

POINT DE REPÈRE

RISQUES LIÉS À LA RESPIRATION DE MÉLANGES GAZEUX HYPEROXIQUES

► J.-C. LE PÉCHON, Ingénieur conseil,
JCLP Hyperbarie

L'oxygène est une source classique de préoccupations pour le préventeur. D'une part les interventions en milieux confinés exposent le personnel à un danger d'hypoxie, d'autre part, les ambiances enrichies en oxygène sont particulièrement dangereuses car elles augmentent les risques d'incendie. Ce ne sont pas à ces deux aspects particuliers des risques liés à l'oxygène que nous allons nous intéresser ici, mais à celui des effets physiologiques de l'hyperoxie. Cette question ne se pose que dans des cas relativement limités pour lesquels un gaz respiratoire peut contenir des quantités d'oxygène supérieures à la normale compte tenu des conditions d'exposition.

GÉNÉRALITÉS

QUELQUES RAPPELS SUR L'EFFET PHYSIOLOGIQUE DES GAZ

L'effet physiologique d'un gaz ne dépend pas directement de sa concentration dans l'atmosphère mais de la quantité de ce gaz présente dans les alvéoles pulmonaires. La quantité de gaz dans les alvéoles pulmonaires conditionne son absorption selon les lois de la diffusion et, par voie de conséquence, détermine l'ampleur et la cinétique de la contamination tissulaire et ses effets toxiques éventuels [2].

Pour connaître la quantité d'une espèce moléculaire se trouvant dans l'alvéole, il faut en principe calculer la pression partielle dans l'atmosphère respirée (Loi de Dalton) puis effectuer les corrections nécessaires pour tenir compte de la tension de vapeur d'eau saturante de l'ambiance alvéolaire, du réchauffement des gaz et enfin éventuellement de la cinétique de l'absorption pulmonaire (cas du monoxyde de carbone ou de l'oxygène, par exemple). En général, en ce qui concerne l'oxygène, on se contente de la pression partielle régnant dans l'ambiance sans autre correction. Cette approximation est justifiée tant que la pression

ambiante (P) n'est pas très basse ($P > 700$ hPa) ; elle doit donc être évitée pour les situations de haute altitude (3 000 m et au delà).

UNITÉS

Les unités utilisées ci-après seront :

■ Pour les pressions, le bar, qui vaut 10^5 Pa ou 10^3 hPa ; il peut s'agir de pression absolue référencée au vide et notée $\text{bar}_{(a)}$ ou de bar relatif mesuré au manomètre.

■ Les pressions partielles de gaz sont en pression absolue par définition et n'ont pas de notation particulière (bar, hPa).

■ Les fractions, grandeurs sans unité, sont des valeurs décimales – par exemple, 0,209 pour l'oxygène de l'air. Elles sont souvent notées soit en % (10^{-2}) ou *ppm* (10^{-6}) – par exemple, 20,9 % d'oxygène dans l'air.

■ Les concentrations sont exprimées en mg/m^3 . Souvent, on assimile aussi les concentrations au pourcentage volumétrique.

■ Les volumes de gaz sont mesurés à la pression ambiante en m^3 ou ramenés à la pression atmosphérique normale et sont alors exprimés en Normo- m^3 (Nm^3).

VALEURS LIMITES D'EXPOSITION ET PRESSIONS PARTIELLES

La toxicité des gaz pouvant se trouver dans les atmosphères de travail est le plus souvent estimée par comparaison avec des valeurs limites d'exposition, elles-mêmes exprimées en *ppm*. Si elles sont exprimées en mg/m^3 , les mesures indiquent la valeur absolue de la quantité de gaz concerné « toxique » dans l'ambiance pour chaque m^3 d'air ambiant.

À la pression atmosphérique normale

Le plus souvent les seuils limites d'exposition (VLE, valeur limite d'exposition, ou VME, valeur moyenne d'exposition) sont utilisés à la pression normale (1 $\text{bar}_{(a)}$ environ) ; les mesures exprimées en *ppm* ou en mg/m^3 sont utilisables directement car le facteur de correction pour quantifier les valeurs en pressions partielles est de 1 ($\text{bar}_{(a)}$).

