eau pour une plongée, il faut composer avec les conditions suivantes:

1.1.1. La poussée d'Archimède

En vertu du principe d'Archimède, le corps est allégé d'un poids égal à celui du volume de l'eau qu'il déplace. Si sa densité est inférieure à celle de l'eau, il flotte en surface; si elle est supérieure, il coule. La présence d'air dans différentes cavités, en particulier dans les poumons, a pour effet que la densité moyenne du corps humain est légèrement inférieure à celle de l'eau. Le corps flotte donc normalement sur l'eau, mais il dépasse si peu la surface que les orifices respiratoires se trouvent quand même immergés. Cela explique que les personnes qui ne savent pas nager se noient, tandis que les mouvements de nage font remonter le corps au-dessus de la surface de l'eau de façon à faire émerger la bouche et le nez pour permettre la respiration. Pour plonger sous la surface de l'eau, un individu a besoin de lest pour compenser la poussée d'Archimède. S'il n'y a pas apport artificiel d'air, le thorax est comprimé par l'augmentation de la pression ambiante, ce qui entraîne une hausse de la densité moyenne du corps jusqu'au point où la poussée d'Archimède qui prévaut à la surface est annulée et le corps tend de plus en plus à s'enfoncer. En l'absence d'un dispositif de stabilisation adapté, le plongeur coulerait de plus en plus vite et ne pourrait plus remonter à la surface par ses propres moyens. La poussée d'Archimède peut aussi être une cause d'accident, par exemple si de l'air est introduit de façon incontrôlée dans le gilet stabilisateur (fig. 20, p. 73) ou le scaphandre ou si un sac de flottaison est gonflé sous l'eau de façon incorrecte.

1.1.2. Densité de l'eau

L'eau est nettement plus dense que l'air. Elle oppose donc beaucoup plus de résistance aux mouvements du plongeur, avec pour conséquence une augmentation de l'effort physique et de la consommation d'oxygène par rapport à une activité comparable à l'air libre. Cette résistance accrue a également pour conséquence que le plongeur résiste plus difficilement aux déplacements de masses importants, par exemple aux courants marins ascendants ou descendants, ce qui peut être dangereux, en particulier pour les débutants.

1.1.3. Densité accrue des gaz respiratoires

Lorsque la pression augmente, et avec elle la densité des gaz, des turbulences se produisent même à petite vitesse d'écoulement, et les résistances à l'écoulement dans les voies respiratoires s'accroissent, de sorte que l'effort nécessaire pour respirer est plus important.

1.1.4. Réfraction de la lumière

La lumière pénétrant dans l'eau est réfractée par rapport à la verticale et absorbée plus fortement que dans l'air. L'indice de réfraction dépend, entre autres, de la longueur d'ondes: il est plus élevé pour la lumière bleue, à ondes courtes, que pour la lumière rouge à ondes plus longues. La lumière bleue pénètre donc plus profondément dans l'eau. La lumière est de plus en plus fortement absorbée en profondeur: l'environnement devient de plus en plus bleu avant de s'obscurcir complètement. L'indice de réfraction de l'œil humain est adapté à la vision dans l'air. De ce fait, les objets paraissent 30 % plus grands et 25 % plus proches dans l'eau que dans l'air. Au contact direct de l'eau, la vision est floue; il faut donc utiliser des lunettes de plongée, qui créent un espace rempli d'air entre l'eau et l'œil.

1.1.5. Propagation des sons

Les sons se propagent quatre fois plus vite dans l'eau que dans l'air. Ils paraissent donc étonnamment forts dans l'eau et il est difficile de localiser les sources sonores. Les travaux sous-marins bruyants présentent donc un risque de lésions auditives plus important que dans l'air, ce qui constitue surtout un problème pour les plongeurs professionnels.

1.1.6. Conductibilité thermique

Selon la température, l'eau conduit vingt-cinq fois mieux la chaleur que l'air. La déperdition de chaleur du corps est donc très importante dans l'eau froide. Lors de plongées de relativement longue durée, le corps doit donc être protégé par un habit de plongée. Dans les combinaisons non étanches, dites «humides», cette protection est assurée par les bulles d'air de la mousse de néoprène et par une couche d'eau non-renouvelée entre le corps et la combinaison. Quand la pression comprime les bulles d'air, l'effet isolant diminue tout comme la poussée d'Archimède. Dans une combinaison étanche, la fonction isolante est assurée par une couche d'air entre la tenue et le corps, dont le volume peut être ajusté par le plongeur. On peut en outre porter un sous-vêtement isolant sous le scaphandre. Il existe même des scaphandres spécialement adaptés aux conditions extrêmes, qui peuvent être chauffés par circulation d'eau chaude. Dans ces situations, il faut également veiller à chauffer suffisamment l'air inspiré, faute de quoi le corps se refroidirait rapidement.

1.2. La plongée en apnée

La manière la plus simple et la plus répandue de plonger consiste à retenir sa respiration (apnée). Aujourd'hui encore, les pêcheurs d'éponges et de perles pratiquent cette méthode. L'apnée est également devenue depuis peu une discipline à part entière de la plongée sportive.

1.2.1. Hypoxie lors de la plongée en apnée

Lors de la plongée profonde en apnée, la pression augmente dans les poumons, et avec elle la pression partielle de l'oxygène: la réserve de ce gaz dure ainsi plus longtemps. A la remontée, la pression partielle d'oxygène baisse nettement en dessous de sa valeur de départ et il peut se produire une hypoxie avec perte de connaissance. Le plongeur parvient bien à la surface, mais il s'enfonce aussitôt et se noie s'il n'est pas immédiatement secouru. Cet accident porte le nom de syncope anoxique à la remontée (deep water blackout).

Avant une plongée en apnée en eau peu profonde, les plongeurs hyperventilent souvent pendant quelques cycles respiratoires. Bien qu'elle n'apporte qu'une augmentation minime de la saturation du sang en oxygène, cette préparation fait considérablement baisser le taux de gaz carbonique. Le temps que celui-ci met à remonter à une valeur qui excite le centre respiratoire et qui force ainsi le plongeur à sortir pour prendre l'air est donc prolongé. Plus l'hyperventilation avant plongée est longue, et plus l'excitation du centre respiratoire est ainsi retardée, plus le risque est grand qu'une syncope par hypoxie se produise avant que le seuil de stimulation par le CO₂ ne soit atteint. On parle alors de syncope anoxique en eau peu profonde (shallow water blackout).

Les plongeurs en apnée professionnels et de compétition doivent être non seulement bien préparés, mais aussi bien prémunis contre ce risque.

1.2.2. Œdème pulmonaire lors de la plongée en apnée

Quand la pression de l'eau comprime le thorax à un point tel que les poumons se rapprochent de leur volume résiduel, il se produit un déplacement thoracique marqué du diaphragme vers le haut, ce qui diminue le volume intrathoracique. Lorsque la limite de compressibilité du thorax est atteinte, la pression intrathoracique devient inférieure à celle qui règne ailleurs dans le corps. Le retour du sang vers la cavité thoracique augmente alors et le plasma sanguin finit par s'échapper des capillaires pour passer dans les alvéoles, provoquant un œdème pulmonaire. La profondeur et la durée maximale possible de l'apnée constituent donc des facteurs qui limitent cette pratique. Seuls les plongeurs utilisant des techniques particulières et ayant suivi un entraînement long et intensif sont en mesure de les dépasser. Dans ces conditions, il arrive aujourd'hui que l'on observe des accidents de décompression qui étaient jusque-là inconnus chez les apnéistes.

1.3. Nage et plongée à l'aide d'un tuba

Le tuba permet de nager sur le ventre, la tête dans l'eau, sans retenir sa respiration. Les plongeurs qui se servent d'un appareil s'enfoncent d'une dizaine de centimètres dans l'eau. Ils ont eux aussi par conséquent besoin d'un tuba pour nager à la surface sans trop d'effort.

Ceci étant dit, le tuba ne fonctionne, par principe, qu'à la surface de l'eau. Il ne doit pas être utilisé pour plonger car il augmente l'espace mort des voies respiratoires et nécessite un effort de respiration nettement plus important. Dès cinquante centimètres de profondeur, les muscles inspiratoires n'ont plus la force de surmonter la pression de l'eau agissant sur le thorax. C'est pourquoi un tuba ne doit pas mesurer plus de 35 centimètres de long ni être utilisé pour autre chose que la nage avec le visage dans l'eau.

1.4. Plongée avec casque

Les anciens scaphandres à casque (fig. 4) se composent d'un casque en laiton ou en cuivre équipé de hublots, étanche et monté sur une combinaison elle aussi étanche (sèche) munie d'un plastron spécial. L'air est envoyé par un tuyau dans le casque, au moyen d'une pompe située en surface, et le plongeur peut ensuite le laisser s'échapper dans l'eau à chaque expiration, au moyen d'une soupape. Le scaphandre est stabilisé avec des masses de plomb, en particulier au niveau de la poitrine, et le scaphandrier doit porter des semelles de plomb afin de pouvoir se déplacer debout dans l'eau.

Les scaphandres à casque modernes (fig. 6, p. 26/27) sont pourvus d'un casque en plastique plus léger, avec hublot, dans lequel est généralement intégré un masque respiratoire avec détendeur. Le masque intégral souple est conçu selon le même principe. Les casques modernes sont également fixés de façon étanche sur la combinaison sèche. Le lest reste indispensable, notamment pour que le scaphandrier puisse travailler dans une position confortable. Au lieu de chaussures de plomb, on utilise des chaussons ou des palmes, qui permettent au plongeur de se déplacer plus librement et éventuellement de nager. Les masses de plomb peuvent cependant exercer des contraintes sur le squelette, selon le travail effectué, et nécessitent des adaptations ergonomiques.

Les scaphandres à casque modernes sont équipés, entre autres, d'une liaison téléphonique avec la surface, éventuellement d'une caméra de surveillance montée sur le casque, ainsi que d'une réserve d'air permettant une remontée sans danger en cas de perte de l'alimentation par la surface.



Figure 4 Scaphandre à casque ancien: casque en cuivre avec plastron muni d'un poids en plomb (flèche). Alimentation en air par un tuyau partant de la surface.

Ill.: H. Gerber

1.5. Plongée avec appareil respiratoire autonome de plongée (scaphandre autonome)

Mis au point principalement par les Français Commehines, Gagnan et Cousteau (le célèbre «commandant»), l'appareil respiratoire autonome de plongée a rendu possible la plongée avec une réserve d'air en bouteilles,

sans liaison avec la surface par un tuyau, et ainsi à de plus grandes profondeurs. Avec l'apparition de «l'homme-grenouille», la plongée sportive s'est rapidement développée dans le monde entier (fig. 7a, p. 28). Cette méthode reste cependant peu utilisée par les professionnels, en raison de ses risques inhérents.

Sur le principe, l'appareil respiratoire autonome (fig. 5a, b), aussi appelé scuba («self-contained underwater breathing apparatus») en raison de son développement aux Etats-Unis, se compose d'un détendeur qui adapte automatiquement la pression de l'air respiratoire transporté dans une bouteille à la pression ambiante de l'eau. Une membrane séparant l'eau de l'air ouvre la soupape d'admission d'air dès que la pression du côté eau dépasse celle du côté air, ce qui se produit aussi bien lorsque le plongeur descend plus bas que lorsqu'il inspire. Une soupape d'échappement laisse l'air sortir dans l'eau quand il est à une pression supérieure à celle de l'eau.

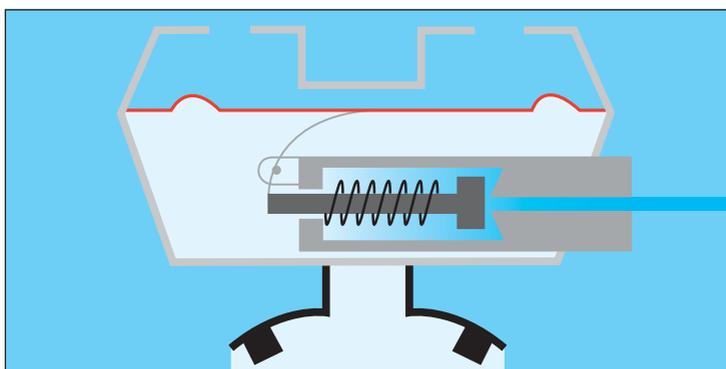


Figure 5a Coupe très simplifiée d'un détendeur de deuxième étage. En inspirant par l'embouchure (noire), le plongeur fait baisser la pression à l'intérieur du détendeur et aspire la membrane vers l'intérieur. Le levier relié à celle-ci ouvre une soupape qui laisse entrer le gaz respiratoire (bleu foncé) jusqu'à ce que la pression intérieure et la pression de l'eau à l'extérieur s'équilibrent. L'air expiré part directement dans l'eau par une autre soupape (non représentée ici).

Figure 5b Exemple de détendeur moderne (deuxième étage). Arrivée de gaz respiratoire par un tuyau (raccord indiqué par la flèche bleu foncé). Ouverture d'expiration dans le bas de l'appareil, du côté opposé (flèche bleu clair), embouchure sur l'arrière. Ill.: société Scubapro

Comme la pression dans les bouteilles est normalement très supérieure à la pression ambiante, qui varie selon la profondeur, on a besoin de deux étages de réduction de la pression. On parle donc de détendeur à deux étages, le premier étage servant à réduire la pression des bouteilles à une pression intermédiaire, supérieure d'environ 8 bars à la pression ambiante. Ce premier étage est monté directement sur l'ouverture de la bouteille. Le deuxième étage réduit encore cette pression intermédiaire, de façon à délivrer le gaz à la pression exacte de l'eau à cette profondeur. Il est intégré dans l'embouchure, devant le visage. Par rapport au détendeur à un seul étage, tombé aujourd'hui en désuétude, ce système a l'avantage qu'une faible pression négative (pression de déclenchement) suffit pour que la soupape de l'embouchure s'ouvre, ce qui facilite considérablement la respiration. En revanche, l'air expiré sort directement au niveau de la bouche et un déflecteur est nécessaire pour repousser les bulles, afin que celles-ci ne gênent pas trop la vision.

L'expansion de l'air comprimé, notamment après le premier étage de détente, peut provoquer un fort refroidissement des soupapes, qui se bloquent dans une position plus ou moins ouverte: on parle alors de givrage du détendeur. La circulation de l'air devient bruyante et l'embouchure peut être arrachée de la bouche du plongeur et battre dans tous les sens. La réserve d'air s'échappe en quelques minutes, ce qui peut faire paniquer les plongeurs peu expérimentés. L'encrassement et la rouille peuvent aussi compromettre le bon fonctionnement du détendeur. Afin d'éviter ces incidents (et d'autres), les plongeurs emportent en règle générale deux détendeurs indépendants l'un de l'autre (détendeur de sécurité ou octopus). En prévision de ces situations, tous les plongeurs apprennent aussi à respirer à deux sur le même détendeur, qu'ils se font passer l'un à l'autre (respiration alternée). On peut chasser l'eau qui pénètre dans l'embouchure en appuyant sur la membrane et en soufflant.

La plongée en scaphandre autonome se pratique habituellement avec de l'air comprimé. Depuis une dizaine d'années, on voit apparaître de l'air enrichi en oxygène, appelé «nitrox» ou encore OEA (oxygen enriched air) ou EAN (enriched air nitrox). Ce mélange s'est imposé dans de nombreux endroits pour la plongée professionnelle. On parle ainsi de Nitrox 32 pour désigner un mélange contenant 32 % d'oxygène, au lieu des 21 % de l'air atmosphérique. Le Nitrox 40 contient donc 40 % d'oxygène et 60 % d'azote, et ainsi de suite. Par rapport à l'air comprimé, le nitrox a l'avantage que le corps absorbe moins d'azote à une profondeur donnée que lors d'une plongée à l'air comprimé. Le risque d'accident de décompression est ainsi diminué, notamment si l'on respecte les règles de décompression applicables à l'air ordinaire (voir le chapitre C 3).



Figure 6a Plongeur professionnel équipé pour les travaux de construction et de montage sous l'eau, avec une solide tenue de plongée étanche et un casque en composite de fibres de verre ou de carbone avec masque respiratoire intégré, téléphone et lampe. Alimentation depuis la surface par un tuyau (flèche). Nécessité du personnel auxiliaire.

Ill.: Inspection du travail autrichienne



Figure 6b Travaux de soudage par plongeurs professionnels. Toutes les techniques de construction et de soudage utilisées sur la terre ferme, ou presque, sont aussi utilisables sous l'eau.

Ill.: Commercial Diving Academy, Jacksonville (Floride, Etats-Unis)



Figure 6c Batardeau en acier pour la coulée du béton d'une fondation de pile de pont. Descente d'un plongeur pour fixer les fers d'armature à poser sous l'eau. Le plongeur est alimenté en air depuis la surface par un tuyau. Il porte une réserve de gaz de secours sur le dos.

