

# Médecine de plongée: un abrégé

## 1<sup>re</sup> partie

Peter Nussberger<sup>a</sup>, Peter Knessl<sup>b</sup>, Christian Wölfel<sup>c</sup>, Sandra Torti<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Gemeindespital Riehen, <sup>b</sup> Spital Sanitas Kilchberg, <sup>c</sup> Kantonsspital Bruderholz, <sup>d</sup> Herzzentrum Bern



### Quintessence

- La plongée, plus que toute autre activité professionnelle ou de loisirs, est associée à des modifications physiologiques majeures.
- Si la plupart des plongeurs sont des adeptes de la plongée dite «de loisir», beaucoup la pratiquent avec une grande expertise, sont très expérimentés et possèdent une solide formation théorique et pratique.
- Les médecins qui n'ont pas étudié en détail les problèmes liés à la plongée subaquatique avouent souvent leur difficulté à diagnostiquer et à traiter les incidents de plongée.
- Le manque de connaissances conduit parfois à des confrontations déplaisantes entre les services de sauvetage, les médecins et les plongeurs, de plus en plus exigeants.
- Les conseils qui suivent ont pour but d'aider les médecins sans expérience de la médecine de plongée et de guider leur action.

### Summary

#### Diving medicine: a short update. Part 1

- *No recreational or professional activity is physiologically more challenging than diving.*
- *Recreational divers form the majority of those practising this activity. Many are possessed of great expertise after well-grounded theoretical and practical training.*
- *Physicians with insufficient insight into the problems associated with diving may experience difficulty with the diagnosis and therapy of diving-related conditions.*
- *Inadequate knowledge sometimes produces unpleasant confrontations between rescue squads, physicians and increasingly demanding divers.*
- *The following remarks are intended to assist the diving medicine laymen in dealing with diving-related problems.*



**Figure 1**

Hannes Keller et le Prof. A.-A. Bühlmann. Plongée à 300 m en caisson hyperbare le 25.4.1961 (centre hyperbare de la marine française à Toulon).

Bühlmann, de l'hôpital universitaire de Zurich (fig. 1 )<sup>1</sup>, suscitent mondialement un grand intérêt pour la recherche en médecine de plongée et une reconnaissance de cette discipline. On a essayé entre autres de prévenir la narcose azotée, ou ivresse des profondeurs, en modifiant la composition des mélanges respiratoires. Le calcul de valeurs de saturation et de désaturation tissulaires est devenu un sujet de discussion mondial et a conduit à l'élaboration, partout sur la planète, de tableaux de décompression, et d'ordinateurs de plongée qui, bien que partiellement réadaptés, ont conservé leur validité à ce jour.

Depuis lors, la plongée est devenue un sport populaire et commercial. Bien qu'elle compte des milliers et des milliers d'adeptes, on y note un taux d'urgences médicales faible par rapport à d'autres sports [1]. La plupart des incidents graves n'ont qu'indirectement à voir avec la plongée. La cause de mort la plus fréquente est la noyade. Les



### Introduction

Alors que la recherche en médecine d'altitude a une longue tradition en Suisse, ni la plongée professionnelle, ni les travaux en caisson dans la construction de routes et de tunnels n'y ont durablement acquis une place importante en médecine du travail. Il a fallu attendre le début des années soixante pour que les essais innovants de plongée en eau profonde avec différents mélanges respiratoires, d'après des modèles calculés par Hannes Keller, un plongeur sportif doublé d'un mathématicien talentueux, et le Prof. A.-A.

blesures mécaniques devançant de loin les lésions spécifiquement liées à la plongée. Pour environ un quart des décès en plongée enregistrés dans le monde, la cause relève de la médecine interne (en général, une défaillance cardiovasculaire).

## Méthodes de plongée et mélanges respiratoires

### Plongée en apnée

Les premières descriptions de plongées en apnée – chez les pêcheurs d'éponges, les pêcheurs de perles et même les nageurs de combat – remontent à l'Antiquité. Même sans appareil respiratoire, la plongée expose l'organisme à un changement des conditions ambiantes qui exige une adaptation physiologique radicale. A cet égard, l'être humain est soumis à des limites plus étroites que certains mammifères qui peuvent plonger jusqu'à 1000 mètres de profondeur. On a longtemps vu la cause de ces différences dans l'élasticité du thorax et les réserves d'oxygène dans le sang. Or, les champions de la plongée en apnée atteignent aujourd'hui des profondeurs pour lesquelles les anciennes explications physiologiques ne suffisent plus. La capacité d'atteindre en apnée des profondeurs de plus de 210 mètres est expliquée par un déplacement du sang de la périphérie vers le parenchyme pulmonaire, déplacement soutenu par l'action de facteurs humoraux vasoactifs, et par un entraînement physique spécifiquement destiné à développer ces facultés.