À une pression supérieure à la normale (cas étudié)

Dès que la pression change de façon significative, il faut impérativement exprimer les seuils limites en pression partielle et comparer avec les valeurs de pressions partielles auxquelles sont éventuellement exposées les personnes au travail.

Par exemple, une atmosphère contenant 50 *ppm* de monoxyde de carbone est acceptable à la pression atmosphérique (c'est la valeur limite), mais elle devient toxique sous 3 $\text{bar}_{(a)}$ – soit une profondeur de 20 m – puisque sa pression partielle est alors de $50 \cdot 10^{-6} \times 3 = 150 \cdot 10^{-6}$ bar tandis que la valeur limite est seulement de $50 \cdot 10^{-6}$ bar.

Pour les concentrations en mg/m^3 , si les volumes (en m^3) sont mesurés à la pression de respiration, il n'y a alors aucune correction à effectuer ; cela correspond d'emblée à une pression partielle.

En revanche, si l'analyse (mg/m^3) est faite sur du gaz détendu à pression atmosphérique, il s'agit de Nm^3 qu'il y a lieu de corriger (en multipliant le résultat par la pression absolue régnant au lieu de respiration, ce qui permet d'introduire le facteur pression dans le résultat qui sera donc en pression partielle).

CAS DE L'HYPOXIE

Une atmosphère contenant moins de 16 % d'oxygène est généralement considérée comme dangereuse pour qui n'y est pas adapté ; le code du travail l'a pris en compte en fixant une limite à 16 %. Ce taux correspond à une pression partielle d'oxygène (PO_2) limite inférieure de 0,16 bar dans l'ambiance. Cette situation est atteinte dès que l'on s'élève à l'altitude de 2 400 m.

Mais notre objectif ici n'est pas de traiter de l'hypoxie mais de l'hyperoxie, soit les valeurs de PO_2 supérieures à 0,21 bar dans l'ambiance.

L'HYPEROXIE

Jusque vers 0,6 bar de pression partielle, il se produit une adaptation inverse à celle liée à l'altitude. En

quelques jours s'installe une anémie dont les effets ne se feront sentir éventuellement qu'au retour à une situation de PO_2 normoxique. Ici encore, il s'agit d'adaptation et il n'est pas considéré, dans la famille française des hyperbaristes, qu'il y ait d'effets toxiques dans cette zone de pressions partielles. Au-delà de $\text{PO}_2 = 0,6$ bar, toutes les cellules de l'organisme sont touchées, notamment par les excès de radicaux libres produits lors des expositions aux fortes valeurs de pression partielle d'oxygène. Bien qu'il n'en eut pas expliqué le mécanisme biochimique, cette toxicité avait été établie par Paul Bert de façon si claire que son nom est resté attaché à cet effet, dit *effet Paul Bert* [15]. Dès 1878 [3], il avait démontré les effets délétères de l'oxygène sur toutes sortes d'organismes vivants, animaux et végétaux. Chez l'homme, les effets se manifestent dans des délais divers selon les organes et les pressions partielles. Si deux organes, le cerveau et les poumons, ont davantage retenu l'attention, c'est parce qu'ils réagissent de façon plus précoce, chacun dans leur gamme de valeurs de PO_2 . Néanmoins les autres parties de l'organisme sont aussi exposées [11]. Les effets toxiques pulmonaires sont classiquement dénommés *effet Lorrain-Smith* [5].

Il est bien établi que des interruptions séquentielles de la respiration de gaz hyperoxiques diminuent très fortement la toxicité, aussi bien pulmonaire que centrale [7], ce qui se manifeste par un allongement significatif des temps de latence d'apparition des signes.

LES EFFETS PULMONAIRES DE L'HYPEROXIE

Les effets pulmonaires précèdent en général les effets centraux dans la gamme de PO_2 comprise entre 0,6 et 2 bar selon les conditions d'exposition. Ils se manifestent par la disparition du surfactant (substance tensioactive produite par des cellules épithéliales de l'alvéole et qui, tapissant les alvéoles, leur permettent, bien que humides, de rester béantes) et l'apparition de difficultés respiratoires qui varient de la toux sèche à la dyspnée jusqu'à la pneumonie dite « à l'oxygène ». Les effets initiaux sont réversibles dans leurs manifestations primitives peu après le retour en situation normoxique.