Ill.: Société Pro DS, Hergiswil

1.6. Plongée technique et plongée avec appareils à circuit fermé et avec mélanges de gaz

La plongée technique est un développement de la plongée avec bouteilles décrite ci-dessus. Elle prend son origine dans la plongée professionnelle à grande profondeur (voir le chapitre 1.7.). Au lieu d'air, on utilise un ou plusieurs mélanges de gaz respiratoires, parfois transportés dans des bouteilles séparées, de façon à pouvoir passer d'un mélange à l'autre en

fonction de la profondeur. Les mélanges utilisés sont l'héliox et surtout le trimix. L'héliox est un mélange d'oxygène et d'hélium contenant 21 % d'oxygène, tandis que le trimix contient, en plus de ce mélange, une proportion d'azote qui varie selon la profondeur visée. On peut ainsi atteindre des profondeurs plus importantes qu'avec l'air. L'équipement de plongée technique est plus complexe, plus volumineux et d'un maniement plus difficile que celui de la plongée classique. Cette pratique doit donc être réservée aux plongeurs expérimentés et spécialement formés (fig. 7b). La plongée technique peut faire appel à des appareils dits à circuit fermé, également appelés recycleurs, qui sont aussi utilisés dans d'autres situations. Dans ces appareils, le gaz expiré est passé à travers un absorbeur à la chaux qui retient le gaz carbonique. L'air respiratoire ainsi épuré est stocké dans un réservoir intégré à l'appareil, une sorte de poumon extérieur, dans lequel la quantité d'oxygène consommée est remplacée. Le gaz retraité peut ensuite être à nouveau respiré à partir du réservoir.



Figure 7a Plongeurs sportifs équipés du matériel de plongée sous-marine habituel. Le deuxième étage du détendeur est visible devant leur bouche. La cagoule et même la tenue à manches et jambes longues ne sont pas indispensables pour les plongées dans les eaux chaudes.

Ill.: age photostock

Le recycleur ne produit pas de bulles à l'expiration. Il est donc utile pour observer et photographier la faune et la flore aquatiques, mais aussi pour les opérations militaires. Les recycleurs possèdent une régulation précise de l'arrivée de gaz frais, généralement assurée aujourd'hui par des moyens électroniques. Les défauts de fonctionnement et les erreurs de manipulation de ces appareils peuvent être dangereux. La pression partielle d'oxygène du gaz respiratoire doit donc être surveillée par au moins deux systèmes indépendants, intégrés dans le recycleur.



Figure 7b Plongeurs techniques: les différents gaz respiratoires doivent être emportés dans des bouteilles pressurisées séparées. Différents appareils d'affichage, de surveillance et de réserve sont également nécessaires. *Ill.: iq images*

1.7. Plongée à saturation

Plus la pression de dissolution des gaz dans les fluides et les tissus du corps est élevée et son action prolongée, plus le temps de décompression doit être long afin d'éviter la formation de bulles: il est par exemple de quelques jours pour les plongées à plus de 150 mètres, dans le cas de gisements de pétrole sous-marins. Afin de raccourcir autant que possible le temps improductif de la décompression (par rapport au temps de travail effectif), les plongeurs des plates-formes de forage restent pendant plusieurs semaines en milieu hyperbare. Ils descendent en profondeur à bord d'une cloche à plongeurs. Parvenus au but, ils sortent de celle-ci pour travailler pendant plusieurs heures sous l'eau, alimentés en air par un tuyau qui les relie à la cloche. Ils réintègrent ensuite la cloche qui est remontée sur la plate-forme, et sont accueillis dans une chambre de séjour hyperbare. Quelle que soit la durée de la plongée, leurs fluides corporels restent saturés de gaz pendant tout ce temps. La décompression n'a lieu qu'à la fin de la période de travail, qui peut durer jusqu'à deux semaines. Les plongeurs peuvent ainsi vivre pendant un mois en milieu hyperbare (voir le chapitre B 2.5.).

2. Le séjour dans les espaces remplis d'air comprimé

2.1. La cloche à plongeurs

Sur le principe, la cloche à plongeurs est un conteneur ouvert vers le bas et lesté, dans lequel l'air reste emprisonné pendant la descente dans l'eau. Elle peut être descendue dans l'eau depuis un navire, qui l'alimente ensuite en air par un tuyau. L'introduction d'un supplément d'air permet d'adapter la pression de la cloche à la pression ambiante de l'eau et de maintenir ainsi l'intérieur au sec. La cloche à plongeurs constitue une station intermédiaire entre le poste de travail en plongée et le navire. Son utilisation nécessite une équipe disposant du matériel nécessaire.

2.2. Le caisson

Un caisson est également un conteneur ouvert vers le bas, généralement en acier ou en béton armé, qui est descendu jusqu'au fond et fonctionne selon le même principe qu'une cloche à plongeurs (fig. 8). L'eau est refoulée du caisson par de l'air comprimé injecté par des pompes. Un tube étanche relie le toit du caisson à un sas situé hors de l'eau. Les travailleurs parviennent dans le caisson en passant par le sas puis par le tube. Une fois parvenus au fond, ils se servent de pelles, de dragues et au besoin d'explosifs pour creuser. Les déblais sont évacués à l'extérieur par un sas à matériaux. Le caisson s'enfonce à mesure que l'excavation

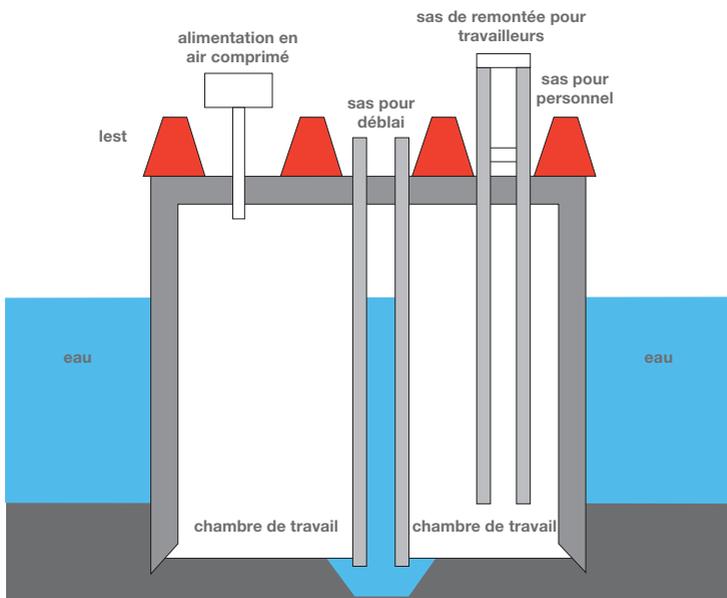


Figure 8 Schéma d'un caisson: la chambre de travail ouverte en dessous et accessible par le sas de descente est remplie d'air comprimé qui empêche l'eau d'y pénétrer. Les déblais de l'excavation sont évacués par un autre sas. De lourdes masses de lest (en rouge) empêchent le caisson de basculer.

Ill.: d'après Wikipédia

du fond progresse, jusqu'à la position souhaitée. Comme la pression de l'eau augmente avec la profondeur, il faut augmenter dans les mêmes proportions la pression de l'air dans le caisson afin que l'eau ne puisse pas y pénétrer.

Afin de garantir sa stabilité, le caisson doit être suffisamment lourd pour ne pas être soulevé et renversé par la poussée d'Archimède.

On utilise des caissons pour les travaux sous eau, notamment pour construire des fondations de piles de pont, des installations portuaires ou des ouvrages hydroélectriques, etc.

2.3. Le perçage de tunnels avec hydro-bouclier

La plupart des tunnels sont aujourd'hui percés par des machines et non plus à l'explosif. On utilise pour cela des tunneliers munis d'une tête d'abattage, qui peut attaquer en une fois toute la section du tunnel, même dans les terrains meubles et instables. Le tunnelier est suivi d'un train composé de nombreux systèmes assurant l'évacuation des déblais vers le portail du tunnel et la mise en place d'éléments de soutènement (voussoirs) qui empêchent l'affaissement des parois du tunnel et la pénétration éventuelle d'eau, en particulier pendant la traversée de couches meubles.

La partie avant du tunnel, encore dépourvue de soutènement, est stabilisée par un bouclier: un tube d'acier pouvant être déplacé dans l'axe du tunnel par des vérins hydrauliques, dont la section est la même que celle du tunnel et qui est ouvert vers la face d'abattage et vers le portail.

Si le tunnelier passe dans une couche où circulent des eaux souterraines, le bouclier est muni d'une cloison en acier étanche du côté du portail. Le côté opposé, tourné vers le front de taille et contenant la roue d'abattage, est pressurisé à l'air comprimé à la même pression que les eaux souterraines au fond du tunnel pour empêcher la pénétration de celles-ci tout en prévenant l'éboulement de matière meuble sur le front de taille.

Afin que l'air comprimé ne s'échappe pas de façon incontrôlée dans le sol à travers les fissures, la zone d'abattage est partiellement remplie de bentonite, de façon à laisser seulement un coussin d'air comprimé dans la partie supérieure du tunnel à percer. La bentonite est une suspension d'argile fine dans laquelle la roue d'abattage avance. Le front de taille et les parties de la paroi qui ne sont pas recouvertes par le bouclier sont ainsi tapissés de bentonite qui empêche l'air de passer. Les déblais sont mélangés à la bentonite et pompés avec celle-ci vers l'arrière, hors de la zone sous pression, traités puis renvoyés à la zone d'abattage (fig. 9a et 9b).

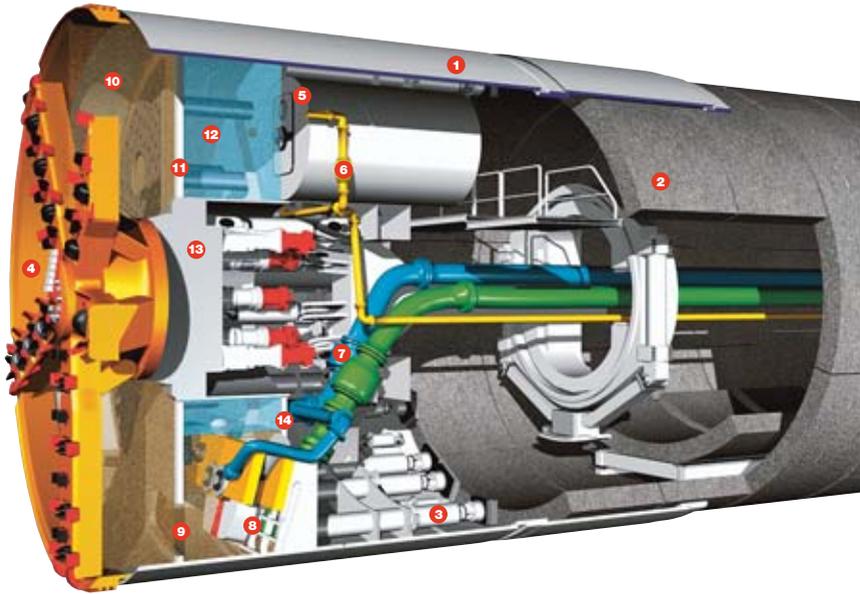


Figure 9a Tunnelier avançant avec un hydro-bouclier

1 bouclier | 2 voussier (stabilisation de l'excavation) | 3 vérins d'avancement | 4 roue de taille avec outils d'abattage | 5 sas à personnel | 6 alimentation en air comprimé | 7 circuit de coulis | 8 concasseur avec grilles d'aspiration | 9 ouverture dans la cloison plongeante | 10 coulis dans l'espace d'abattage (en marron) | 11 cloison plongeante | 12 coussin d'air comprimé (en bleu clair) derrière la cloison plongeante | 13 entraînement principal (roue d'abattage) | 14 cloison étanche



Figure 9b Vue de l'avant en direction de la roue d'abattage, avec le bouclier (peint en blanc) et derrière celui-ci le train suiveur (sous le derrière celui-ci) contenant les installations de la machine et le matériel de tubage du tunnel.

Ill.: Société Herrenknecht AG, Schwanaue, Allemagne

Bien que l'excavation se déroule automatiquement, il faut accéder régulièrement à l'espace d'abattage pour les travaux d'entretien ou de dépannage. Pour ces interventions spéciales, on abaisse le niveau de la bentonite tout en maintenant la suppression, de façon à pouvoir accéder à l'espace d'abattage en passant par un sas au sommet du tunnel (fig. 9c). Alors que le travail en caisson nécessite des séjours réguliers et généralement prolongés en milieu hyperbare, les ouvriers travaillant sur les tunneliers avec hydro-bouclier ne sont soumis à de telles conditions de travail que lors des interventions dites spéciales.

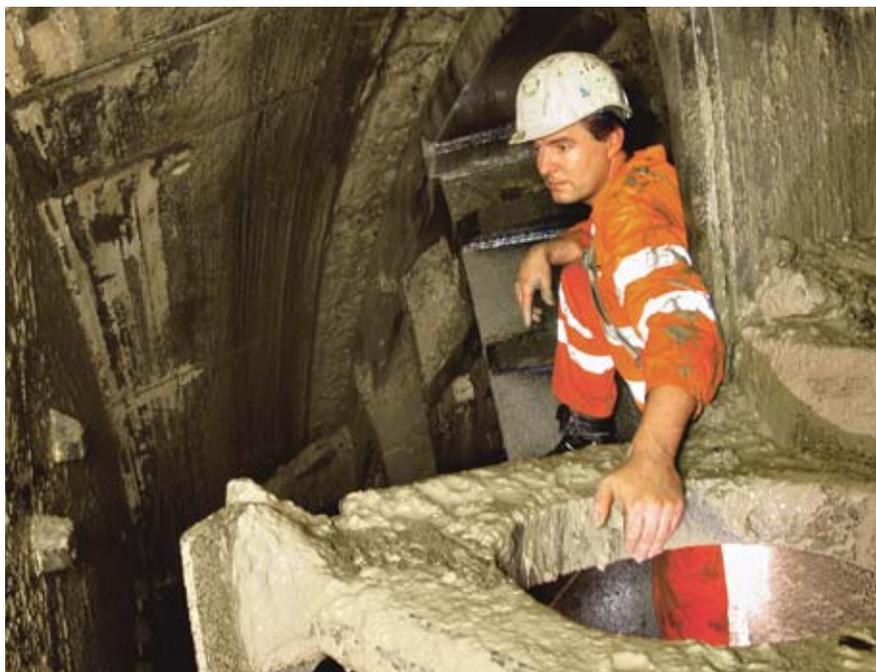


Figure 9c Une fois le niveau de la bentonite abaissé, on peut inspecter la roue d'abattage, sous une pression d'air pouvant atteindre 2,5 bars.

Ill.: PraderLosinger SA

2.4. La construction en tranchée couverte

L'utilisation d'un tunnelier est moins adaptée à la réalisation d'ouvrages étendus, à faible profondeur et dans un terrain meuble, par exemple pour l'enfouissement de voies de circulation. Il est alors possible de recourir à la construction dite en tranchée couverte. Selon cette méthode, des rideaux (parois latérales) sont enfoncés dans le sol sur le trajet prévu puis recouverts d'un toit en béton, tandis que le fond du boyau ainsi formé reste ouvert. Le substrat parcouru par les eaux souterraines est ensuite excavé, puis la dalle de fond en béton est coulée. Le tunnel doit pour cela être fermé de manière étanche à ses deux extrémités et placé en surpression. L'intérieur n'est donc plus accessible, pour abattre et extraire le substrat, qu'en passant par des sas. En raison de la profondeur assez faible de ces ouvrages, la surpression est relativement modérée. Elle affecte cependant un très grand volume, et le personnel lui est exposé pendant tout son temps de travail (fig. 10).

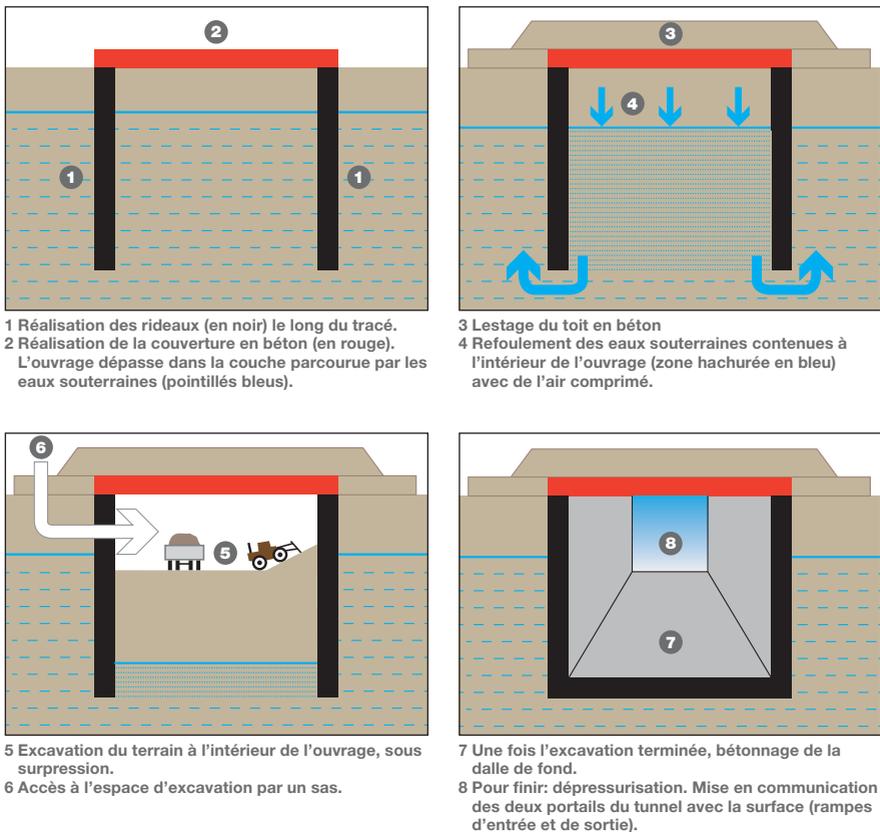


Figure 10 Construction en tranchée couverte (vue schématique de profil).