### Plongée en scaphandre autonome

Ce mode de plongée, communément appelé «plongée en bouteille», est bien plus répandu de nos jours que la plongée en apnée.

#### Systèmes à circuit ouvert

Dans les systèmes dits «ouverts», l'air expiré est rejeté dans l'eau environnante. La plupart des plongeurs utilisent des bouteilles d'air atmosphérique comprimé et purifié. Un régulateur mécanique réduit la pression de l'air sortant de la bouteille à la valeur régnant à la profondeur d'immersion et permet au plongeur d'aspirer le volume d'air désiré par l'embout buccal.

#### Mélanges respiratoires à faible teneur en azote

Certains des risques les plus importants que comporte la plongée à l'air comprimé sont dus aux effets de l'azote (78%) qu'il contient (voir ci-dessous). C'est pourquoi on utilise aujourd'hui de préférence des mélanges gazeux enrichis en oxygène (Nitrox). Ces mélanges ont, par rapport à l'air ambiant, une teneur en azote réduite au profit d'une proportion plus élevée (en général 32 à 36 % vol.)

d'oxygène. De tels mélanges respiratoires permettent de réduire le temps des paliers de décompression à la remontée ou d'allonger le temps de plongée maximum ne nécessitant pas de palier de décompression («temps résiduel sans palier»). Le recours au Nitrox permet d'autre part de diminuer le risque de maladie de décompression. La question de savoir si la proportion diminuée d'azote servira à rallonger le temps résiduel sans palier ou à réduire le risque de maladie de décompression dépend du type de tableau de plongée ou de l'algorithme d'ordinateur de plongée utilisé.

Toutefois, dans les mélanges enrichis en oxygène, le seuil de toxicité de l'oxygène sur le système nerveux central (voir ci-dessous) correspond à un niveau de profondeur atteint souvent sans difficultés par un plongeur sportif moyen. Ces mélanges limitent par conséquent la profondeur de plongée, qui dépend en outre de l'effort physique.

#### Systèmes à circuit semi-fermé ou fermé

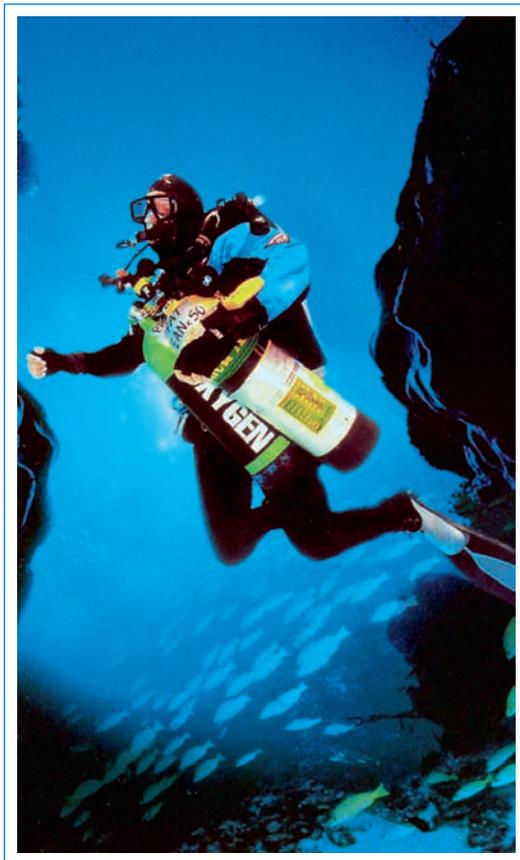
Les systèmes respiratoires à circuit semi-fermé ou fermé évitent dans une grande mesure le rejet de bulles dans l'eau grâce au recyclage complet de l'air expiré via un absorbeur de CO<sub>2</sub>. Ces appareils (recycleurs) font donc partie de l'équipement des nageurs de combat et sont également très appréciés des photographes subaquatiques. Ils offrent en outre une consommation très économique des gaz, si bien qu'ils nécessitent des bouteilles beaucoup plus petites que les systèmes ouverts. L'équipement du plongeur s'en trouve allégé. Ces appareils permettent d'effectuer de longues plongées.