Clark et al [8] ont proposé un mode d'évaluation semi-quantitatif des effets pulmonaires de l'oxygène, en introduisant une *unité de dose toxique pulmonaire* (UPTD) qui permet au moins de comparer les effets potentiels d'expositions aux fortes valeurs de PO₂. Une unité UPTD correspond aux effets théoriques produits par la respiration, pendant une minute, d'un gaz présentant une valeur de PO₂ de 1 bar (oxygène pur à pression atmosphérique, par exemple). Le nombre d'unités UPTD (qui est une grandeur homogène à un temps) est proportionnel à la durée (*t*, exprimée en minutes) de l'exposition continue et à un coefficient (*Kp*, sans unité) qui dépend de PO₂.

$$\text{UPTD} = Kp \times t$$

Le *Tableau 1* donne les valeurs de *Kp* pour diverses valeurs de PO₂ allant de 0,50 à 2,80 bar.

Il est considéré comme acceptable de recevoir 600 UPTD pour une exposition et environ 400 UPTD par jour, si les expositions sont journalières [16]. Pour un traitement de médecine hyperbare ou d'un accident de décompression, des valeurs de l'ordre de 1 400 UPTD sont habituelles. Dans certaines conditions, ces UPTD peuvent être cumulatives pour des expositions multiples ; elles sont alors désignées par les lettres CPTD, le C pour « Cumulative ». Il n'existe pas de calcul de récupération lorsque l'exposition est interrompue.

TABLEAU 1

Valeurs de *Kp* pour diverses valeurs de PO₂ allant de 0,50 à 2,80 bar.

PO ₂	Kp	PO ₂	Kp
0,50	0,00	1,70	2,07
0,60	0,26	1,80	2,22
0,70	0,47	1,90	2,36
0,80	0,65	2,00	2,50
0,90	0,83	2,10	2,64
1,00	1,00	2,20	2,77
1,10	1,16	2,30	2,91
1,20	1,32	2,40	3,04
1,30	1,48	2,50	3,17
1,40	1,63	2,60	3,31
1,50	1,78	2,70	3,44
1,60	1,93	2,80	3,57

FIGURE 1

Décompression à l'oxygène après intervention en air comprimé (photo Specialist Plant).



LES EFFETS CENTRAUX DE L'HYPEROXIE

L'action de fortes valeurs de PO₂ sur le système nerveux central ne se manifeste que pour des valeurs de PO₂ supérieures à 1,6 - 2 bar ; l'hyperoxie n'apparaît qu'après un temps de latence dépendant de la pression partielle en cause. Les effets, nombreux, vont du malaise indéfini, à la vision en tunnel, aux hallucinations sonores, à des picotements autour de la bouche jusqu'à la crise convulsive complète si aucun de ces signes n'a été perçu à temps et que l'on n'a pas mis fin à la respiration de gaz à trop forte valeur de PO₂ [9].

Il n'existe aucun moyen, même semi-quantitatif, d'évaluer le risque convulsif correspondant à l'effet Paul Bert. En effet, une très grande disparité entre les individus jointe à une susceptibilité qui peut varier considérablement d'un jour à l'autre ne le permettent pas.

Des recommandations de valeurs limites ont cependant été établies. Ces valeurs limites varient en fonction des conditions d'exposition ; elles prennent en compte le fait que l'environnement conditionne en partie les modalités d'apparition ou de perception des signes et que les conséquences d'une crise convulsive ne sont pas les mêmes pour une personne en immersion ou au sec dans un caisson hyperbare.