Ill.: d'après A. Walther, Starnberg, Allemagne

2.5. Habitations subaquatiques

Certains travaux de plongée et sous haute pression de longue durée ne sont possibles qu'avec la technique de saturation (voir le chapitre B 1.7 «Plongée à saturation»). Pendant toute la durée de leur intervention, les plongeurs résident dans ce que l'on appelle un habitat, autrement dit un ensemble de locaux fermés, accessible uniquement par des sas, qui peut être installé sur le pont d'un navire comme un caisson hyperbare, ou encore sur un chantier. Ces systèmes de chambres hyperbares nécessitent une commande et une régulation précises de la surpression et des conditions climatiques. On y utilise des mélanges artificiels de gaz, contenant principalement de l'hélium parce que l'oxygène et surtout l'azote dans leurs proportions naturelles, autrement dit le mélange qui compose l'air, sont toxiques voire mortels lorsque la pression dépasse 5 bars. La décompression, qui ramène progressivement l'habitat à la pression atmosphérique normale et à la composition habituelle de l'air, peut prendre plusieurs heures, voire plusieurs jours. Les habitats sont parfois utilisés sous l'eau dans des projets de biologie océanique de longue durée, mais seulement entre 5 et 15 mètres de profondeur.

2.6. Sas sous pression d'air

Pour entrer ou sortir d'un milieu hyperbare (fig. 11), il faut passer par une chambre ou un sas sous pression spécialement conçu. Pendant la compression et la décompression, contrôlées de l'extérieur, les travailleurs doivent régulièrement équilibrer la pression dans leurs sinus et leurs oreilles internes. Une fois la pression de travail atteinte, la porte donnant sur la chambre de travail est ouverte.



Figure 11 Décompression avec oxygénation dans le sas du personnel d'un tunnelier.

Ill.: PraderLosinger SA

Pour sortir, l'opération se déroule dans l'ordre inverse. Pour des raisons qui seront exposées dans le chapitre suivant, cette décompression doit s'effectuer selon des règles strictes et dure beaucoup plus longtemps que la compression. Pour des raisons de sécurité et de commodité, les sas sous pression d'air sont construits en deux voire trois parties. Sur le principe, ils se composent de deux ou trois sas successifs, qui peuvent être réglés à des pressions différentes. On peut ainsi faire coïncider la compression et la décompression d'équipes différentes, tout en gardant une chambre libre en prévision d'une éventuelle évacuation d'urgence de la chambre de travail.





C

Pathogénie et tableaux cliniques



1. Conséquences d'une différence de pression sur les cavités aériques du corps

La pression exercée de l'extérieur sur le corps par l'eau ou l'air se propage à tous les organes et tissus. En vertu de la loi de Boyle-Mariotte, un volume de gaz enfermé dans un viscère mou tel que l'intestin deviendra plus petit si la pression augmente et plus grand si elle diminue, la pression dans la cavité restant dans les deux cas égale à celle de l'environnement (fig. 12). En revanche, si la cavité remplie de gaz est environnée d'os, autrement dit si elle n'est pas compressible et ne communique pas avec l'environnement, la pression extérieure ne peut pas s'y propager et il s'y crée une dépression relative. Cette dépression peut être à l'origine d'une hyperémie des muqueuses, d'un œdème, d'une exsudation voire d'une hémorragie. Les parties non osseuses de la paroi peuvent se déchirer. On parle alors de barotraumatisme négatif.

Si l'air qui se dilate lors de la remontée d'un plongeur ne peut pas s'échapper des cavités du corps, il comprime celles-ci ou endommage leurs parois et provoque des lésions: il y a barotraumatisme positif.

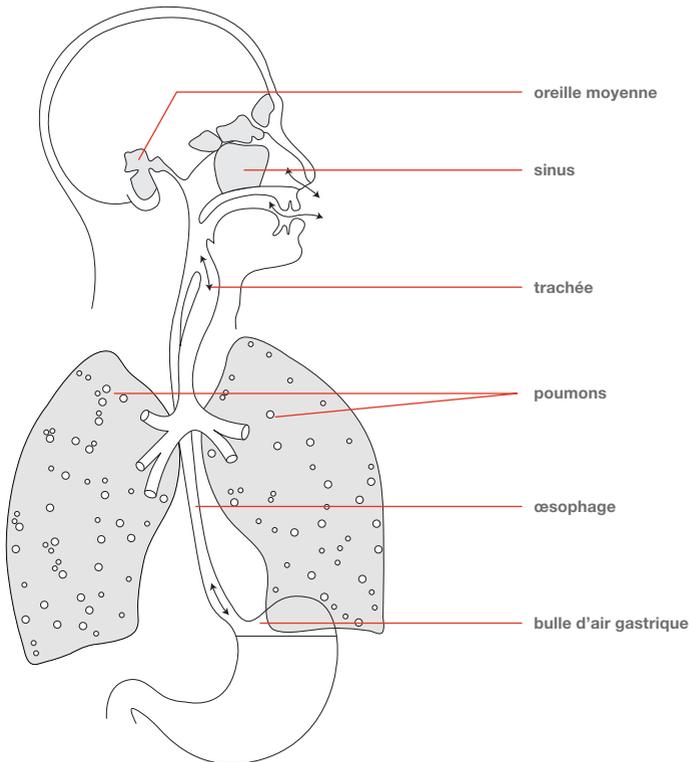


Figure 12 Cavités aériques du corps

1.1. Les barotraumatismes de la tête

1.1.1. Barotraumatisme du conduit auditif externe

Le conduit auditif externe peut être obstrué par un bouchon de cérumen, un tampon de caoutchouc ou de coton voire un autre obstacle. Si, par ailleurs, l'oreille moyenne reste en communication avec les voies respiratoires par les trompes d'Eustache, la partie obturée du conduit auditif subit lors de la plongée un barotraumatisme négatif, avec congestion et saignement de l'épithélium et finalement éclatement du tympan vers l'extérieur. Si l'obstruction du conduit auditif ne se produit qu'au moment de la remontée, par exemple par gonflement du cérumen sous l'action de l'humidité, le barotraumatisme est positif et le tympan éclate vers l'intérieur.

Il ne faut donc jamais obstruer le conduit auditif, que ce soit pendant une plongée ou lors de l'entrée ou de la sortie d'un caisson hyperbare.

L'augmentation de la tension du tympan augmente la résistance du système de conduction sonore. Une tension importante est cause de douleurs térébrantes qui disparaissent si le tympan vient à se rompre, ce qui s'accompagne d'une douleur aiguë et brève.

1.1.2. Barotraumatisme de l'oreille moyenne

Lors de la plongée, c'est-à-dire d'une augmentation de la pression, il faut en général ouvrir les trompes d'Eustache par des manœuvres actives, afin que la pression puisse s'équilibrer entre l'oreille moyenne et le nasopharynx. Jusqu'à une différence de pression de 0,1 bar, correspondant à une colonne d'eau d'environ 1 mètre, il suffit pour cela de déglutir ou d'avancer la mâchoire. Au-delà, l'équilibrage des pressions devient plus difficile et nécessite une manœuvre de Valsalva ou de Toynbee (Valsalva: mouvement d'expiration forcée avec le nez bouché et la bouche fermée; Toynbee: déglutition avec le nez pincé).

Lors de la remontée, il suffit d'une légère surpression dans l'oreille moyenne pour ouvrir passivement les trompes d'Eustache: les barotraumatismes sont donc plus rares que lors de la descente.

L'ouverture des trompes peut être contrariée par la congestion des muqueuses à la suite d'une inflammation (en cas de rhume par exemple) ou par les cicatrices consécutives à une amygdalectomie. Le risque de barotraumatisme négatif de l'oreille moyenne est alors accru. Si la pression extérieure augmente lentement, un liquide sanguinolent peut s'échapper dans l'oreille moyenne afin de compenser la dépression relative. A l'inverse, il existe un risque de barotraumatisme positif à la remontée si l'air comprimé par le liquide ne peut pas ou pas suffisamment s'échapper par les trompes d'Eustache.

On peut donc risquer sa vie en plongeant si l'on est enrhumé!

Le barotraumatisme de l'oreille moyenne se reconnaît à la rougeur et à la contraction du tympan. Dans les cas graves, le tympan lui-même saigne. Les saignements de l'oreille moyenne sont visibles au spéculum, souvent sous forme de liquide foncé sourdant du tympan vers l'extérieur (fig. 13a-d).

Si les pressions ne sont pas suffisamment équilibrées, en cas de plongée trop rapide et trop profonde, le tympan peut éclater vers l'intérieur. La pénétration brutale d'eau froide dans l'oreille interne stimule le labyrinthe et peut provoquer vertiges, nausées et vomissements, avec des conséquences extrêmement dangereuses pour les plongeurs. Une déchirure du tympan avec saignement est facile à reconnaître à l'examen médical. Si l'équilibrage passif de la pression dans les caisses tympaniques n'est pas symétrique pendant la remontée, cela peut aussi provoquer des vertiges et leurs conséquences (nausées, vomissements). Ces vertiges dits alternobariques, de courte durée, ne sont pas dangereux si on en est averti.



Figure 13a Epanchement séreux jaunâtre avec bulles d'air dans la caisse tympanique, lié à la réduction de l'aération de l'oreille moyenne par un équilibrage de la pression insuffisant (léger barotraumatisme de l'oreille moyenne).



Figure 13b Discrètes suffusions hémorragiques du tympan (barotraumatisme léger à modéré de l'oreille moyenne).



Figure 13c Saignements interstitiels prononcés sur les bords du tympan (net barotraumatisme de l'oreille moyenne avec lésion du tympan).



Figure 13d Suffusion hémorragique prononcée du tympan, combinée à un épanchement sanglant dans la caisse tympanique (barotraumatisme sévère de l'oreille moyenne).

Ill.: Hawke Library, Toronto, Canada

1.1.3. Barotraumatisme de l'oreille moyenne avec lésion de l'oreille interne

Une surpression dans l'oreille moyenne peut provoquer des troubles de l'oreille interne avec perte de l'audition, en particulier dans la plage des 4000 Hz, lorsque l'étrier est enfoncé dans la fenêtre ovale, entraînant une augmentation de la pression qui peut induire des lésions, notamment si elle est soudaine.

Outre la membrane du tympan et la fenêtre ovale, la fenêtre ronde est également un point faible entre l'oreille moyenne et l'oreille interne. Elle peut être défoncée par une surpression importante, ce qui provoque de graves troubles de l'équilibre et de l'audition. On parle alors de rupture de la fenêtre ronde, mais il est difficile de diagnostiquer cette lésion avec certitude.

1.1.4. Barotraumatisme sinusal

La communication entre les sinus et les fosses nasales peut être obstruée par une muqueuse inflammatoire ou hypertrophiée ou par des polypes. La plongée provoque alors un barotraumatisme négatif avec œdème de la muqueuse sinusale et épanchement de liquide cellulaire et de sang, épanchement qui cesse quand la pression de l'air comprimé dans la cavité redevient égale à celle du milieu ambiant. Quand la communication entre le sinus et la fosse nasale se rétablit, le liquide extravasé s'écoule et le sujet a l'impression de saigner du nez.

Pendant la remontée, la dilatation de l'air emprisonné dans les sinus peut provoquer un barotraumatisme positif voire, dans de rares cas, des microfractures de la base du crâne avec pénétration d'air dans la boîte crânienne. Les barotraumatismes positifs et négatifs des sinus maxillaires se traduisent par une sensation de réplétion et des douleurs dans la mâchoire supérieure et les dents maxillaires, parfois associées à des paresthésies sur le territoire des nerfs sous-orbitaires. Le barotraumatisme des sinus frontaux provoque une sensation de pression et des douleurs sourdes au front et à la racine du nez.

1.1.5. Barotraumatisme dentaire

L'air enfermé dans une dent cariée ou sous une obturation dentaire mal étanche peut se dilater lors de la remontée et provoquer un barotraumatisme positif douloureux. Cette «rage de dents» s'estompe avec la recompression, mais le barotraumatisme positif peut provoquer le bris de fragments de dents, de comblements dentaires ou de couronnes. Les granulomes des racines dentaires peuvent également provoquer un barotraumatisme au niveau de la mâchoire. Les barotraumatismes dentaires sont toutefois devenus plus rares avec l'amélioration de l'état de santé bucco-dentaire de la population.

1.2. Barotraumatisme du système digestif

Pendant que le plongeur est en profondeur ou dans un caisson, des bulles de gaz peuvent se former ou grandir dans son tube digestif: dans l'estomac par aérophagie ou absorption de boissons gazeuses, ou dans le côlon à la suite d'une fermentation. Quand le plongeur regagne la surface ou sort du sas, ces bulles augmentent de volume. Si elles ne peuvent pas s'échapper librement, elles provoquent des crampes intestinales douloureuses, parfois accompagnées de nausées, qui peuvent exiger une recompression dans les cas les plus sévères. Des cas de rupture de l'estomac ont été décrits dans ces circonstances.

1.3. Barotraumatisme cutané

Sous les scaphandres étanches relativement rigides ou une tenue de plongée autonome mal ajustée, il peut se créer des poches d'air dont la pression ne s'équilibre pas pendant la plongée et qui peuvent causer des barotraumatismes cutanés, prenant la forme d'hématomes striés. Des suffusions striées ou piquetées ou des marques évoquant une cutis marmorata peuvent également se former à la suite d'une embolie gazeuse locale (formation de bulles de gaz).

(Voir fig. 17, page 54)

1.4. Barotraumatisme pulmonaire

1.4.1. Barotraumatisme pulmonaire positif

Il se crée une surpression dans les poumons quand l'air qu'ils contiennent se dilate pendant la remontée et ne peut pas suffisamment s'échapper, que ce soit d'une partie des poumons, par exemple à cause d'une bronchite (séquestration d'air), ou de tout l'organe à la suite d'une fermeture de la glotte (fig. 14).

Lorsque l'on remonte de 10 mètres de profondeur, l'air contenu dans les poumons double de volume. Il faut donc exhaler pendant la remontée un volume excédentaire égal à la capacité pulmonaire totale. En position inspiratoire complète, il suffit que le volume d'air dans les poumons augmente de 10 % pour que les tissus pulmonaires subissent une rupture. Ainsi, quand on remonte de 10 mètres à la surface, soit une durée de 6 secondes par mètre à la vitesse normale de remontée de 10 m/min, il y a risque de rupture pulmonaire si la glotte reste fermée. Les barotraumatismes des poumons sont donc particulièrement fréquents lors des remontées en panique, même à partir de quelques mètres de profondeur seulement. Tous les plongeurs doivent donc apprendre à remonter sans appareil à partir d'une profondeur relativement importante, en évacuant constamment de l'air.

Rupture centrale: si la rupture est centrale, l'air peut s'échapper dans le médiastin. Si la quantité de gaz est importante, il se forme un emphysème médiastinal et cutané, qui atteint le cou et la nuque et peut s'étendre à tout le tronc et parfois à la tête.

Les symptômes n'apparaissent que dans les cas graves (voix enrouée et métallique, sensation d'encombrement thoracique, douleur rétrosternale, détresse respiratoire, douleur à la déglutition, parfois choc et perte de connaissance à la suite du blocage du retour veineux). On peut objectiver des signes tels qu'une tuméfaction et une crépitation typique de la peau du cou et de la poitrine, une diminution de l'intensité des bruits du cœur ou une crépitation synchrone aux mouvements cardiaques.

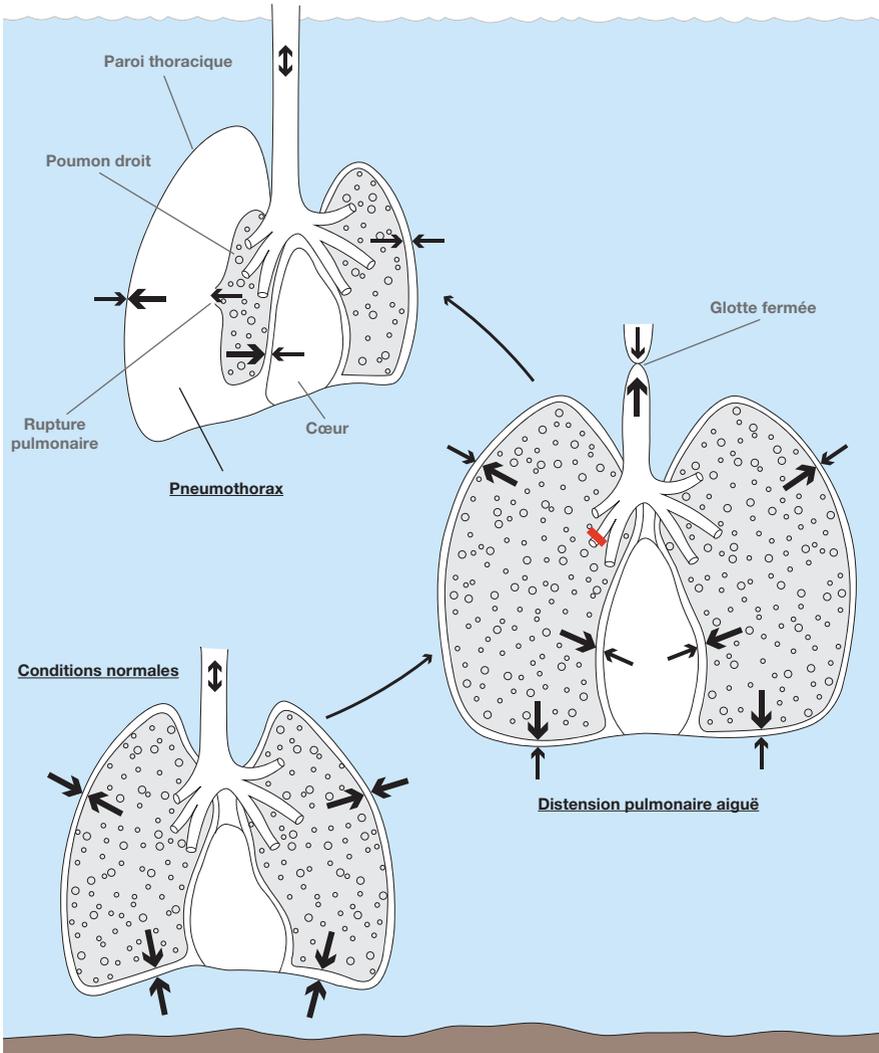


Figure 14 Barotraumatisme pulmonaire

Pneumothorax à droite à la suite d'un barotraumatisme avec hyperpneumatisation des deux poumons consécutive à la fermeture de la glotte. Le même tableau d'hyperpneumatisation peut être unilatéral à la suite de l'occlusion d'une bronche (trait rouge)

Rupture périphérique: si la rupture est périphérique et intéresse le feuillet viscéral de la plèvre, il en résulte un pneumothorax (pneumothorax sous tension) ou même un hémopneumothorax, sous l'effet de l'air qui se dilate dans l'espace pleural au cours de la remontée.