#### Technical diving

Dans les systèmes à circuit fermé ou semi-fermé, on utilise en général des mélanges enrichis en oxygène. Pour atteindre de plus grandes profondeurs et réduire les temps de décompression, des plongeurs très ambitieux et adeptes des plongées extrêmes ont introduit le remplacement des mélanges respiratoires au cours d'une même plongée. Ce type de plongée (plongée technique ou tec diving), où le mélange est complété d'un gaz inerte supplémentaire, en général l'hélium, est très exigeant en termes d'équipement, de formation et d'habileté du plongeur en raison des différentes bouteilles qu'il doit emporter. Il se trouve que le tec diving est de plus en plus pratiqué dans les lacs suisses, dans la plongée spéléologique et par les plongeurs professionnels (fig. 2 .

## Sollicitations, maladies et accidents spécifiquement liées à la plongée

A l'instar de la médecine aérienne et astronautique, la médecine de plongée s'intéresse aux réactions physiologiques et physiopathologiques de l'organisme aux changements des conditions



**Figure 2**  
Plongée technique (remplacement des mélanges respiratoires pendant la plongée).

physiques de l'environnement. Des facteurs d'influence thermiques comme l'eau, le soleil et le vent peuvent excéder les capacités de thermorégulation de l'organisme et provoquer une déshydratation. Le ressac, les marées, les courants marins, les bateaux et les hélices des navires, sans parler des actions des animaux et des plantes (toxines, allergies) peuvent menacer la santé des plongeurs. Les modifications de pression à l'immersion (phase de compression) et à la remontée (phase de décompression) créent un stress mécanique qui peut endommager les tissus. Les processus biophysiques qui se déroulent pendant une exposition linéaire à la pression saturent à une vitesse variable les différents tissus du corps avec la fraction de gaz inerte du mélange respiratoire. Le gaz inerte doit pouvoir ressortir des tissus pendant et après la décompression.

#### Barotraumatismes

En vertu de la loi de Boyle-Mariotte, le volume d'un gaz est doublé si la pression est réduite de moitié à température constante. C'est par exemple le cas lorsqu'un plongeur émerge de dix mètres de profondeur. Les liquides, par contre, sont incompressibles. C'est pourquoi toutes les cavités de l'organisme remplies d'air qui gardent un volume constant sont exposées à un stress consi-

dérable à la plongée. Les barotraumatismes de l'oreille moyenne sont fréquents lorsqu'une tumescence des muqueuses entrave la compensation de la pression, par ex. dans le cadre d'une infection de voies respiratoires hautes, et peuvent causer des lésions graves de tout l'organe stato-acoustique.

Les barotraumatismes du parenchyme pulmonaire peuvent provoquer un pneumothorax et/ou des embolies gazeuses artérielles et sont donc potentiellement mortels. Il suffit d'une différence de seulement 10 kPa pour endommager les tissus pulmonaires. Les affections pulmonaires, en particulier celles où de l'air infiltré est «piégé» dans les tissus (emphysèmes), devraient être décelées si possible dans le cadre de l'examen d'aptitude à la plongée.

D'autres compartiments du corps remplis d'air comme les sinus ou des segments gastro-intestinaux sont également exposés à un risque de lésion en cas de changement de pression rapide, par ex. lors d'une remontée d'urgence. La connaissance de ces dangers, l'apprentissage d'un bon comportement de plongée et l'emploi de régulateurs en parfait état permettent pratiquement d'exclure de tels risques pour autant qu'il n'existe pas de lésion organique prédisposante.

#### Narcose azotée

Ce phénomène appelé aussi *ivresse des profondeurs* se manifeste par un état de griserie qui émousse le sens critique et peut provoquer une perte de connaissance. Le mécanisme physiopathologique à l'origine du phénomène est probablement l'incorporation de molécules d'azote, aisément liposolubles, dans les membranes cellulaires sous une pression partielle accrue. Cela modifie leurs propriétés électrophysiologiques, produisant un effet semblable à celui des anesthésiques par inhalation que nous connaissons. Il existe ici une grande marge de tolérance, qui est individuelle mais dépend également de la forme dans laquelle se trouve le plongeur ce jour-là. D'autres facteurs favorisants sont le froid, l'obscurité, l'angoisse, l'effort et certains effets médicamenteux. L'adjonction d'hélium au mélange respiratoire diminue la pression partielle de l'azote et peut réduire nettement son effet enivrant. Il est donc fréquent d'utiliser de l'hélium dans les mélanges pour plongée en eau profonde.