VALEURS LIMITES DE L'EXPOSITION À DES MÉLANGES HYPEROXIQUES

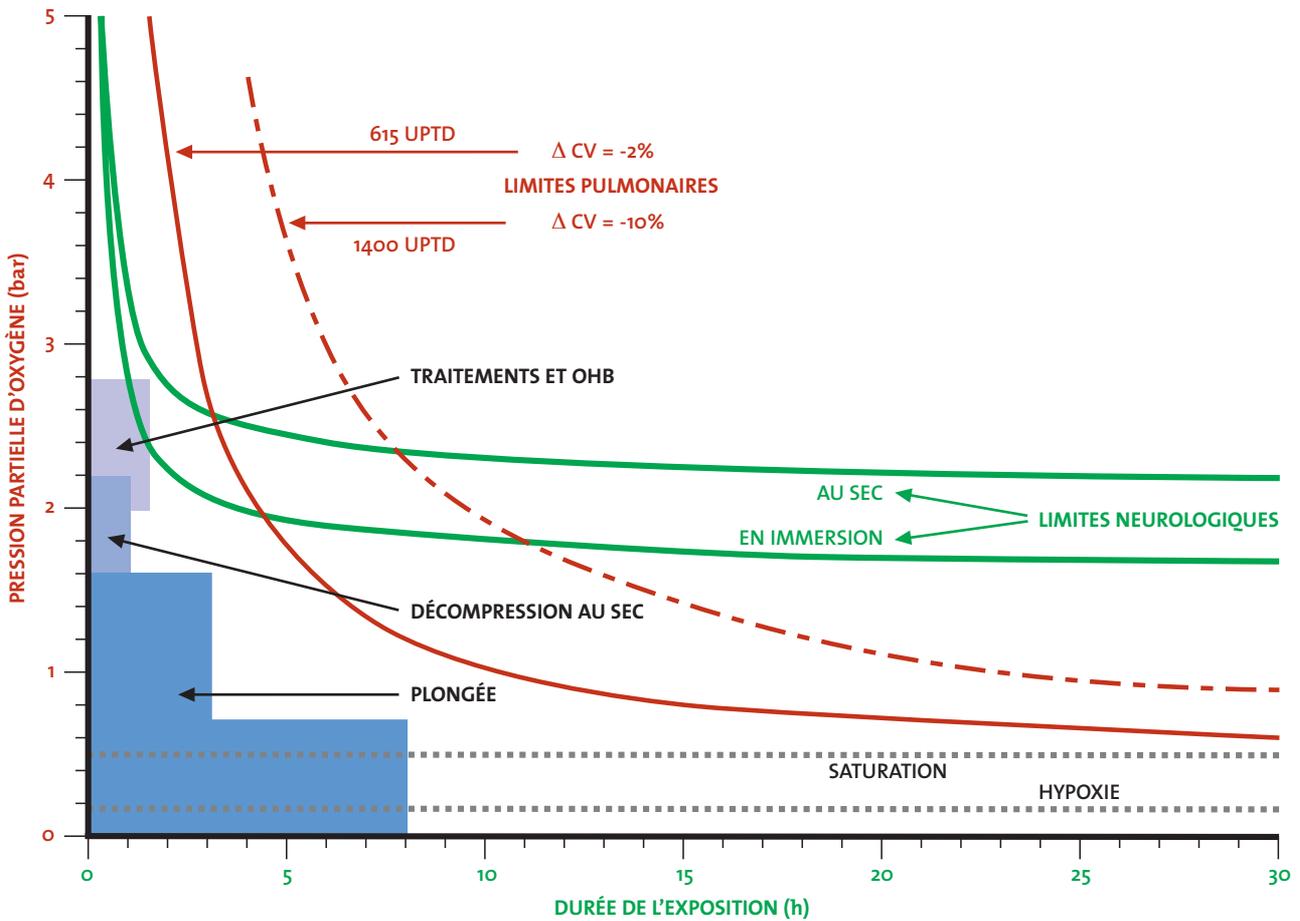
Le seul texte qui fixe des valeurs limites pour les expositions à des mélanges hyperoxiques est le décret dit « hyperbare » du 28 mars 1990, article 8 [1, 2, 13]. Les valeurs limites fixées tiennent compte des conditions d'utilisation, des durées d'exposition et des valeurs de PO₂.

En immersion, le maximum autorisé est de 1,6 bar, ce qui correspond par exemple à une profondeur maximale de 6 mètres, pour les paliers de décompression à l'oxygène pur, ou à une profondeur maximale de 150 mètres pour un mélange contenant 10 % d'oxygène.

Au sec, en caisson hyperbare, la valeur de PO₂ maximale est de 2,2 bar. Dans ce cas, les expositions sont interrompues par 5 minutes de respiration d'air toutes les 25 minutes (ce qui donne un cycle de 30 minutes).