Le pneumothorax se manifeste par une douleur thoracique subite et unilatérale, avec dyspnée et tachycardie. L'examen révèle une diminution de l'amplitude des mouvements respiratoires de la paroi thoracique, une hypersonorité à la percussion et une diminution voire une abolition du murmure vésiculaire. Sur les radiographies, on observe la disparition de l'image bronchovasculaire du côté atteint et un déplacement de l'ombre médiastinale vers le côté opposé.

La rupture d'alvéoles pulmonaires, notamment dans les parties intérieures du poumon (rupture centrale), s'accompagne souvent de celle de vaisseaux sanguins dans lesquels le gaz respiratoire peut alors pénétrer. Si les bulles ainsi formées parviennent dans les gros vaisseaux, il se crée des embolies gazeuses artérielles pouvant provoquer des troubles de l'irrigation de tous les organes, en particulier le cerveau, la moelle épinière et les artères coronaires. Les symptômes de ces embolies gazeuses sont décrits dans le chapitre C, point 3, à propos du mal des caissons.

1.4.2. Barotraumatisme pulmonaire négatif

Il y a barotraumatisme pulmonaire négatif quand la pression à l'intérieur des poumons est inférieure à celle du reste du corps. Le sang et le plasma sont alors aspirés dans les alvéoles. Il se crée un œdème pulmonaire potentiellement mortel car il empêche l'absorption de l'oxygène.

Les situations suivantes peuvent produire une dépression relative dans les poumons:

Plongée en apnée à trop grande profondeur: la pression de l'eau dépasse la pression nécessaire pour réduire les poumons à leur volume résiduel. En raison de la rigidité de la cage thoracique, le volume pulmonaire ne peut encore diminuer (légèrement) que par une forte élévation du diaphragme et un afflux de sang dû à l'effet d'aspiration, processus qui aboutit à un barotraumatisme négatif (cf. chap. B 1.2.2).

Plongée avec un tuba trop long: utilisation d'un tuba pour respirer en plongée à plus de 50 cm de profondeur (cf. chap. B 1.3).

1.4.3. Œdème pulmonaire des plongeurs et des nageurs

De nombreuses observations ont permis de constater que des plongeurs ou nageurs en bonne santé pouvaient développer un œdème pulmonaire. Celui-ci serait probablement déclenché par la synergie entre plusieurs facteurs, dont l'immersion, qui provoque un déplacement du volume sanguin vers le thorax (fig. 15), le froid qui déclenche une vasoconstriction périphérique, et un stimulus adrénérgique général lié à l'activité physique ou au stress psychologique. Une intervention rapide et un traitement de soutien permettent de résoudre rapidement cet état pathologique.

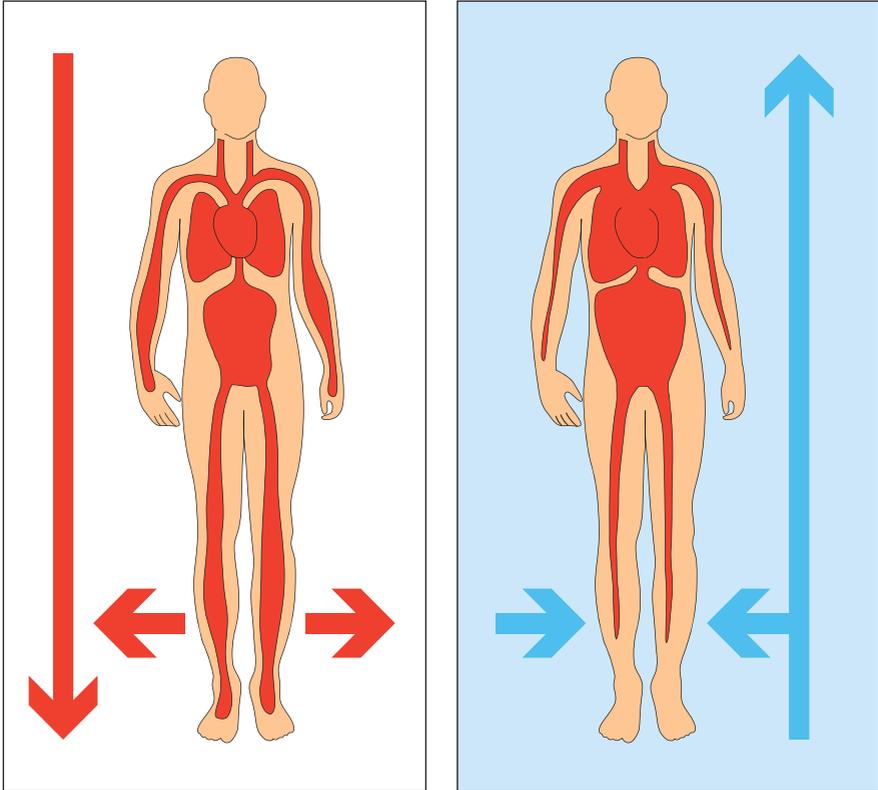


Figure 15 Effet de l'immersion:

A gauche: situation à l'air libre et dans les conditions atmosphériques. La pression hydrostatique à l'intérieur du corps fait descendre les fluides vers les membres inférieurs.

A droite: Conditions lors de l'immersion dans l'eau. La pression hydrostatique interne et externe est la même, ce qui entraîne un déplacement du volume vers les organes thoraciques.

Copyright Stephanie Naglschmid/ILVA

2. Effet des gaz dissous dans l'organisme à une pression élevée

La loi de Henry s'applique in vitro (chap. A point 4): la quantité C d'un gaz X dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle p de ce gaz à la surface du liquide et à un coefficient de solubilité α , d.h. $C_x = p_x \times \alpha_x$.

Quand la profondeur d'immersion augmente, et avec elle la pression, la quantité de gaz dissous dans le corps augmente elle aussi. Comme les effets pharmacologiques d'une substance, y compris d'un gaz, dépendent de la quantité absorbée par l'organisme, les gaz peuvent produire sous une pression élevée des effets qui n'apparaissent pas à la pression atmosphérique normale.

2.1. Effets des gaz inertes

Les gaz inertes (non réactifs chimiquement), qui ne se lient normalement pas aux composants des cellules, peuvent cependant influencer sur les fonctions des cellules nerveuses et provoquer une narcose. Cet effet est lié, entre autres, à la solubilité du gaz en question dans les lipides (voir le chapitre A 4, p. 14).

On pense que les gaz inertes pénétrant à une concentration élevée dans les cellules altèrent les propriétés des membranes cellulaires, interfèrent avec les protéines constituant les récepteurs et modifient ainsi l'action des neurotransmetteurs.

2.1.1. Narcose à l'azote: l'ivresse des profondeurs

La plongée à l'air comprimé peut produire, à grande profondeur, des effets comparables à un début d'ivresse éthylique: euphorie, perte du sens critique, ralentissement de la réflexion et perte de coordination neuromusculaire. Il arrive parfois que cette «ivresse des profondeurs» s'annonce par des réactions de peur ou d'effroi immotivées. Il n'existe pas de seuil de profondeur clairement établi où commencerait l'ivresse des profondeurs. On estime cependant que la probabilité de ce phénomène augmente à partir de 40 mètres. Au-delà de 60 mètres, le fonctionnement psychique et physique devient imprévisible, et un risque de perte de connaissance apparaît entre 100 et 150 mètres. Tous ces symptômes disparaissent lorsque le plongeur remonte à une moindre profondeur, avec la baisse de la pression partielle d'azote. Si le plongeur est en mauvaise condition physique, après un abus d'alcool ou des insomnies ou encore à la suite d'un effort physique important, l'ivresse des profondeurs peut survenir plus rapidement, souvent dès 30 mètres de profondeur. Il est donc dangereux de plonger à l'air comprimé en dessous de 40 mètres, au même titre qu'il est dangereux de conduire une voiture avec une alcoolémie élevée. En dessous de 60 mètres, le risque d'ivresse des profondeurs se double de celui d'une intoxication à l'oxygène.

2.1.2. Le syndrome nerveux des hautes pressions (SNHP)

On utilise en règle générale un mélange d'hélium et d'oxygène pour les plongées à plus de 40 mètres, en particulier pour les plongées à saturation à grande profondeur. En effet, l'hélium est peu liposoluble et produit donc des effets narcotiques nettement moins marqués que l'azote.

Il peut toutefois provoquer, au-delà de 200 m (> 21 bars), des tremblements et des tressaillements musculaires (myoclonies), associés à des vomissements et des syncopes. Entre 600 et 800 m, le tableau clinique et l'électroencéphalogramme ressemblent à ceux de l'épilepsie.

Ces troubles traduisent une hausse du seuil d'excitabilité cérébrale causée par l'hélium et appelée syndrome nerveux des hautes pressions (SNHP).

Ce syndrome peut être évité, entre autres, par une compression lente ou l'ajout à petites doses d'un gaz ayant un effet narcotique. Ses symptômes disparaissent lorsque la pression diminue.

3. Effet des bulles de gaz dans le sang et les tissus: les accidents de décompression

3.1. Formation des bulles de gaz dans le corps

3.1.1. Absorption et libération de gaz par un liquide in vivo

Dans un organisme vivant, la vitesse de saturation et de désaturation gazeuse d'un tissu dépend non seulement du coefficient de solubilité α , mais aussi de la rapidité avec laquelle le gaz est transporté vers ce tissu et évacué de celui-ci par la circulation sanguine et par diffusion. Les tissus adipeux peuvent dissoudre cinq fois plus d'azote que le sang.

Toutefois, parce qu'ils sont peu vascularisés, ils seaturent et se désaturent beaucoup plus lentement.

La vitesse de saturation d'un tissu pour un gaz donné est déterminée par la demi-vie de ce dernier. On parle de tissus à saturation rapide ou lente, notamment pour l'azote qui est particulièrement important en plongée.

La vitesse d'absorption et de libération d'un gaz dépend, d'une part, de la différence de pression partielle entre les fluides corporels (sang et tissus) et le gaz alvéolaire et, d'autre part, de la vascularisation des tissus en question.

Au début de la décompression, la pression ambiante et celle du gaz alvéolaire (somme de pN_2 , pO_2 et/ou d'autres pressions partielles) sont généralement supérieures à la pression d'azote (pN_2) dans les tissus. On peut donc admettre une différence de pression plus importante pour le premier palier. Pour les paliers suivants, en revanche, le rapport s'inverse: la pression de gaz inerte dans les tissus est plus forte que la pression ambiante, qui a baissé dans l'intervalle, et le risque de formation de bulles augmente. La décompression doit donc se faire plus lentement.

3.1.2. Sursaturation tolérée

Le sang et les tissus tolèrent une certaine sursaturation par les gaz dissous sans qu'il y ait formation de bulles. Les surpressions maximales tolérées ont été déterminées par Bühlmann, qui a calculé à partir de ces données les demi-vies dans seize tissus hypothétiques, allant de 2,65 à 635 minutes pour l'azote et de 1,0 à 240 minutes pour l'hélium. A partir de ces expériences et calculs, en se basant sur le modèle de décompression de Haldane (1905), Bühlmann a établi des tables de décompression connues sous l'abréviation ZH-L16 (ZH pour Zurich, L pour linéaire, voir le chap. D 3).

3.1.3. Formation des bulles de gaz

Lorsque la pression ambiante diminue trop rapidement, la sursaturation des tissus et du sang augmente à tel point que des bulles de gaz se forment. In vitro, il faut une différence de pression de plus de 100 bars pour rompre la cohésion des molécules de liquide. Mais in vivo, les turbulences du flux sanguin et les variations locales de tension permettent la nucléation du gaz dans les tissus et une formation de bulles bien plus rapidement.

La bulle grandit tant que la pression qui règne à l'intérieur est supérieure à celle exercée par le milieu ambiant, le tissu et la tension superficielle. Dans le cas contraire, elle diminue et finit par disparaître. La pression exercée sur une bulle par la tension superficielle est inversement proportionnelle à son rayon. Dans un liquide, il n'y a pratiquement pas de limite à la croissance d'une bulle. Dans un tissu vivant, en revanche, la pression exercée par le tissu s'oppose à son expansion.

Des micro-bulles se forment à chaque décompression, même lorsque celle-ci est menée selon les règles. En temps normal, elles ne provoquent aucun symptôme. Les grosses bulles entraînées par la circulation sanguine peuvent être détectées à l'échographie doppler et les bulles stationnaires par l'échographie simple. Cependant, les sujets chez lesquels de telles bulles sont observées ne présentent pas tous un mal des caissons symptomatique.

La corrélation très approximative entre la quantité de bulles et le risque de maladie de décompression s'explique, d'une part par les différences de perfusion des différents tissus et des parties du corps pendant la plongée et, d'autre part, par le fait que les bulles peuvent provoquer des altérations systémiques secondaires. Par exemple, si une bulle touche la membrane endothéliale d'un vaisseau sanguin, elle déclenche des modifications biochimiques qui provoquent, par l'intermédiaire notamment des radicaux, une cascade d'autres réactions (activation du complément, coagulation, médiateurs pro-inflammatoires, etc.).

3.2. Embolies gazeuses

3.2.1. Embolies gazeuses artérielles

Des bulles de gaz peuvent se former dans le sang artériel si la remontée est très rapide, à plus de 15 m/min (blow-up), après une plongée à plus de 40 m, même après une plongée de courte durée. D'un diamètre de 0,03 à 2 mm, elles peuvent provoquer des embolies gazeuses, principalement dans le cerveau, la moelle épinière et le cœur. Les conséquences de ces embolies sont en tout point semblables à celles d'un barotraumatisme, par exemple au niveau pulmonaire. Les embolies gazeuses artérielles sont des accidents de décompression graves d'emblée, qui peuvent causer la mort ou une invalidité à vie. Il faut prendre très au sérieux les troubles les plus discrets, surtout d'ordre neurologique ou rachidien, par exemple une sensation d'engourdissement des extrémités.

Les symptômes se produisent souvent dès la décompression, et au plus tard au bout de quelques heures.

Les symptômes d'une embolie gazeuse cérébrale sont une désorientation, un état torpide, des difficultés de concentration et une amnésie rétrograde, le tout constituant ce que l'on nomme le syndrome psycho-organique transitoire. On note également des troubles de l'élocution et de la vision, des vertiges, des crampes, une asthénie musculaire, des parésies et hémiparésies et une perte de connaissance. Des crises focales signalant une atteinte cérébrale sont également possibles. L'embolie gazeuse de la moelle épinière se manifeste par des paresthésies dans les membres inférieurs, parfois étendues en ceinture jusqu'au tronc. Les douleurs initialement symétriques, parfois vives, sont suivies de spasmes, de parésies ou de paralysies des membres, pouvant aller jusqu'à la paraplégie ou à la tétraplégie dans les cas graves. Les lésions de la partie inférieure de la moelle épinière entraînent des troubles de la miction et parfois de la défécation.

Les embolies gazeuses artérielles provoquent, dans de rares cas, des troubles de l'oreille interne avec nausées, vertiges, acouphènes et/ou perte de l'audition. Ceux-ci peuvent également être causés par la formation locale de bulles, presque uniquement lors des plongées profondes sous gaz mixtes, et disparaissent alors rapidement après la recompression. Les atteintes durables sont cependant plus fréquentes et plus étendues si leur traitement est négligé.

L'embolie gazeuse coronarienne provoque des douleurs angineuses typiques et produit des signes d'ischémie à l'électrocardiogramme, avec parfois (mais rarement) des arythmies ou une insuffisance cardiaque.

3.2.2. Embolies gazeuses veineuses

Des bulles de gaz peuvent se former dans les veines lors d'une remontée rapide ou par diffusion de bulles formées dans les tissus. Lorsqu'elles par-

viennent au poumon, elles sont retenues dans celui-ci et rejetées par la respiration. Il arrive cependant que des bulles traversent le filtre pulmonaire, par exemple en passant par des anastomoses pulmonaires, et provoquent des embolies gazeuses artérielles. La pénétration massive de bulles d'air dans les poumons provoque des douleurs thoraciques, une dyspnée et une toux d'irritation. Dans les pays anglo-saxons, on désigne cet ensemble de symptômes sous le nom de «chokes».

3.3. Persistance du foramen ovale

Le foramen ovale est une ouverture qui forme une soupape dans le septum (cloison de séparation) des oreillettes cardiaques. Important pour le développement du fœtus, il reste perméable jusqu'à l'âge adulte chez un tiers environ de la population en bonne santé.