#### Toxicité de l'oxygène

En raison de leurs avantages décrits ci-dessus, les mélanges respiratoires enrichis en oxygène ( $FiO_2 > 21\%$ ) sont de plus en plus utilisés. Le problème est qu'à partir d'une pression partielle de 1,4-1,6 bar, l'oxygène a un effet toxique sur le système nerveux central, surtout pendant l'effort phy-

sique. Pour une  $FiO_2$  de 36%, par exemple, ce seuil de toxicité de l'oxygène est déjà atteint à une profondeur de 28 mètres. Les crises convulsives généralisées sous l'eau, à issue mortelle, sont alors fréquentes. La toxicité à long terme, telle que nous la connaissons chez les patients intubés et ventilés en soins intensifs, ne devient un problème important qu'au bout de temps de plongée extrêmement longs.

L'utilité d'une oxygénothérapie dans le traitement des incidents de plongée est évoquée plus loin.

### Autres substances toxiques

La contamination du mélange respiratoire par du CO, du CO<sub>2</sub> ou d'autres gaz peut provoquer une intoxication aiguë. D'autres contaminants tels que les huiles des compresseurs, les fines poussières ou les vapeurs émises par les cartouches de chaux humides, peuvent provoquer des lésions pulmonaires aiguës ou chroniques sérieuses ainsi que des effets systémiques. Le degré de l'effet toxique de chaque substance dépend de sa pression partielle, et cet effet augmente proportionnellement à la teneur de la substance dans le mélange gazeux et à la profondeur de plongée.

### Maladie de décompression (Decompression sickness ou DCS)

Après exposition à une surpression, les gaz non métabolisés (par ex. azote, hélium) se dissolvent d'abord dans le sang, puis, secondairement, dans tous les tissus du corps. La quantité de ces gaz dits inertes qui est dissoute dans un tissu par unité de temps dépend de la perfusion sanguine du compartiment considéré et du coefficient de solubilité correspondant.

En fait, seule la capacité des tissus à tolérer une certaine sursaturation permet la pratique de la plongée sans lésion tissulaire. A mesure que la pression diminue à la remontée, le gaz dissous est rediffusé par les tissus, pour autant que la vitesse de réduction de la pression ne dépasse pas la capacité de diffusion. Si la remontée est trop rapide, la rediffusion de l'azote dissous peut devenir insuffisante et provoquer la formation dangereuse de bulles de gaz en cas de dépassement de la tolérance de sursaturation spécifique. La situation est comparable au débouchage d'une bouteille de champagne, où le gaz dissous sous pression repasse alors à l'état gazeux.

Par conséquent, la vitesse de remontée ne doit pas dépasser la vitesse de désaturation tissulaire à pression décroissante sous peine de favoriser la formation de bulles de gaz dans les tissus, ce qui déclenche les symptômes de DCS.

Dans la maladie de décompression, on distingue la forme DCS I (symptômes périphériques le plus souvent légers) et la forme DCS II (dans laquelle

les pathologies généralement sévères prédominent). Alors que les symptômes «légers» sont imputables en grande partie aux tissus «lents» (peau, cartilage, os), les incidents sévères concernent surtout le système nerveux central avec toutes les conséquences possibles, notamment des manifestations neurologiques telles que des défaillances passagères, mais parfois aussi permanentes, en général d'origine spinale (tab. 1 [↔](#)).

L'identification des premiers symptômes discrets d'une DCS est souvent difficile. Il n'est pas rare qu'ils se manifestent plusieurs heures après une plongée, mais ils peuvent alors évoluer rapidement en une pathologie sévère. C'est pourquoi il est urgent que les médecins ayant peu d'expérience de la médecine de plongée soient sensibilisés à l'identification des symptômes de DCS, notamment dans la perspective d'une administration suffisamment précoce d'oxygène normobare 100% (NBO). Ce traitement est simple, extrêmement efficace et a un effet favorable significatif sur l'évolution du processus de guérison et le pronostic.