GRAPHIQUE 1

Ensemble des zones de PO₂ utilisables



Le *Tableau II* mettant en correspondance les valeurs maximales de PO₂ autorisées et la durée d'exposition continue a été établi et figure dans le décret ci-dessus.

TABLEAU II

Valeurs maximales de PO₂ autorisées et durée d'exposition continue.

Durée d'exposition continue (heures)	PO ₂ autorisé (bar)
3	1,6
4	1,4
5	1,2
6	1,0
8	0,9

Le *Graphique 1* présente l'ensemble des zones de PO₂ utilisables.

EN PRATIQUE

Lorsqu'on souhaite intervenir dans un milieu *a priori* irrespirable, dans la majorité des cas, des EPI vont apporter de l'air pour maintenir la fonction respiratoire. Lorsque la pression n'est pas la pression normale, l'air peut ne pas être le gaz le mieux adapté et il faut choisir un mélange synthétique convenable. En ce qui concerne sa teneur en oxygène, le choix devra s'appuyer sur les données et leur traduction réglementaire présentées ci-dessus.

Le choix de la pression partielle à utiliser n'est pas destiné à assurer la fonction respiratoire. Il existe beaucoup de cas où la valeur retenue n'est pas 0,21 bar comme on pourrait le penser. En effet, soit pour des raisons opérationnelles, soit pour bénéficier des avantages physiologiques de l'hy-

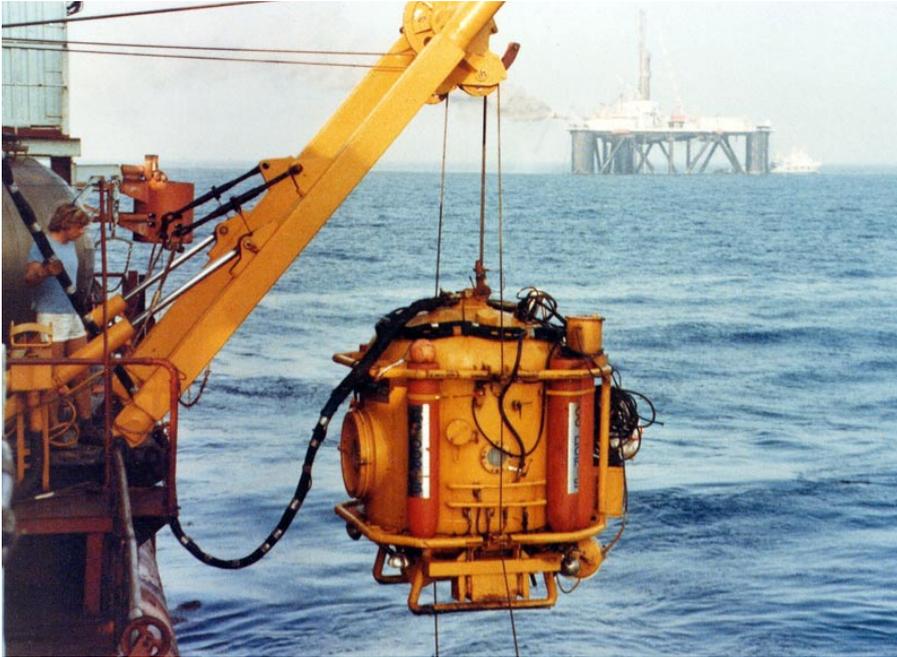
peroxie, on choisit des valeurs plus élevées.

À partir des valeurs de pressions partielles définies selon les durées, les conditions d'expositions et les objectifs (immersion, au sec, décompression, médecine), il est possible d'établir les teneurs en oxygène de tous les mélanges de gaz nécessaires aux interventions hyperbares (et éventuellement hypobares), que ce soit en plongée subaquatique, pour les travaux au sec en caissons immergés ou dans les tunneliers, ou encore pour la médecine hyperbare ou pour les décompressions des intervenants dans chacun de ces secteurs d'application de l'hyperbarie [4, 12, 16].