La pression dans l'oreillette droite étant inférieure à celle de l'oreillette gauche, le foramen ovale reste fermé dans les conditions normales. Si la pression dans l'oreillette droite augmente au point de dépasser celle de l'oreillette gauche, la «soupape» qui obture le foramen ovale s'ouvre et du sang contenant des bulles d'air peut passer directement de la circulation périphérique à la circulation centrale, provoquant une embolie gazeuse artérielle (fig. 16). Les personnes présentant une perméabilité du foramen ovale, a fortiori une perméabilité prononcée, doivent donc prendre des précautions particulières pour éviter le passage de bulles d'air de la circulation périphérique à la circulation centrale lors de la décompression (on parle de «low bubble diving»). Il est aussi possible d'obturer le foramen ovale à l'aide d'un implant (voir les Recommandations de la Société suisse de médecine subaquatique et hyperbare pour la plongée avec un foramen ovale perméable: www.SUHMS.org).

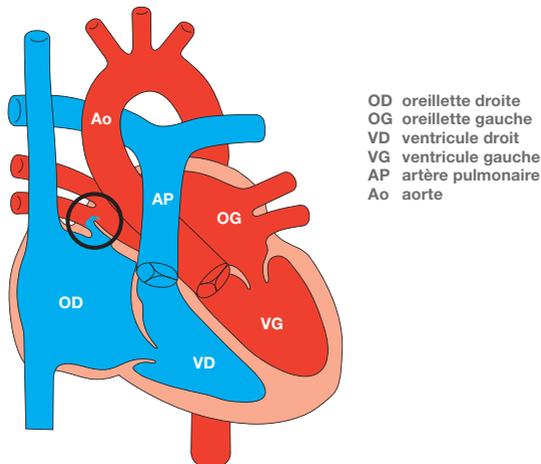


Figure 16 Coupe transversale du cœur humain:

le cercle indique le foramen ovale, dans le septum interauriculaire. Quand la pression sanguine dans l'oreillette droite dépasse la pression dans l'oreillette gauche, le trou s'ouvre et le sang passe directement de l'une à l'autre.

Ill.: © 2012 W.L. Gore & Associates, Inc. (mod.)

3.4. Action locale des bulles de gaz dans les tissus

Les variations brusques et importantes de la pression dans les tissus en état de sursaturation provoquent facilement une nucléation et la formation de bulles, notamment aux insertions tendineuses des muscles puissants: arrêtées par ces tissus denses et rigides, les bulles naissantes exercent une forte pression, irritent les terminaisons nerveuses et peuvent provoquer de vives douleurs. Ces douleurs portent en anglais le nom de «bends» (to bend = se plier, sous-entendu: de douleur). Dans un sens plus large, on utilise aussi ce mot pour désigner la maladie de décompression.

Ces accidents articulaires affectent surtout les articulations fortement sollicitées: épaules et coudes chez les plongeurs, hanches et genoux chez les travailleurs en caissons. Les «bends» peuvent survenir jusqu'à une heure après la fin de la plongée ou la sortie du caisson. La douleur est en général persistante et térébrante, comparable à une rage de dents, avec parfois un caractère pulsatile. Elle va en augmentant pendant quelques minutes à quelques heures, puis disparaît en quelques heures, même sans traitement. Les articulations affectées ont généralement un aspect tout à fait normal et ne sont pas très sensibles à la compression. Les mouvements articulaires de faible amplitude sont bien tolérés.

Dans les cas bénins, les bulles d'air dans les muscles provoquent des douleurs évoquant une crampe. Dans les cas plus graves, elles peuvent provoquer des contractures douloureuses. Les atteintes musculaires lors des accidents de décompression s'accompagnent d'une élévation du taux sanguin de créatine-phosphokinase (CPK).



Figure 17 Accident de décompression cutané: saignements sous-cutanés évoquant des piqûres de puce ou en «carte géographique», provoqués par des bulles d'air dans l'hypoderme ou par un barotraumatisme négatif (tenue de plongée mal ajustée).

Ill.: Ch. Wölfel, Schwyz

Lorsque la décompression est mal menée, de petites taches rouges prurigineuses ressemblant à des piqûres de puces peuvent apparaître sur la peau. Elles sont dues à la formation de petites bulles de gaz et sont appelées «puces» ou «skin bends». Au lieu de ces «puces», on rencontre aussi des marbrures bleuâtres de la peau (cutis marmorata), notamment en cas de barotraumatisme négatif causé par une tenue de plongée mal ajustée (cf. fig. 17 et chapitre C 1.3).

Puces, courbatures et atteintes articulaires sont considérées comme des formes bénignes d'accidents de décompression (DCI I, voir ci-après le chapitre C 3.5). Elles ne surviennent en général qu'après le fin de la plongée ou le retour à la pression atmosphérique normale après une plongée prolongée, avec un temps de latence qui est généralement bref mais peut aller jusqu'à 24 heures. Ces accidents sont anodins mais nécessitent une surveillance car ils peuvent être les précurseurs de symptômes plus graves, notamment neurologiques. Les plongeurs sportifs connaissent puces et courbatures, mais pas d'atteintes articulaires en règle générale, en raison de la faible durée des plongées.

3.5. Lésions dues aux bulles gazeuses (DCI, Décompression Illness)

Les symptômes provoqués par les bulles d'air dans les tissus et la circulation sanguine sont la manifestation de lésions dues aux bulles gazeuses, ou «mal des caissons» ou bien encore «accident de décompression». Lorsqu'ils sont causés par la présence locale de bulles dans un tissu, on emploie le terme «maladie de décompression» (DCS). En cas d'embolie provoquée par la présence de bulles dans la circulation sanguine, typique du barotraumatisme pulmonaire, on est en présence d'une «embolie gazeuse artérielle» (AGE). Le terme de lésions dues aux bulles gazeuses ou DCI inclut donc aussi bien la maladie de décompression (DCS) que l'embolie gazeuse artérielle (AGE). Les manifestations cliniques des maladies de décompression et des embolies gazeuses artérielles se recoupent souvent et les rendent difficile à distinguer. Cette distinction n'a d'ailleurs aucune importance notable, que ce soit pour le traitement ou pour le pronostic.

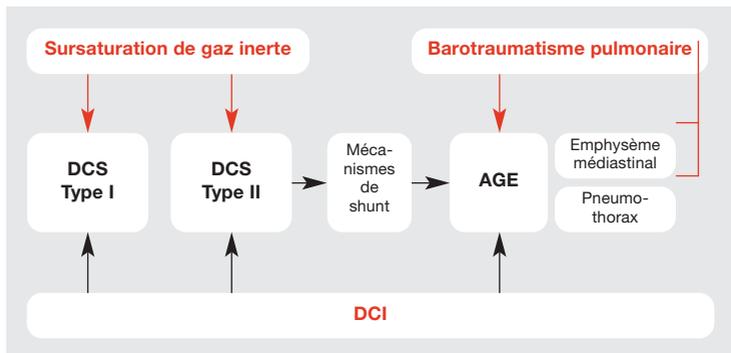


Figure 18 Diagramme «Systématique des accidents de plongée»

Ill.: D'après la directive «Accidents de plongée» de la GTUM, version 2011

En médecine hyperbare, on différencie les lésions dues aux bulles gazeuses (DCI) en fonction de leur gravité. Le stade DCI I regroupe les lésions provoquées par des bulles de gaz locales, sous la peau et dans les tissus conjonctifs, et qui sont donc de véritables maladies de décompression (DCS), à l'instar des puces ou des bends. Les DCI II regroupent tous les autres tableaux aigus produits par la présence locale de bulles ou par des embolies gazeuses dans d'autres tissus ou organes: atteintes de l'oreille interne, du système nerveux central et périphérique, des poumons (cf. C 3.2.2. «Embolies gazeuses veineuses») et d'autres organes internes. L'embolie gazeuse artérielle (AGE), consécutive à un barotraumatisme (par exemple pulmonaire), provoque en général des ischémies massives, d'apparition rapide et de localisation inconstante, principalement au niveau cérébral. Elle constitue donc un accident de type DCI II.

La distinction entre type I et type II est toutefois limitée par le fait qu'une atteinte de type I peut évoluer en quelques heures en type II. Elle est toutefois utile et généralement employée pour le premier examen général d'un plongeur ou d'un travailleur en milieu hyperbare à la suite d'un accident. Les lésions provoquées par la formation locale de bulles apparaissent souvent à plusieurs endroits, notamment en plusieurs points du système nerveux.

3.6. Les formes chroniques de maladie de décompression

La possibilité que des plongées ou des séjours en milieu hyperbare répétés puissent provoquer des lésions organiques définitives, même en l'absence de DCI objectivable, est controversée depuis longtemps. Seules sont avérées dans ce contexte les lésions osseuses appelées ostéonécroses dysbariques, sur lesquelles nous reviendrons au point 3.6.1. Le doute subsiste, en revanche, quant aux autres effets à long terme, notamment les altérations du système nerveux central (troubles de la mémoire et autres). Aucune étude scientifique n'a pu apporter de preuves concluantes à cet égard.

Les lésions affectant l'ouïe des plongeurs professionnels sont dues au bruit (sifflement des soupapes, modification de la qualité des sons en milieu aquatique, problèmes de protection de l'oreille) et non directement aux surpressions. Elles n'entrent donc pas dans le cadre des effets à long terme sur la santé envisagés ici.

3.6.1. Ostéonécrose aseptique et déformations articulaires (maladie des caissons au sens strict)

Si des bulles de gaz se forment, dans les conditions décrites au chapitre C 3.1., dans l'os spongieux dont le tissu riche en corps gras stocke bien l'azote et où le sang circule lentement, elles peuvent provoquer des embolies ou obstruer des vaisseaux sanguins si elles ne peuvent pas s'échapper dans les étroits espaces médullaires. On a envisagé d'autres mécanismes favorisant, en particulier une stase veineuse empêchant le drainage du sang de l'espace médullaire vers le périoste. Le résultat est une isché-

mie circonscrite, aboutissant à un infarctissement et à la mort de l'os (ostéonécrose) et parfois aussi du cartilage. A ce stade, il n'y a pas encore de maladie constituée. Les symptômes pathologiques n'apparaissent que lorsque la résistance statique de l'os est affaiblie par des remaniements secondaires.

On rencontre des infarctissements osseux circonscrits dans la diaphyse des os longs, notamment la partie supérieure de l'humérus, du tibia et du péroné et les extrémités supérieure et inférieure du fémur. Si ces remaniements se produisent à proximité des articulations, la zone affaiblie peut s'enfoncer sous l'action des contraintes. Il se crée une arthrose secondaire dont les symptômes sont identiques à ceux d'une arthrite dégénérative «ordinaire». Le risque est particulièrement important au niveau des grosses



Figure 19a Ostéonécrose de l'humérus proximal; ostéolyse avec sclérose marginale dans la métaphyse, ainsi que dans l'épiphyse à proximité de l'articulation.

Ill.: W. Förster, Munich

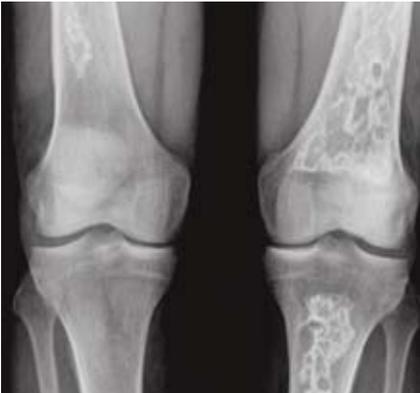


Figure 19b Ostéonécroses de la partie inférieure des deux fémurs (plus marquée à gauche) et du tibia gauche, avec sclérose circinée irrégulière de la structure osseuse.

Ill.: www.radiologyassistant.nl



Figure 19c IRM pondérée en T1 du genou gauche avec infarctissements anciens de l'os du plateau tibial interne et des deux condyles fémoraux. Dégénérescence graisseuse centrale et sclérose marginale au niveau des trois zones infarctées.

Ill.: M. Schmid, Zurich

éarthroses, dont les vaisseaux sanguins sont peu ou pas interconnectés (fig. 19 a–c). Comme nous l'avons vu au chapitre C 3.4, les plongeurs présentent plutôt des lésions au niveau des épaules et les ouvriers travaillant en caisson ou dans les tunnels des atteintes nécrotiques et arthritiques des hanches. Cela pourrait s'expliquer par les efforts physiques différents, qui entraînent un appel de sang dans les membres supérieurs ou inférieurs. Le temps de latence entre l'événement et l'apparition de modifications radiographiques et de symptômes varie entre quelques mois et plusieurs années. Les ostéonécroses aseptiques, principalement au niveau de la hanche ou de l'épaule, peuvent progresser même si le sujet n'est plus exposé au milieu hyperbare et aboutir à une invalidité.

La fréquence des ostéonécroses aseptiques est corrélée, d'une part, au nombre et à la durée des expositions hyperbares et, d'autre part, en particulier au nombre des éventuels accidents de décompression. Ces nécroses se produisent donc surtout chez les plongeurs professionnels et les travailleurs en milieu hyperbare mais sont extrêmement rares chez les plongeurs sportifs. Même chez les professionnels, elles sont devenues plus rares avec l'amélioration des tables de décompression.

3.7. Lésions tardives après DCI

3.7.1. Atteintes chroniques du système nerveux central et des organes sensoriels

Il faut distinguer des effets à long terme sur la santé les atteintes définitives du cerveau et de la moelle épinière consécutives à un accident de décompression: hémiparésies, déficits des nerfs crâniens, syndromes d'interruption de la moelle épinière, déficits sensoriels et troubles psychorganiques. Les paraplégies sont particulièrement fréquentes chez les plongeurs sportifs. Cependant, la plupart des troubles cérébrospinaux provoqués par les accidents de décompression sont réversibles, au moins en partie, en particulier si un traitement de recompression adéquat a été mis en place rapidement après l'apparition des symptômes. On n'a jamais constaté à ce jour d'aggravation ultérieure, autrement dit survenant quelques jours après l'accident.

3.7.2. Troubles de l'appareil auditif et de l'oreille interne

Les barotraumatismes de l'oreille externe ou moyenne entraînent une diminution de l'ouïe avec surdité de transmission. Cette atteinte est généralement réversible. En revanche, la surdité neurosensorielle résulte de la formation de bulles dans l'oreille interne, d'un barotraumatisme de l'oreille moyenne ou d'une embolie gazeuse sur une artère irriguant l'oreille interne, le nerf auditif ou les centres auditifs du cerveau. Fréquemment accompagnée de bourdonnements d'oreille (acouphènes), elle affecte surtout les hautes fréquences. Elle est souvent irréversible en l'absence de recompression. Nous avons déjà évoqué au point 3.6 le risque de lésions

auditives provoquées par le bruit qui affecte principalement les plongeurs professionnels.

Ces atteintes affectent souvent à la fois la cochlée et le labyrinthe, de sorte que la perte d'audition est associée à des vertiges et des vomissements. Ces symptômes s'estompent généralement en trois ou quatre semaines, même sans recompression, que ce soit par la récupération fonctionnelle des tissus atteints ou grâce à la faculté de compensation du cerveau. Les séquelles d'un barotraumatisme de l'oreille interne (cf. C 1.1.4.) peuvent être difficiles ou impossibles à distinguer de celles d'un DCI, de sorte qu'il est souvent impossible de poser un diagnostic étiologique avec certitude.

4. Effets des gaz irritants et toxiques

Des gaz toxiques ou irritants peuvent, d'une part, être libérés ou se former sur les chantiers en milieu hyperbare et mettre ainsi en danger les travailleurs exposés. D'autre part, ils peuvent être présents sous forme d'impurétés dans les gaz respiratoires et avoir une action toxique ou irritante, en particulier s'ils ne sont pas traités dans les règles de l'art. C'est le cas en particulier des brouillards d'huile qui peuvent contaminer accidentellement l'air comprimé et provoquer des problèmes respiratoires.

4.1. L'oxyde d'azote

Des intoxications par les oxydes d'azote et d'autres gaz irritants peuvent se produire dans un caisson ou la zone de travail d'un tunnelier à hydrobouclier après des travaux à l'explosif, si les ouvriers pénètrent dans la zone en surpression avant que les gaz produits par l'explosion aient été entièrement aspirés et évacués. Les moteurs diesel produisent également des oxydes d'azote, de même que les chalumeaux de soudage (par oxydation de l'azote de l'air). Les oxydes d'azote sont peu solubles dans l'eau. Ils franchissent les voies respiratoires supérieures et pénètrent dans les alvéoles. Le signe typique d'intoxication est un œdème pulmonaire qui se produit plusieurs heures après l'exposition.

4.2. Dioxyde de carbone (gaz carbonique)

La teneur en CO₂ de l'air atmosphérique normal est de 0,03 % en volume. Elle peut augmenter, par exemple, si la capacité des absorbeurs d'un appareil respiratoire à circuit fermé (recycleur) ou d'un habitat subaquatique est insuffisante, si l'espace mort est trop important dans un casque ou un appareil alimenté par un tuyau, ou si l'air comprimé est pollué par des gaz d'échappement. Le danger est aggravé par le fait qu'une teneur en CO₂ de 1 % en volume correspond à une pression partielle de 0,01 bar (1 kPa) en surface mais 0,05 bar (5 kPa) à 40 mètres de profondeur. Les individus en bonne santé supportent sans encombre jusqu'à 1,5 % en volume de CO₂ en surface, soit une pression partielle de 0,015 bar (1,5 kPa). Toute-

fois, en plongée à 43 mètres, cette pression de 0,015 bar passe à 0,08 bar (8 kPa), ce qui correspond à 8 % en volume. A cette concentration, il existe un risque de perte de connaissance et de crampes. A partir de 2 % en volume à l'air libre, la respiration s'accélère (hyperventilation). A plus de 40 mètres de fond, cette concentration est potentiellement mortelle.