Les mécanismes physiques et physiologiques qui mènent à la maladie de décompression sont décrits et étudiés intensivement depuis le début des années quarante. Partout dans le monde, on recherche de nouvelles voies pour élucider les processus biologiques de la maladie de décompression, approfondir notre compréhension de la maladie et définir les lois qui la régissent. Quand bien même on ne réussira pas à prévenir complètement cette complication dans un avenir proche,

**Tableau 1. Fréquence des symptômes lors d'incidents de plongée [2].**

Symptôme	Fréquence (%)
Douleurs articulaires	31,2
Vertiges	20,9
Parésies	19,3
Troubles de la conscience	14,5
Troubles vésicaux	13,8
Démangeaisons cutanées	12,5
Monoparésies	10,0
Douleurs lombaires	8,0
Aspiration bronchique	5,1
Paraplégie	5,1
Barotraumatisme de l'oreille moyenne	4,8
Emphysème médiastinal	4,8
Hémi-parésie	4,8
Emphysème sous-cutané	4,5
Hémoptysie	2,9
Rhinorrhée, épistaxis	2,6
Choc	2,3
Autres symptômes	1,6
Hémiplégie	1,3
Tétraparésie	1,3
Tétraplégie	1,0
Pneumothorax	1,0

de nouveaux modèles de calcul et les algorithmes qu'ils auront permis de développer contribueront à réduire au minimum les risques liés à la plongée. Alors que les premiers tableaux de décompression reposaient essentiellement sur des bases empiriques qui postulaient des taux fixes pour la saturation et la désaturation physiques des différents tissus, on s'efforce davantage aujourd'hui de mieux comprendre la formation et le comportement des bulles de gaz responsables des lésions tissulaires. Les nouveaux Doppler et appareils d'imagerie échographique permettront de documenter le comportement de ces microbulles («bubbles») (fig. 3 ). On espère que des études de grande envergure permettront de faire des progrès dans la prévention des incidents de décompression. Le cheminement et le site d'action des bulles, dont on sait qu'elles se forment principalement dans la circulation veineuse après toute plongée prolongée, semblent être déterminants. Les études se poursuivent sur l'impact d'éventuels shunts droite-gauche tels que nous les connaissons dans le foramen ovale perméable (FOP) ou les shunts transpulmonaires, plus difficiles à diagnostiquer. L'effet désormais prouvé des bulles sur l'endothélium avec libération de médiateurs [3] soulève des questions intéressantes.

### Blessures, morsures et action de toxines

Les chutes, glissades et impacts sur des bateaux ou à terre avec un équipement lourd peuvent provoquer des blessures corporelles graves. Le resac ou les retours vers le canot de plongée occasionnent aussi régulièrement des traumatismes graves. Les morsures d'animaux et les empoisonnements par piqûre ou urtication peuvent se produire, mais n'entraînent que rarement des lésions corporelles graves. Les réactions anaphylactiques à des toxines marines mettent plus souvent



**Figure 3**

Détection des bulles circulantes par écho Doppler immédiatement après la plongée.

en danger la vie d'un plongeur que les effets toxiques proprement dits [4-6]. Même les morsures de requins, tant redoutées, sont extrêmement rares si le plongeur observe un comportement adéquat. Par contre, nourrir les animaux ou pénétrer dans leur espace vital ou leur lieu de couvée peut créer des situations dangereuses.

### Influences de la température

La capacité thermique élevée de l'eau, associée à la convection, peut rapidement provoquer une hypothermie chez le plongeur dont la combinaison thermique serait inadéquate. Les tremblements musculaires augmentent la production de CO<sub>2</sub> et entraînent, en plus d'une résistance déjà accrue des voies aériennes lors des plongées en bouteille, une hausse du travail respiratoire. Avec la baisse de la température corporelle, ceci peut diminuer drastiquement les capacités physiques. Le plongeur s'épuise alors facilement, ce qui favorise les réactions de panique.

### Références

- 1 National Safety Council USA. Safety Facts 1991.
- 2 Desola J. Descriptive Classification of diving accidents. 2nd European Consensus Conference on treatment of decompression accidents in recreational diving. Marseille 1996. p. 45-57.
- 3 Koteng S, Brubakk AO. Endothelial damage by bubbles in the pulmonary artery of the pig v. noosum. Undersea Hyper med. 1999;26(1):1-8.

- 4 Mebs D. Gifttiere. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft; 1992.
- 5 Bennet P, Elliott D. The Physiology and Medicine of Diving. 5th Edition, Saundersverlag.
- 6 Bühlmann AA, Völm EB, Nussberger P. Tauchmedizin. 5. Auflage: Springerverlag.

Correspondance:  
Dr Peter Nussberger  
CA Chirurgie, Präsident SUHMS  
Gemeindespital Riehen  
Schützengasse 37  
CH-4125 Riehen  
[nussberger@gsriehen.ch](mailto:nussberger@gsriehen.ch)