Par exemple, un mélange respirable sans limite de durée, dans un habitat de saturation, à une pression équivalente à celle subie à 90 mètres de profondeur (10 bar(a)), devra contenir 4 % d'oxygène, ce qui correspond à une valeur de PO₂ de

FIGURE 2

Mise à l'eau d'une tourelle de plongée pour une intervention à 120 mètres (photo C. G. DORIS).



0,4 bar. Le mélange utilisé par les scaphandriers, lorsqu'ils sont « sortis » de l'habitat (pour 6 à 8 heures) et le mélange qui sera maintenu dans la tourelle de plongée à 98 mètres, pourra contenir 7 à 9 % d'oxygène ($0,76 < PO_2 < 0,97$). Ni l'un ni l'autre de ces mélanges ne sont respirables en surface.

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS

■ **Raisons opérationnelles** : La gamme de pressions ou de profondeur à laquelle sera soumise une personne peut être large. Dans ce cas, pour simplifier la procédure, un seul gaz respiratoire sera choisi, hyperoxique respirable dans l'ensemble de la plage de pressions dans laquelle la personne évolue. Cela peut s'appliquer aussi bien à la plongée qu'à des exposition hyperbares au sec.

■ **Raisons physiologiques** : La durée de décompression après une intervention hyperbare dépend de la quantité de gaz inerte absorbée pendant l'intervention. Par conséquent, pour minimiser la charge en gaz inerte, on choisira une valeur de PO_2 aussi hyperoxique et physiologiquement acceptable que possible pour la durée du travail. La vitesse d'élimination de ce gaz inerte dépend aussi de la pression partielle de gaz inerte dans le gaz respiré pendant la décompression ; on cherche donc à en réduire la teneur, en particulier en décomprimant sous respiration d'oxygène pur.

■ **Raisons médicales** : L'oxygène est un remède classique en réanimation. Pour obtenir un effet maximal, on peut en accroître la dose au-delà de celle correspondant à l'oxygène pur à pression atmosphérique, tout simplement en faisant respirer au patient de l'oxygène pur à une pression supérieure à la pression atmosphérique dans un caisson hyperbare. C'est le principe de l'oxygénothérapie hyperbare [17] et du traitement des accidents de décompression pour lesquels l'effet de la pression vient compléter les moyens d'action de l'oxygène.

AMBIANCES HYPERBARES ET RISQUE D'INCENDIE

Toutes ces manipulations de teneurs et pressions partielles d'oxygène doivent tenir compte du risque d'incendie accru dans la zone de confinement hyperbare.

En effet, lorsque la pression n'est pas très forte, comme c'est le cas en fin de décompression d'une intervention en saturation, des valeurs de PO_2 de l'ordre de 0,5 bar vont entraîner des teneurs en oxygène supérieures à 25 % en volume. Lorsqu'il s'agit d'atmosphères habitables, cette concentration acceptable du point de vue physiologique devient inacceptable vis-à-vis du risque d'incendie : la limite réglementaire supérieure dans un habitat a été fixée à 25 %. En général, pour la surveillance des ambiances de saturation,

on règle les alarmes hautes des analyseurs de contrôle à 23 %, et le suivi des pressions partielles physiologiques s'effectue dans les valeurs inférieures.

Cette mesure de prévention de l'incendie s'applique aussi aux ambiances d'air (21 %), lorsque de l'oxygène pur est respiré au masque (décompression ou médecine hyperbare) et qu'il y a un risque de contamination de l'ambiance (air) par l'oxygène des masques. Des déverseurs rejetant le gaz expiré à l'extérieur sont obligatoires et la fraction d'oxygène dans l'ambiance doit être contrôlée en continu (maximum permis : 25 %).

Par ailleurs toute manipulation d'oxygène doit respecter les règles habituelles de propreté, de marquage des circuits, de contrôle des teneurs, de ventilation des zones concernées, etc.

CONCLUSION

L'application de conditions hyperoxiques lors d'activités hyperbares est nécessaire pour assurer un mélange respiratoire convenable ; elle l'est aussi lorsque l'on veut diminuer le temps de décompression [14] ou traiter des accidents de décompression ou d'autres pathologies sans rapport avec des phénomènes emboliques [17].