4.3. Monoxyde de carbone

Le CO₂ peut également être amené dans l'air que les travailleurs en caisson ou les plongeurs respirent par des gaz d'explosion ou d'échappement. Il se fixe aux molécules d'hémoglobine à la place de l'oxygène et provoque ainsi une asphyxie interne, à laquelle le cœur et le cerveau sont particulièrement sensibles. Les intoxications graves peuvent provoquer des séquelles tardives ou même être mortelles.

Les premiers symptômes subjectifs de l'intoxication au monoxyde de carbone sont des céphalées, des vertiges, des palpitations, une dyspnée d'effort, souvent aussi des bourdonnements d'oreilles, des éblouissements et des nausées. Par la suite survient un état ébrié suivi de crampes musculaires, d'un collapsus et d'un coma (cf. tableaux 5 et 6).

Concentration en CO (ppm)	pCO (mbar)	HbCO (%)	Conséquence physiologique
400	0,4	7,2	Aucune
800	0,8	14,4	Céphalée, fatigue, halètement
1600	1,6	29,0	Confusion, collapsus en cas d'effort physique
3200	3,2	58,0	Perte de connaissance
4000	4,0	72,0	Coma profond
4500	4,5	81,0	Décès

Tableau 5 Relation dose-effet du monoxyde de carbone

Teneur de CO en volume (%)	Pression ambiante (bar)	pCO (mbar)	Conséquence physiologique
0,05	1	0,5	Aucune
0,05	2	1,0	Symptômes légers
0,05	3	1,5	Collapsus possible
0,05	4	2,0	Symptômes modérés à graves

Tableau 6 Relation dose-effet du CO en relation avec la pression ambiante

4.4. Augmentation de la pression partielle d'oxygène

4.4.1. Effets sur les voies respiratoires et les poumons

Une exposition prolongée à une pression partielle d'oxygène de 0,5 à 1 bar provoque une irritation des voies respiratoires supérieures: œdème des muqueuses nasopharyngées, sécheresse de la gorge, enrouement, toux avec expectorations et douleurs rétrosternales. Si la pression partielle d'O₂ reste élevée, il se produit des atelectasies (collapsus de certaines parties des poumons) et un œdème pulmonaire, d'abord interstitiel puis intra-alvéolaire (effet Lorrain-Smith).

Les effets secondaires pulmonaires de l'oxygène mettent plusieurs heures à apparaître lorsque la pression partielle est inférieure à 1 bar. La pression partielle d'oxygène ne doit donc pas dépasser 0,4 à 0,5 bar lorsque la durée d'immersion est prolongée, par exemple pour la plongée à saturation.

4.4.2. Effets sur le système nerveux central

Quand sa pression partielle dépasse 2 bars, l'oxygène est toxique pour le système nerveux central. Les effets toxiques peuvent se produire en quelques minutes seulement dans certaines circonstances, par exemple lors d'un effort physique important: trémulations musculaires, paresthésies des lèvres et du bout des doigts, rétrécissement du champ visuel (scotome) et nausées (effet Paul Bert). Des vertiges surviennent également, mais ils sont moins prononcés lorsque l'on nage que lorsque l'on est assis, par exemple dans un caisson hyperbare. Enfin, des crises convulsives épileptiformes généralisées se produisent, sans être toujours précédées de signes précurseurs (aura). La sensibilité du système nerveux central à l'intoxication par l'oxygène varie selon les individus, mais aussi en fonction de la forme physique d'un sujet donné un jour précis. Les effets de l'oxygène sur le cerveau disparaissent dès que la pression partielle revient à une valeur normale.

4.4.3. Les dangers de l'intoxication par l'oxygène

L'air atmosphérique normal contient 20,95 % en volume d'oxygène à une pression partielle de 0,21 bar. A 10 m de profondeur, cette pression est double, soit 0,42 bar, et à 40 m elle atteint 1 bar, ce qui correspond à celle de l'oxygène pur en surface. Si la plongée se fait à l'oxygène pur, par exemple avec un appareil à circuit fermé, la pression partielle atteint déjà 2 bars à 10 m de profondeur. La majorité des auteurs estime aujourd'hui qu'une pression partielle de 1,4 bar, et dans tous les cas 1,6 bar, est un seuil critique. Il ne faut donc jamais plonger à plus de 6 m (pression absolue de 1,6 bar) avec de l'oxygène pur, au risque de s'exposer à une intoxication potentiellement mortelle (voir le point C 4.4.). Si l'on utilise de l'air comprimé, la pression partielle critique de 1,6 bar d'oxygène n'est atteinte qu'à 66 m de profondeur.

Il arrive que l'on utilise de l'oxygène pur pour la décompression après les

plongées prolongées et, par principe, lors des travaux en milieu hyperbare, afin d'accélérer l'élimination de l'azote dissous dans le sang et les tissus. Pour les plongeurs, cette méthode nécessite des installations d'alimentation particulières (alimentation par la surface avec un tuyau, ou par une bouteille supplémentaire appelée bouteille relais). La pression partielle d'oxygène ne doit alors pas dépasser 1,6 bar. Pour la décompression en caisson lors des travaux en milieu hyperbare, en revanche, elle peut atteindre au maximum 2,2 bars parce que le caisson se trouve à la surface, ce qui élimine le risque de noyade et permet d'intervenir rapidement en cas d'incident.

4.5. Tolérance à l'oxygène: unité de dose pulmonaire toxique (UPTD)

L'exposition prolongée à un gaz respiratoire enrichi en oxygène peut provoquer une fibrose pulmonaire (cf. C 4.4.1). Ce risque doit être connu et surveillé en particulier lors des décompressions régulières à l'oxygène. On parle dans ce contexte d'unités de dose pulmonaire toxique (UPTD pour «units of pulmonary toxic dosis»), 1 UPTD correspondant à l'inhalation d'oxygène pur sous une pression de 1 atmosphère pendant 1 minute. La durée maximale d'exposition à l'oxygène est généralement déterminée à l'aide des tableaux NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration aux Etats-Unis). D'autres publications donnent les paramètres de calcul précis. L'enregistrement des UPTD est surtout important du point de vue de la médecine préventive dans le cas des plongeurs professionnels et des travailleurs en milieu hyperbare.

5. La mort en plongée

5.1. Mort pendant ou immédiatement après la plongée

L'épuisement, l'hypothermie, l'hypoxie, une maladie préexistante, un œdème pulmonaire dû à une intoxication par l'oxygène ou un barotraumatisme négatif pulmonaire peuvent être une cause directe ou secondaire de noyade mortelle. L'hydrocution mortelle («congestion») qui fait couler à pic un nageur résulte d'un réflexe vasomoteur vagal. Elle est favorisée par la pénétration brusque dans de l'eau froide, par le fait de «retenir son souffle», par un estomac plein, par la peur et la panique, et débouche elle aussi sur la noyade. La panique est cependant la cause principale de nombreux accidents mortels de plongée. Elle entraîne des erreurs de comportement et, pour finir, une inspiration et la noyade, d'autant plus lorsque le plongeur est inexpérimenté ou mal formé.

Dans 10 à 15% des cas, la mort par noyade est due à une simple asphyxie, sans pénétration d'eau dans les poumons, lorsque le stimulus exercé par l'eau sur le larynx provoque une violente constriction de la glotte. Le plus souvent, le plongeur aspire cependant de l'eau après une courte apnée. Même si tous les alvéoles ne sont pas remplis d'eau, l'oxygénation du

sang dans les poumons n'est plus suffisante et il en résulte une hypoxie tissulaire. Lorsque celle-ci est subite et généralisée, elle entraîne des lésions cérébrales qui entraînent la mort en 4 à 5 minutes. Les hypoxies moins marquées provoquent, selon leur importance et leur durée, des troubles du rythme cardiaque, une hypotonie et des états de choc avec lésions des organes cibles. Ces atteintes sont réversibles si elles sont traitées à temps.

Si c'est de l'eau douce qui pénètre dans les alvéoles, elle passe en grande quantité dans le sang, en raison de l'importante différence de pression osmotique, et peut considérablement diluer celui-ci. Elle dilue en outre le surfactant pulmonaire et endommage l'épithélium alvéolaire, causant ainsi un œdème pulmonaire secondaire. Cet œdème, parfois associé à des atelectasies, perturbe les conditions de ventilation et de perfusion, nuit à l'oxygénation du sang et provoque une hypoxie (ou aggrave une hypoxie déjà présente). La forte dilution du sang peut également provoquer une hémolyse osmotique. Le potassium relargué par les érythrocytes s'associe à l'hypoxie pour provoquer des arythmies cardiaques, notamment un flutter ventriculaire.

L'eau de mer, pour sa part, est hypertonique par rapport au sang. Elle attire celui-ci dans l'espace alvéolaire, ce qui provoque un œdème pulmonaire et parfois une hypovolémie dans la circulation. Comme lors de l'aspiration d'eau douce, le premier mécanisme pathogène lors de la pénétration d'eau de mer dans l'appareil respiratoire est l'hypoxie. Selon la situation, celle-ci peut s'accompagner d'autres troubles fonctionnels et lésions organiques, affectant principalement le système nerveux central, le cœur et les reins.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre B, point 1.1.6, l'eau conduit 25 fois mieux la chaleur que l'air. Lors d'un séjour prolongé dans l'eau froide, la température corporelle baisse graduellement, et plus rapidement si le plongeur bouge car il empêche ainsi la formation à la surface de son corps d'une couche d'eau isolante et réchauffée.

Le corps commence par augmenter sa production de chaleur en frissonnant et freine le refroidissement des organes vitaux (température centrale) par une vasoconstriction périphérique. Si la température de la peau baisse en dessous de 10 °C, les vaisseaux cutanés se dilatent et la déperdition de chaleur s'accélère. La conscience baisse elle aussi. Si la température centrale baisse en dessous de 28 °C, le centre respiratoire est inhibé et une fibrillation ventriculaire survient.

L'hypothermie est un cofacteur important dans de nombreux accidents de plongée survenus en Suisse.



D

Prévention et traitement des accidents de plongée et de compression



1. Examens d'aptitude et de contrôle

Seules les personnes en bonne santé et en pleine forme physique devraient se livrer à la plongée sous-marine ou travailler en milieu hyperbare (tableau 7). Le moindre problème de santé peut être fatal, surtout lors d'une plongée, qu'il s'agisse non seulement de maladies physiques aiguës ou de troubles chroniques pouvant causer des crises, mais aussi de problèmes psychiques. Une personne angoissée ou cédant facilement à la panique se met en danger elle-même, mais peut évidemment être dangereuse aussi pour ses compagnons de plongée.

Critères d'aptitude à la plongée de loisirs

- natation autonome
- maturité mentale qui gage d'un sens des responsabilités
- exclusion de pathologies qui peuvent déclencher un trouble de la conscience ou une désorientation
- exclusion de pathologies dont les symptômes déclenchent facilement une panique
- exclusion de pathologies pouvant causer un barotraumatisme
- exclusion de pathologies susceptibles d'être aggravées par la pratique de la natation

Table 7 Principaux critères d'aptitude à la plongée (source: Manuel d'aptitude à la plongée de la SUHMS)

Il est recommandé, pour cette raison, que tous les plongeurs sportifs se soumettent à des examens médicaux d'aptitude réguliers. Il est important que ces contrôles soient réalisés par des médecins possédant des connaissances suffisantes de la plongée, afin qu'ils puissent évaluer et conseiller les plongeurs avec compétence. Cette condition est tout particulièrement importante dans le cas des enfants et des personnes handicapées, qui ont aujourd'hui accès eux aussi au monde sous-marin, moyennant quelques aménagements.

A la différence des plongeurs sportifs, les plongeurs professionnels et les travailleurs en milieu hyperbare ont l'obligation légale de se présenter à des examens médicaux d'aptitude réguliers (art. 72 al. 3 et art. 73 OPA). Ces examens sont prescrits et organisés par la Suva dès que l'employeur lui a transmis la déclaration correspondante. Ils sont effectués par des médecins praticiens possédant de préférence une bonne connaissance de la médecine de la plongée et de la médecine hyperbare. Les grilles d'évaluation et les intervalles de contrôle sont déterminés par la Suva, sur la base des directives de l'European Diving Technology Committee (EDTC).

Le premier examen (examen de base) doit avoir lieu avant le début du travail. Il sera ensuite répété tous les cinq ans jusqu'à l'âge de 45 ans, avec un simple contrôle rapide les autres années. A partir de 45 ans, le suivi est intensifié, avec un examen de base tous les 24 mois. Cette nouvelle organisation correspond à celle fixée par la Suva pour les personnes exposées à la chaleur et va dans le sens d'une meilleure modularité des examens de médecine du travail.

Le premier examen et l'examen de base comprennent un relevé complet des antécédents médicaux, un examen neurologique, ORL et cardiovasculaire, une spirométrie et une épreuve d'effort. Les résultats transmis à la Suva sont examinés par les médecins spécialistes de la division médecine du travail, qui évaluent l'aptitude du sujet aux travaux en plongée et en milieu hyperbare. En cas de doute, la Suva demande des examens complémentaires, en concertation éventuellement avec les médecins examinateurs. Si cela est indiqué, les intervalles entre les examens de base peuvent être raccourcis.

Les frais des examens et la perte de salaire éventuelle sont pris en charge par la Suva.

2. Formation

2.1. Plongeurs sportifs

En règle générale, les plongeurs sportifs débutants suivent une formation. Bien qu'il n'existe aucune obligation légale en ce sens, tous les clubs de plongée proposent aujourd'hui cette initiation. Chaque plongeur sportif a tout intérêt, même s'il n'y est pas obligé, à acquérir les connaissances nécessaires sur les particularités physiques du milieu subaquatique, à en connaître les dangers et à apprendre les méthodes qui lui permettront de planifier correctement ses plongées et de plonger sans accident.

Les principes de la formation sont dans une grande mesure les mêmes dans le monde entier. Pour la plongée de loisirs, quatre grandes organisations mondiales définissent les principes et niveaux de formation sur tous les continents et délivrent des brevets (Association professionnelle des Instructeurs de plongée (PADI); Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques (CMAS); National Association of Underwater Instructors (NAUI); Scuba Schools International (SSI)). En Europe, les écoles de plongée peuvent faire certifier leur formation et leur brevet, par exemple, par la Fédération européenne des sports sous-marins (EUF). Les brevets certifiés par l'EUF sont reconnus par les grandes organisations (EN 14153 pour les brevets une, deux et trois étoiles et EN 14413 pour les instructeurs de plongée).

2.2. Plongeurs professionnels

En Suisse, l'activité de plongeur professionnel n'est pas un métier reconnu par l'Office fédéral de la formation professionnelle et de la technologie. Il n'existe donc pas de programmes de formation ni de certificat fédéral de capacité. Les plongeurs professionnels sont donc formés par les entreprises privées qui les emploient.

Il existe en revanche des formations et des certificats reconnus pour les plongeurs professionnels dans de nombreux autres pays. Il existe même des fédérations internationales regroupant des écoles de plongée professionnelle.

2.3. Travailleurs en milieu hyperbare

Les personnes travaillant en milieu hyperbare ne bénéficient pas d'une formation particulière, mais il est indispensable que leur employeur les avertisse des particularités et des dangers de ce milieu et les informe de manière adéquate et suffisante des mesures de prévention. Lorsque, après l'examen médical d'aptitude de la Suva, une personne doit travailler pour la première fois en milieu hyperbare, son employeur doit lui faire effectuer un essai de passage par le sas. Il doit en outre garder une trace écrite de l'initiation et de l'essai de passage dans ce sas.

Certaines fonctions, par exemple celles de «responsable de travaux en milieu hyperbare» ou de «surveillant de sas», doivent faire l'objet d'une formation avec contrôle des connaissances.

3. Tables de décompression

Les bulles de gaz qui se forment dans le sang et les tissus ne sont suffisamment grosses, et donc potentiellement dangereuses, que lorsque la pression externe agissant sur le corps diminue plus rapidement que la vitesse à laquelle les gaz dissous dans les tissus peuvent être évacués par le sang vers les poumons et rejetés avec la respiration. Les bulles ne se forment cependant que si un certain niveau de sursaturation est dépassé. Le temps de remontée, autrement dit de décompression, doit donc être spécialement calculé pour éviter la formation de bulles potentiellement dangereuses. Des tables de décompression ont été élaborées avec l'expérience dans ce but précis, et il importe de les respecter. Elles indiquent le nombre, la profondeur et la durée des paliers et des arrêts de sécurité, qui dépendent pour leur part de la durée et de la profondeur de la plongée ou de l'exposition à une surpression. La vitesse de remontée entre les paliers y est également donnée.

On entend par «temps zéro» la durée maximale d'une plongée à une certaine profondeur, y compris le temps de descente (= de compression), jusqu'à laquelle une plongée peut se prolonger avec un seul arrêt de sécurité, autrement dit sans palier de décompression proprement dit. Ces plongées sont dites «sans décompression obligatoire».

Les tables de décompression ne peuvent pas être calculées avec une exactitude scientifique parce que le corps humain est un système biologique complexe, qui présente de nombreuses variables difficiles à appréhender précisément. Elles sont donc empiriques et reposent sur de longues années d'observation, d'études expérimentales et de réflexions théoriques, qui ont abouti à des modèles mathématiques reproduisant au plus près la décompression la moins risquée possible. Cela explique aussi pourquoi il existe des tables différentes qui ne sont pas dictées uniquement par les conditions aux limites. Pour choisir une table de décompression adaptée, on tiendra compte en priorité de l'expérience que l'on a eue par le passé avec celle-ci et du fait qu'elle a été utilisée pour un grand nombre de plongées ou de compressions avec un faible taux d'accidents. Outre la sécurité, les autres critères de choix comprennent l'utilisation prévue et l'adaptabilité du modèle de calcul de la table aux éventuelles modifications des conditions aux limites. Les tables de décompression comportent une marge de sécurité qui tient compte, entre autres, des différences individuelles telles que les variations de la pression atmosphérique dans la zone d'altitude en question.