Une bonne connaissance de tous ces aspects des effets de l'oxygène est indispensable aussi bien pour l'établissement de protocoles d'intervention, préservant la santé des personnes, que pour ceux qui, de par leur activité, sont confrontés à cette problématique.

En effet, si la majorité des entreprises réalisant des travaux en milieu hyperbare sont au fait de ces contraintes très spécifiques, il n'en est pas de même de leurs clients dans les établissements desquels se déroulent ces travaux. Ceux-là, qui doivent participer à l'évaluation des risques et à l'établissement de plan de prévention, ne perçoivent en général pas toutes les implications de sécurité et de coût engendrées par la mise en œuvre de ces gaz respiratoires spéciaux.

Pour assurer une meilleure prévention, nous suggérons que les valeurs limites présentées ici figurent dans les tableaux de VLE ou VME industrielles ou que, dans ces tableaux, il soit fait référence à celles fixées par le décret « hyperbare ».

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Décret 90-277 du 28 mars 1990 et arrêtés d'application, Brochure 1636, Travaux en milieu hyperbare - Mesures particulières de prévention. *Journal officiel République française*, ed. 1992.
- [2] Travaux et Activités Hyperbares, in Sécurité et conditions de travail, dictionnaire permanent, *Éditions Législatives, Montrouge*, p. 3139-3183.
- [3] BERT P. – La pression barométrique. *Éditions du CNRS, Paris*, 1878, réédition 1979.
- [4] BENNETT P. B. and ELLIOTT D. H. – The physiology and medicine of diving, 4th Ed., *Baillière Tindall, London*, 1993, 613 p.
- [5] BONNEIL P., WATTEL F., MATHIEU D., BOCQUILLON N. – Toxicité pulmonaire de l'oxygène. In : *Traité de médecine hyperbare Wattel F. et Mathieu D.* (Ed. 2002). *Ellipses, Paris*, p. 600-614.
- [6] BROUSSELE B. – Physiologie et médecine de la plongée. *Ellipses Ed.*, 1992, 687 p.
- [7] CLARK J. M., LAMBERTSEN C. J. – Effects of inspired oxygen pressure on the nature and degree of oxygen tolerance modification, *Proceedings of the 8th symposium on underwater physiology. Undersea and Hyperbaric Medical Society, Bethesda MD*, 1984, p. 31-41.
- [8] CLARK J. M. – Oxygen toxicity. In : *The Physiology and Medicine of Diving*, Bennet and Elliott, 4th Edition. *Saunders Co. Ltd, London*, 1993, pp. 121-169.
- [9] DONALD K. – Oxygen and the diver. *Harvey Swan, UK : SPA Ltd*, 1992.
- [10] HAMILTON R.W., KENYON D.J. Managing oxygen exposure when preparing decompression tables, *Proceedings annual meeting EUBS 89 EILAT*, p. 72-77.
- [11] LAMBERTSEN C.J. – Physiologic factors in human organ oxygen tolerance extension. *EUBS XIV Annual meeting, Aberdeen*, 1988.
- [12] LE PÉCHON J.-C. – Oxygen decompression in tunnelling. In : *Engineering and Health in Compressed Air Work*, Jardine F. M. and McCallum ed. *E & F Spon. London*, 1992, p. 529-538.
- [13] LE PÉCHON J.-C. – Législation française du travail en conditions hyperbares. In : *Traité de médecine hyperbare Wattel F. et Mathieu D.* Ed. *Ellipses, Paris*, 2002, p. 653-662.
- [14] LE PÉCHON J.-C. – Sécurité en situation hyperbare. In : *Traité de médecine hyperbare Wattel F. et Mathieu D.* Ed. *Ellipses, Paris*, 2002, p. 600-614.
- [15] LOUGE P., MELIET J.-L. – Toxicité de l'oxygène sur le système nerveux. In : *Traité de médecine hyperbare Wattel F. et Mathieu D.* Ed. *Ellipses, Paris*, 1992, p. 627-632.
- [16] STERK W. – Intermittent hyperoxia in operational diving: what are the safe limits ? In : *proceedings XII EUBS Annual Meeting, Rotterdam*, 1986, p.55-64.
- [17] WATTEL F., MATHIEU D. – *Traité de médecine hyperbare.* Ed. *Ellipses, Paris*. 711 p.