La table établie par Albert Bühlmann, ancien médecin de la plongée et professeur de physiopathologie à la Faculté de médecine de Zurich, est un exemple de table de décompression répondant à ces critères. Son modèle mathématique, basé sur les travaux antérieurs de Haldane, tient compte de la demi-vie de l'azote dans seize tissus différents pour la respiration à l'air (ZH-L16) mais peut aussi être utilisé pour d'autres mélanges de gaz respiratoires et pour la plongée à différentes altitudes. Le modèle de Bühlmann existe aujourd'hui (avec parfois des modifications) sous la forme d'un algorithme de calcul sur de nombreux ordinateurs de plongée (voir le chapitre C, point 3.1.2.)

La table de Bühlmann prévoit des paliers de décompression ou des arrêts de sécurité tous les trois mètres. Le temps zéro est illimité jusqu'à 10 m; il est de 125 minutes (avec des différences selon les versions de la table) à 12 mètres, de 75 minutes à 15 mètres, de 35 minutes à 21 mètres, de 17 minutes à 30 mètres, etc. (tableau 8).

Comme l'azote excédentaire reste dissous dans les fluides corporels à l'issue d'une plongée mais aussi lors de la décompression, les tables de Bühlmann prévoient un supplément de temps pour les plongées répétées sur une période de 24 heures au maximum. La plongée répétée et la décompression sont allongées par le calcul. Le supplément de temps dépend du groupe de répétition initial et de l'intervalle de temps entre les plongées. Il est indiqué dans une table supplémentaire.

Profondeur m	Durée de base en min	Remontée jusqu'au 1 ^{er} palier min	Paliers			Durée to- tale de la remontée en min	GR
			9m	6m	3m		
12	125	1			1	2	G
	150	1			4	5	G
	180	1			10	11	H
15	75	1			1	2	G
	90	1			7	8	G
	105	1			10	11	H
	120	1			16	17	H
	150	1			27	28	H
18	51	2			1	3	F
	60	2			5	7	F
	70	2			11	13	G
	80	2			18	20	G
	90	2			21	23	H
21	35	2			1	3	D
	40	2			2	4	E
	50	2			8	10	F
	60	2			16	18	G
	70	2			24	26	G
	80	2		2	26	30	H
24	25	2			1	3	E
	35	2			4	6	F
	40	2			8	10	F
	50	2			17	19	G
	60	2		4	24	30	G
	75	2		10	29	41	H
27	20	3			1	4	E
	30	3			5	8	F
	35	3			10	13	F
	40	2		2	13	17	G
	45	2		3	18	23	G
	50	2		6	22	30	G
	60	2		11	26	39	H
30	17	3			1	4	D
	25	3			5	8	E
	30	2		2	7	11	F
	35	2		3	14	19	G
	40	2		5	17	24	G
	45	2		9	23	34	G
	50	2		1	10	28	41

Tableau 8 Exemple tiré de la table de décompression de Bühlmann (version de 1986) pour la plage d'altitude de 0 à 700 m au-dessus du niveau de la mer. Les groupes de répétition (GR) désignés par des lettres indiquent les taux d'azote résiduels après la décompression. Ils doivent être pris en compte comme suppléments de temps pour les plongées suivantes, et nécessitent donc un tableau spécial (l'extrait du tableau reproduit ici n'est pas destiné à une utilisation pratique).

La pression de l'air est plus basse à la surface des lacs de montagne et la baisse de pression lors de la remontée est donc plus importante. Tous les temps de décompression sont donc allongés. En conséquence, il existe des tables de décompression différentes pour différentes zones d'altitude.

Un vol en avion après une plongée constitue une décompression supplémentaire. Il ne faudra donc pas dépasser une certaine altitude de vol, en fonction de la durée et de la profondeur de cette plongée. Si on plonge une dernière fois en mer immédiatement avant de prendre un avion, des phénomènes de décompression se produisent souvent pendant le voyage. Il est donc conseillé d'attendre 24 heures entre la dernière plongée et le premier vol.

Le risque de formation de bulles dangereuses dans le corps et d'accident de décompression ne peut être réduit à un niveau négligeable (risque résiduel acceptable) que si toutes les règles évoquées ici et définies dans les tables de décompression sont respectées.

Il existe des tables spécifiques pour les travailleurs en milieu hyperbare, mais aussi pour le personnel des caissons d'OHB¹. Celles-ci sont adaptées aux conditions de travail et généralement destinées à accélérer l'élimination de l'azote à partir d'une surpression inférieure ou égale à 1 bar, par l'inhalation d'oxygène pur (cf. chapitre C, point 4.4.3.).

4. Equipement de plongée et planification de la plongée

Le séjour et le travail sous l'eau créent des dangers considérables en raison des conditions ambiantes particulières (cf. chapitre A 1.). Des mesures de sécurité doivent donc être prévues lors de la planification de la plongée et du choix de l'équipement, ce dernier permettant de réduire les handicaps inhérents aux conditions de telle façon que l'on puisse travailler avec un risque résiduel acceptable.

Ainsi, les plongeurs professionnels sont alimentés depuis la surface par un système combiné appelé ombilical (ou narguilé), qui leur fournit le gaz respiratoire et l'énergie éventuellement nécessaire et inclut une ligne de téléphone ou éventuellement de communication vidéo. Cet ombilical est en outre conçu de façon à pouvoir servir en même temps de corde de sécurité. Un plongeur de secours se tient prêt à intervenir en cas d'incident. Le plongeur professionnel peut ainsi, à la différence du plongeur sportif, se concentrer complètement sur son travail, tandis que lui-même et ses paramètres de plongée sont surveillés depuis la surface par un superviseur. En Suisse, le superviseur est appelé signaleur ou, selon l'ordonnance sur la sécurité des travailleurs lors de travaux en milieu hyperbare, responsable des travaux en milieu hyperbare. Cette ordonnance, en cours de rédaction, doit se substituer à l'ancienne ordonnance de 1961 concernant les mesures techniques de prévention des accidents et des maladies professionnelles lors de travaux dans l'air comprimé (RS 832.311.12).

En revanche, le plongeur sportif veut disposer d'une liberté maximale pour organiser sa plongée. Il est donc exclu qu'il s'entoure de mesures de sécurité professionnelles. Il est alors d'autant plus important qu'il s'en

¹ OHB = oxygénothérapie hyperbare, c'est-à-dire administration thérapeutique d'oxygène sous pression augmentée.

tienne aux limites des compétences acquises au cours de sa formation et soit en mesure d'utiliser lui-même les équipements techniques nécessaires pour surmonter un incident, même si cela n'est pas obligatoire.

4.1. Tenues et accessoires

L'équipement le plus simple est celui utilisé pour le PMT: palmes, masque de plongée (lunettes avec pince-nez) et tuba.

L'équipement de plongée proprement dit est plus complexe. Il comprend une alimentation en gaz respiratoire avec un détendeur (cf. chap. B 1.6) et, sous nos climats, une tenue de plongée. Les combinaisons dites «humides» sont faites de néoprène dans lequel des inclusions d'air créent un effet isolant. Elles laissent l'eau pénétrer au niveau du col, des poignets et des chevilles. Il se forme ainsi entre le corps du plongeur et sa tenue un film d'eau stationnaire qui a, lui aussi, un effet isolant. La tenue est complétée par des chaussons et des gants en néoprène et parfois d'une cagoule.



Figure 20 Le gilet stabilisateur est un élément important de l'équipement des plongeurs sportifs. Il peut être rempli d'air à l'aide d'un petit tuyau à partir de la bouteille de gaz respiratoire (non visible dans l'illustration). On peut aussi le gonfler en soufflant avec l'embout intégré (raccord de gonflage sur le tuyau plissé). Le bouton rouge permet de laisser échapper l'air. Le plongeur peut ainsi contrôler sa flottabilité à toutes les profondeurs. *Ill.: société Scubapro*

Le gilet de stabilisation ou gilet stabilisateur est un élément secondaire de l'équipement, qui communique avec la bouteille de gaz respiratoire et peut être plus ou moins gonflé via une valve, en fonction des besoins (fig. 20). Ce gilet équilibre la flottabilité et la tendance à couler en fonction de la profondeur, afin que le plongeur puisse se maintenir à tout moment entre deux eaux. L'équipement comprend enfin une ceinture lestée pour faciliter la descente et un couteau (pour se libérer des plantes et autres obstacles dans lesquels le plongeur peut se prendre les jambes). Selon le type et la profondeur de la plongée, d'autres pièces d'équipement peuvent être nécessaires, par exemple une lampe ou une boussole.

A la différence de la combinaison de plongée «humide», le scaphandre «sec» est complètement étanche à l'eau. Le plongeur porte des sous-vêtements isolants en dessous. Le corps est séparé de la combinaison par un volume d'air que l'on s'efforce de maintenir aussi constant que possible, ce qui rend nécessaire des injections et évacuations d'air lors des changements de profondeur. En cas d'urgence, le scaphandre peut aussi être utilisé comme moyen de remontée de secours. Son maniement nécessite toutefois une plus grande habileté que la combinaison autonome et il n'est donc pas adapté aux débutants.

4.2. Alimentation en air comprimé ou en gaz respiratoire

L'air nécessaire à la plongée est comprimé et transporté dans des bouteilles en acier, en aluminium ou en matériaux composites pour la plongée sportive. Ce dernier type de bouteilles se compose d'une mince paroi intérieure métallique, recouverte d'une couche de plastique armé de fibres de verres. Elle peut supporter des pressions de remplissage plus élevées. Les bouteilles sont fixées sur une plaque dorsale avec le gilet stabilisateur et se portent à la manière d'un sac à dos. Elles contiennent en général 10, 15, au maximum 20 litres sous une pression d'au moins 200 bars à pleine charge, ce qui correspond à 2000 à 4000 litres d'air, voire davantage, à la pression normale. Selon la plongée prévue, on emporte une ou deux bouteilles.

S'y ajoute le détendeur à deux étages, un détendeur de réserve (octopus), un ordinateur de plongée (voir ci-dessous) ainsi qu'un finimètre qui indique la réserve d'air dans les bouteilles, un profondimètre et une montre. Toutefois, le seul moyen de se prémunir complètement d'une panne, c'est de plonger avec deux bouteilles totalement séparées, munies chacune de son détendeur.

4.3. Ordinateur de plongée

Autrefois, avant de plonger, il fallait réfléchir à la profondeur à atteindre et à la durée de la plongée, calculer à partir de là le temps de décompression nécessaire à l'aide des tables de décompression, et déterminer ainsi la réserve d'air nécessaire.

Aujourd'hui, tous les plongeurs ou presque utilisent un ordinateur de plongée, qui se porte au poignet comme une montre (fig. 21). Cet appareil mesure tous les paramètres importants: pression atmosphérique, pression de l'eau (pour le calcul de la profondeur), temps, etc. Le programme de calcul détermine les paliers de décompression et arrêts de sécurité nécessaires lors de la remontée et affiche différents avertissements, par exemple en cas de dépassement du temps zéro ou de remontée trop rapide. Les modèles perfectionnés, dits à intégration des gaz, surveillent en outre la consommation de gaz respiratoire et indiquent à tout moment le temps de plongée restant. Les ordinateurs de plongée peuvent aussi être programmés pour l'utilisation de nitrox et d'autres mélanges gazeux. Ils peuvent calculer des profils de plongée complexes (plongées multi-niveaux), qui étaient presque impossibles autrefois avec les tables de décompression. Ils ont donc rendu la plongée plus facile. Cela ne veut pas dire que l'on puisse se dispenser de la planification des plongées, même s'il ne faut plus calculer les temps de décompression à l'avance. Les plongeurs doivent garder à l'esprit que la plongée «à l'ordinateur» leur laisse des marges de sécurité plus étroites que la plongée «aux tables», en particulier pour les plongées multi-niveaux, parce que les tables ne permettent de prendre en compte que les profils rectangulaires jusqu'à la profondeur maximale.



Figure 21 Ordinateur de plongée, un instrument fixé au poignet ou à un tuyau d'air comprimé qui enregistre, entre autres, le temps de plongée, la pression ambiante et la profondeur instantanée, ainsi que la réserve restante de gaz respiratoire. Sur cette base, l'appareil indique au plongeur jusqu'à quand il peut se maintenir en deçà du temps zéro ou quels paliers de décompression il devra respecter.

Ill.: Ernst Voellm, Kilchberg

5. Alerte et premiers secours en cas d'accidents de plongée et de surpression

Au moment de planifier une plongée, il est important de se demander ce que l'on fera en cas d'accident. Selon le site, il faudra avoir sous la main les bons numéros de téléphone des services de secours. Cette précaution peut être cruciale à l'étranger. Il importe également d'apprendre et de pratiquer régulièrement les gestes de premiers secours généraux et d'autres plus spécifiques de la plongée et des milieux hyperbares. En cas d'accident de plongée, l'administration d'oxygène normobare au moyen d'un masque, après contrôle et soutien des fonctions vitales, est la mesure thérapeutique d'urgence la plus importante. Elle doit être mise en place dès que possible et maintenue jusqu'à la prise en charge par les secours. Tous les plongeurs sportifs, en particulier ceux qui plongent en groupe, ont donc intérêt à emporter un respirateur à oxygène, à en apprendre le maniement et à le tenir prêt sur le lieu de plongée (fig. 22).



Figure 22 Ventilation à l'oxygène normobare en urgence sur un cas soupçonné d'accident de décompression. Ce traitement peut être administré avec des appareils en circuit fermé avec recycleur et absorbeur de CO₂ qui permettent d'économiser une quantité considérable d'oxygène.

Ill.: M. Rüeegger, M. Oehler, Ch. Wölfel

Dans tous les cas nécessitant l'intervention d'un médecin en Suisse, il est possible d'appeler le numéro d'urgence de la Rega au 1414, en donnant le mot-clé «accident de plongée». Si l'on appelle le 144, il faut avoir à l'esprit qu'une ambulance pourra dans certains cas venir chercher la victime sur le lieu de l'accident pour l'emmener à l'hôpital le plus proche. Il est cependant douteux que celui-ci soit équipé d'un caisson hyperbare ou même qu'il dispose d'un personnel compétent en médecine de plongée et hyperbare, d'où beaucoup de temps perdu en transferts. En revanche, la Rega est en mesure de transporter les victimes d'accidents de plongée au centre de traitement le plus proche en hélicoptère ou, si cela est suffisant, en ambulance. Le seul centre de traitement à ce jour en Suisse, ouvert 24 heures sur 24, se trouve à Genève. Les patients du nord-est et du sud de la Suisse doivent par conséquent être transportés dans les régions frontalières voisines.

La Rega sert en outre de centrale d'urgence pour le «Divers Alert Network (DAN)» et peut alerter un médecin de garde spécialisé en cas d'accidents de plongée en Suisse ou à l'étranger. Ce médecin de garde du DAN peut donner immédiatement des instructions par téléphone.

Les principes de secours immédiat sont les mêmes pour les équipes chargées de travaux en milieu subaquatique, qui doivent obligatoirement disposer d'un plan d'urgence définissant clairement les premiers secours et les mesures de sauvetage.

Les concepts d'urgence et de sauvetage font aussi obligatoirement partie intégrante de la planification et de l'exécution des chantiers en milieu hyperbare. Les entreprises concernées doivent en outre faire appel à un médecin qualifié en médecine de la plongée et en milieu hyperbare, aussi bien pour le conseil technique que pour les situations d'urgence. Selon le projet de plongée ou le chantier, il est aussi utile de prévoir un caisson thérapeutique dont l'installation et l'utilisation relèvent de la responsabilité de l'entreprise. La Suva accompagne ces projets dans le cadre de la sécurité au travail.

On trouvera plus de précisions dans l'ordonnance sur la sécurité des travailleurs lors de travaux en milieu hyperbare, actuellement en révision.

6. Traitement professionnel des accidents de plongée et de surpression

Le traitement proprement dit se déroule en caisson hyperbare thérapeutique, selon les programmes prescrits, après un rapide relevé des antécédents et un examen en urgence. La partie principale du traitement en caisson est la recompression avec administration d'oxygène, limitée à une pression maximale absolue de 2,8 bars (soit une surpression de 1,8 bar) en raison de sa toxicité. De l'oxygène est ainsi administré à la victime de l'accident à intervalles de 20 minutes. Au bout de 75 minutes, la pression est réduite de 1,8 à 0,9 bar et l'oxygénothérapie est poursuivie, aux mêmes intervalles, jusqu'à une durée totale de 255 minutes. La pression peut ensuite être réduite très progressivement jusqu'à la pression ambiante. Les intervalles d'administration sont séparés par des pauses de 5 minutes où la ventilation se fait à l'air, afin d'éviter d'éventuels effets toxiques de l'oxygène.



Figure 23a Exemple de caisson thérapeutique installé dans un conteneur sur un chantier.

Ill.: PraderLosinger SA/Nordseetaucher GmbH



Figure 23b Poste de commande et de surveillance pour l'opérateur du caisson.

Ill.: PraderLosinger SA/Nordseetaucher GmbH

Ce schéma thérapeutique correspond à la table de décompression 6 de la marine militaire américaine (TS 260-80), dont il existe différentes variantes dans lesquelles la limite de pression totale de 2,8 bars pour l'oxygène pur est parfois dépassée, auquel cas d'autres gaz, par exemple de l'hélium, sont utilisés par intermittence. Si les douleurs subsistent ou si l'état général de la victime ne s'améliore pas, le traitement peut être répété, selon le même schéma ou avec de légères modifications. On se reportera à la littérature spécialisée pour plus de précisions.



Figure 24a, b Caisson thérapeutique à l'hôpital, pouvant accueillir dans chaque unité 8 patients assis ou 3 couchés pour une ventilation à l'oxygène pur. Ce dispositif nécessite d'importants moyens de surveillance.

Illustrations Julien Gregorio et Dr J.-Y. Berney



E
Droit des
assurances



1. L'accident

L'article 4 de la loi fédérale sur la partie générale du droit des assurances sociales (LPGA) donne la définition suivante d'un accident:

Est réputé accident toute atteinte dommageable, soudaine et involontaire, portée au corps humain par une cause extérieure extraordinaire.

La notion d'accident est donc de nature juridique. Elle n'est pas toujours synonyme du terme médical de traumatisme, en particulier dans le cas de la plongée.

Pour qu'un événement soit considéré comme un accident, les cinq éléments de la définition doivent être présents. Il suffit qu'un seul d'entre eux fasse défaut pour que l'assurance-accidents ne couvre plus l'événement.

L'application du critère de **soudaineté** mène avant tout à l'élimination des maladies ordinaires et des petites agressions répétées, qui à elles seules ne provoquent pas de lésions. C'est l'événement causal qui doit être soudain, et non l'apparition des troubles de santé.

La qualification **extraordinaire** signifie que la cause de l'accident dépasse manifestement les circonstances quotidiennes. Les événements extérieurs banals ne constituent pas des accidents. Dans la mesure où une plongée entraîne, par nature, une augmentation et une diminution ainsi que des variations de la pression, ces phénomènes ne sont pas considérés comme extraordinaires.

La cause devant être **extérieure**, il en découle qu'une affection résultant d'une cause qui réside dans le corps humain lui-même n'est pas couverte par l'assurance.

Il doit y avoir une relation de causalité adéquate entre l'événement accidentel et les troubles de santé. En d'autres termes, celui-là doit être la cause décisive de ceux-ci. Les barotraumatismes se produisent généralement lorsque l'égalisation de la pression dans un organe creux ne se fait pas, pour des causes inhérentes au corps du plongeur. Ils ne constituent donc des accidents, au sens de la loi, que s'ils ont été précédés par une variation de la pression inhabituelle ou extraordinaire.

Les séquelles d'un accident de décompression ne répondent pas non plus, en règle générale, à la définition d'un accident. Elles ne peuvent être considérées comme accidentelles que si les consignes de décompression n'ont pas pu être respectées à cause d'un danger extraordinaire en profondeur ou de la nécessité de secourir un autre plongeur.

Il y a bien accident, en revanche, si l'on inhale involontairement de l'eau et que celle-ci provoque des troubles de santé ou, dans le pire des cas, une noyade (cf. chapitre C 5).

2. Lésions corporelles assimilées à un accident

Il existe différentes lésions qui ne sont pas la conséquence d'un accident au sens défini ci-dessus, mais qui ne peuvent pas non plus être considérées comme des maladies. C'est pour ces affections «ambiguës» que l'on a créé le concept de «lésion corporelle assimilée à un accident». La loi fédérale sur l'assurance accident (LAA) ouvre un droit à prestations d'assurance pour ce type de lésions. L'ordonnance sur l'assurance-accidents associée à la LAA énumère de façon détaillée et exhaustive les lésions corporelles de ce type couvertes par l'assurance (art. 9, al. 2 OLAA). Ces lésions sont reconnues comme accidentelles si elles résultent d'un processus assimilable à un accident et si les douleurs apparaissent immédiatement. Dans le cas des plongeurs, il est intéressant de relever que l'alinéa 2 mentionne les lésions des tympanes, qui entrent donc dans le cadre de cette réglementation même lorsqu'elles sont la conséquence d'un barotraumatisme (qui ne correspond pas en lui-même à la définition d'un accident).

3. La maladie professionnelle

La LAA stipule, dans l'article 9 al. 1, concernant l'assurance des maladies professionnelles:

Sont réputées maladies professionnelles les maladies dues exclusivement ou de manière prépondérante, dans l'exercice de l'activité professionnelle, à certaines substances nocives ou à certains travaux. Le Conseil fédéral établit la liste de ces substances ainsi que celle de ces travaux et des affections qu'ils provoquent.

L'alinéa 3 précise que, sauf disposition contraire, *la maladie professionnelle est assimilée à un accident professionnel dès le jour où elle s'est déclarée. Une maladie professionnelle est réputée déclarée dès que la personne atteinte doit se soumettre pour la première fois à un traitement médical ou est incapable de travailler.*

La liste établie par le Conseil fédéral est donnée en annexe à l'article 9, al. 1 OLAA. Elle contient les maladies dues au travail dans l'air comprimé. Les affections dues à des variations de pression ambiante, telles que barotraumatismes ou accidents de décompression, sont donc assurées pour autant qu'elles soient en relation avec l'exercice d'un métier. L'expression «travail dans l'air comprimé» désigne non seulement les travaux en caissons ou autres espaces hyperbares, mais aussi la plongée professionnelle.

Comme il n'existe pas de «maladie professionnelle extraprofessionnelle», les lésions survenant lors d'une plongée non professionnelle doivent entrer dans la définition de l'accident ou satisfaire les critères d'une lésion corporelle assimilable à un accident pour donner droit aux prestations de l'assurance-accidents.

4. La négligence grave

Les accidents causés par une faute de l'assuré sont régis par l'article 37 LAA. Le deuxième alinéa de cet article précise, en particulier:

si l'assuré a provoqué l'accident par une négligence grave, les indemnités journalières versées pendant les deux premières années qui suivent l'accident sont réduites. La réduction ne peut toutefois excéder la moitié du montant des prestations lorsque l'assuré doit, au moment de l'accident, pourvoir à l'entretien de proches auxquels son décès ouvrirait le droit à des rentes de survivants ou lorsqu'il décède des suites de l'accident.

Au sens de cet article de la loi, la réduction des prestations est possible même quand les lésions consécutives à une plongée sont survenues dans des conditions où les critères de l'accident sont remplis. Celui qui contrevient de façon manifeste aux règles admises de la plongée, en plongeant seul ou avec un équipement mal entretenu ou en ne respectant pas les temps de décompression, doit donc s'attendre à une réduction des prestations.

Seuls les frais de guérison sont intégralement pris en compte en cas de négligence grave.

5. L'entreprise téméraire

L'art. 39 LAA stipule:

Le Conseil fédéral peut désigner les dangers extraordinaires et les entreprises téméraires qui motivent dans l'assurance des accidents non professionnels le refus de toutes les prestations ou la réduction des prestations en espèces.

Selon l'article 50 al. 2 LOAA, les entreprises téméraires sont celles par lesquelles l'assuré s'expose à un danger particulièrement grave sans prendre de mesures destinées à ramener celui-ci à des proportions raisonnables ou sans pouvoir prendre de telles mesures. Sont considérées comme entreprises téméraires, par exemple, les varappes extrêmement difficiles et les courses de montagne avec équipement insuffisant et entraînement lacunaire ou nul, mais aussi, en général, les plongées à l'air à plus de 40 mètres car elles comportent un danger d'ivresse des profondeurs. On peut penser en outre, de manière générale, que les problèmes augmentent considérablement, et avec eux les dangers, en proportion de la profondeur de plongée (par exemple lors de plongées techniques).

Cette limite de 40 mètres a été confirmée en 2010 lors d'une concertation entre différentes organisations de plongée suisses, d'une part, et des caisses d'assurance (dont la Suva), d'autre part. En pratique, la Suva prévoit une marge puisque la plongée à l'air comprimé n'est pas considérée comme une entreprise téméraire jusqu'à 50 m de profondeur si elle est pratiquée par des plongeurs exceptionnellement bien formés et expérimentés, ce qui n'est généralement le cas que pour les instructeurs de plongée.

A noter que les actes de sauvetage de personnes sont couverts par l'assurance même s'ils comportent une entreprise téméraire.

6. Assurance des plongeurs sportifs

Tout ce qui précède montre que la caisse d'assurance-accidents n'accepte les dossiers d'accidents survenus au cours de plongées non professionnelles que si la définition juridique de l'accident est respectée ou si les critères de lésions corporelles assimilables à un accident sont remplis. Afin d'éviter les défauts de couverture, nous recommandons à tous les amateurs de plongée de conclure un contrat d'assurance supplémentaire adapté.

F

Informations complémentaires



Bases légales

Loi fédérale du 6 octobre 2000 sur la partie générale du droit des assurances sociales (LPGA)

RS 830.1

Loi fédérale du 20 mars 1981 sur l'assurance-accidents (LAA)

RS 832.20

Ordonnance du 20 décembre 1982 sur l'assurance-accidents (OLAA)

RS 832.202

Ordonnance du 19 décembre 1983 sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles (OPA)

RS 832.30

Ordonnance du 20 janvier 1961 concernant les mesures techniques de prévention des accidents et des maladies professionnelles lors des travaux dans l'air comprimé

RS 832.311.12

Ordonnance du 29 juin 2005 sur la sécurité et la protection de la santé des travailleurs dans les travaux de construction (OTConst)

RS 832.311.141

Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail (CFST):
Appel à des médecins du travail et autres spécialistes de la sécurité au travail

Directive spéciale n° 6508

Présentations générales, manuels

Layon A.J., Modell J.H.: Drowning. Update 2009.
Anesthesiology 2009; 110: 1390–1401

Levett D.Z.H., Millar I.L.: Bubble trouble: a review of diving physiology and disease. Postgrad Med J 2008; 84: 571–578

Lynch H.J., Bove A.A.: Diving Medicine: A Review of Current Evidence.
J Am Board Fam Med 2009; 22: 399–407

Nussberger P., Knessl P., Wölfel Ch., Torti S.: Médecine de plongée: un abrégé, parties 1 et 2
Forum Med Suisse 2007; 7:970–974 et 990–993

Tetzlaff K., Thorsen E.: Breathing at Depth: Physiologic and Clinical Aspects of Diving while Breathing Compressed Gas.
Clin Chest Med 2005; 26: 355–380

Vann R.D., Butler F.K., Mitchell S.J., Moon R.E.: Decompression Illness.
Lancet 2010; 377: 153–64

Bühlmann A.A., Völlm E.B., Nussbergber P.: Tauchmedizin. Barotrauma, Gasembolie- Dekompression, Dekompressionskrankheit, Dekompressions-computer.
5^e édition, Springer Verlag, 2002

Ehm O.F., Hahn M., Hoffmann U., Wenzel J.: Der neue Ehm. Tauchen noch sicherer: Tauchmedizin für Freizeittaucher, Berufstaucher und Ärzte.
11^e édition, Pietsch Verlag, Stuttgart, 2011

Klingmann Ch., Tetzlaff K.: Moderne Tauchmedizin. Handbuch für Tauchlehrer, Taucher und Ärzte.
2^e édition entièrement révisée, Gentner Verlag Stuttgart, 2012

Wendling J. et al.: Aptitude à la plongée: manuel, ISBN: 3908229073, 9783908229070,
à commander à la SUHMS (www.suhms.org)

Brubakk A.O., Neuman T.S.: Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving.
5^e édition, Elsevier Saunders, 2002

Edmonds C. , Lowry Ch., Pennefather J., Walker R.:
Diving and Subaquatic Medicine.
4^e édition, Hodder, Londres, 2005

Wendling J., Elliott D., Nome T.: Medical assessment of working divers.
Hyperbaric Editions, CH 2501 Biel-Bienne, ISBN 3-9522284-2-7,
à commander à l'IMCA (voir les liens)

Avanzi P., Galley P., Héritier F.: Plonger en sécurité.
Edition Gründ, Paris, 2000

Broussolle B., Méliet J.-L., Coulange M.: Physiologie et médecine
de la plongée.
2^e édition, Edition Ellipses Paris, 2006

Wattel F., Mathieu D.: Traité de médecine hyperbare.
Edition Ellipses Paris, 2002

Fiorito A.: Medicina Subacquea
Editrice La Mandragora, 2006

Ouvrages utiles

Asthme: Recommandations 2012 – 2015 de la Société suisse
de médecine subaquatique et hyperbare (SUHMS), à commander à
l'adresse: <http://www.suhms.org/>

Barak M., Katz Y.: Microbubbles; Pathophysiology and
Clinical Implications.
CHEST 2005; 128: 2918–2932

D'Agostino D.P., Colomb D.G. Jr., Dean J.B.: Effects of hyperbaric
gases on membrane nanostructure and function in neurons.
J Applied Physiol 2009; 106: 996–1003

Handlungsanleitung Tauchereinsätze mit Mischgas;
Berufsgenossenschaftliche Information 897
Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Berlin, 2007

Hutter C.D.D.: Dysbaric osteonecrosis: a reassessment and hypothesis.
Medical Hypotheses. Avr. 2000; 54(4): 585–590

Jain K.K.: Oxygen Toxicity pp 48 – 58 in: Jain K.K.: Textbook of
Hyperbaric Medicine, 5th revised and expanded edition, Hogrefe
Publishing, Cambridge MA, 2009

Jardine F.M., McCallum R.I. (Editors): Engineering and Health in Compressed Air Work. Proceedings of the International Conference, Oxford, septembre 1992, E & FN Spon, Londres 1994

Klingmann Ch., Praetorius M., Baumann I., Plinkert P.K.: Otorhinolaryngologic disorders and diving accidents: an analysis of 306 divers. Eur Arch Otorhinolaryngol 2007; 264:1243–1251

Kraus M., Wendling J.: Diving and Cardiology, Cardiovascular Medicine 2012; 15(1): 14-17

Langford N.J.: Carbon dioxide poisoning. Toxicol Rev 2005; 24(4): 229–235

Lindholm P., Lundgren C.E.G.: The physiology and pathophysiology of human breath-hold diving. J Appl Physiol 2009; 106: 284–292

McMullin AM.: Scuba Diving: What you and your patients need to know. Cleveland Clinic Journal of Medicine 2006; 73: 711–721

Neuman T.S.: Arterial Gas Embolism and Decompression Sickness. News Physiol Sci 2002; 17: 77–81

Pons M., Blickensdorfer D. et al.: Pulmonary oedema in healthy persons during scuba-diving and swimming. Eur Respir J 1995; 8: 762–767

Prockop L.D., Chichkova R.I.: Carbon monoxide intoxication: An updated review. Journal of the Neurological Sciences 2007; 262:122–130

Robichaud R., McNally M.E.: Barodontalgia as a Differential Diagnosis: Symptoms and Findings. J Can Dent Assoc 2005; 71: 39–42

Torti S.R., Billinger M. et al.: Risk of decompression illness among 230 divers in relation to the presence and size of patent foramen ovale. European Heart Journal 2004; 25: 1014–1020

Walder D. N.: Bone necrosis, pp 16–28 in: Jardine F. M., McCallum R.I. (ed.) Engineering and Health in Compressed Air Work. Proceedings of the International Conference, Oxford, septembre 1992, E & FN Spon, Londres 1994.

Adresses et liens pour de plus amples informations

Suva

Division médecine du travail, Case postale, 6002 Lucerne

Tél. 041 419 52 78, fax 041 419 62 05

Division sécurité au travail, secteur génie civil et bâtiment, av. de la gare 23,
case postale 287, 1001 Lausanne

Tél. 021 310 80 40, fax 021 310 80 49

CFST

Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail

www.cfst.admin.ch

Bases légales et directives sur la sécurité au travail en Suisse

SUHMS

Société suisse de médecine subaquatique et hyperbare

www.suhms.org

Publications concernant l'aptitude à la plongée et les formations d'approfondissement pour les médecins intéressés par la médecine de la plongée

BAP

Bureau de prévention des accidents de plongée

www.ftu.ch

Publications sur l'analyse des accidents de plongée, conseils utiles pour la plongée et communiqués de presse

SSMT

Société suisse de médecine du travail

www.sgarm.ch

Informations générales en matière de médecine du travail, réglementation nationale et prises de position

GTÜM

Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin

www.gtuem.org

Informations sur l'aptitude à la plongée et la prise en charge des accidents de plongée (Allemagne)

Medsubhyp

Société de médecine et de physiologie subaquatiques et hyperbares de langue française

www.medsubhyp.com

Informations et manifestations sur la médecine de la plongée et la médecine hyperbare (en français)

SIMSI

Società Italiana di Medicina Subacquea ed Iperbarica

www.simsi.org

Informations et manifestations sur la médecine de la plongée et la médecine hyperbare (en italien)

DAN

Divers Alert Network, Europe

www.daneurope.org

Association de plongeurs mondiale. Conseils et aide en cas d'accidents de plongée, recherche et publications sur la technique de plongée et la sécurité pendant la plongée

IMCA

International Marine Contractors Association

www.imca-int.com

Rédaction et publication de règles de sécurité et de compétence concernant les différentes fonctions au sein des équipes de plongée professionnelles

IDSA

International Diving Schools Association

www.idsaworldwide.org

Rédaction et publication de principes et normes de formation pour la plongée professionnelle

GTS

Groupe spécialisé pour les travaux souterrains, Swiss Tunnelling Society (STS)

www.swisstunnel.ch

Organisation de congrès scientifiques, rédaction et publication de textes sur différentes questions liées aux travaux souterrains. Groupe spécialisé de la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA)

AITES

Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain

www.ita-aites.org

Rédaction et publication de textes sur un large éventail de thèmes liés à la construction de tunnels, entre autres en milieu hyperbare

Suva

Case postale, 6002 Lucerne
Tél. 041 419 58 51
www.suva.ch

Edition: janvier 2013

Référence

2869/8.f