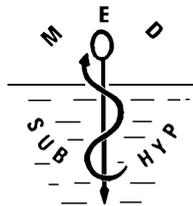


**BULLETIN de
MEDECINE
SUBAQUATIQUE
et HYPERBARE**

2012. Tome 22. Supplément.

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



REVUE SEMESTRIELLE

Date de publication : octobre 2012

SOCIETE DE PHYSIOLOGIE ET DE MEDECINE
SUBAQUATIQUES ET HYPERBARES
DE LANGUE FRANCAISE

Déclarée le 24 Décembre 1968

J.O. du 11 Janvier 1969

PRESIDENTS HONORAIRES

Pr. J.DOR (1969-1972)	Dr. Ph. CAVENEL (1988-1991)
Pr. A. APPAIX (1972-1976)	Dr. J.C. ROSTAIN (1991-1994)
Dr. R. RISPE (1976-1979)	Pr. F. WATTEL (1994-1997)
Dr. B. BROUSSOLLE (1979-1982)	Pr J.M. SAINTY (1997-2000)
Pr. J. CORRIOL (1982-1985)	Dr J.L. MELIET (2000-2003)
Pr. Ph. OHRESSER (1985-1988)	

BUREAU DE LA SOCIETE EN 2012

Président:	MATHIEU, D.	Administrateurs :	BARTHET, M.C.
Vice Présidents :	BARTHELEMY, A. GENESTAL, M.		BERGMANN, E. BLATTEAU, E.
Secrétaire général :	DELAFOSSE, B.		GRANDJEAN, B
Secrétaire adjoint :	COULANGE, M.		PONTIER J.M.
Trésorier :	LOUGE, P.		REGNARD, J.
Trésorier adjoint :	HUGON, M.		RISSO, J.J. SOUDAY, V.

.CONSEIL SCIENTIFIQUE

Coordinateur :	MELIET, J.L.	
Conseillers :	BARTHELEMY, A. CONSTANTIN, P. PONTIER, J.M. SIMON, O.	BLATTEAU, J.E. COULANGE, M. ROSTAIN, J.C. WENDLING, J

Secrétariat: Dr. B. Delafosse, Hôpital Edouard Herriot, 69437 Lyon cedex 03

BULLETIN de MEDECINE SUBAQUATIQUE et HYPERBARE
2012. Tome 22, Supplément.

Dépôt légal : 7 avril 2011

ISSN 1248 - 2846

Responsable de la rédaction
B. Delafosse,

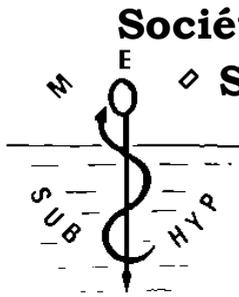
Directeur de la publication
J.C. Rostain

Imprimeur
Pronto Offset, 22 Chem. St Jean du Desert, 13005 Marseille

Editeur
Société de physiologie et de médecine subaquatiques et hyperbares
de langue française
Centre Hyperbare, CHU de Sainte Marguerite
270 Bd de Ste Marguerite
13274 Marseille cedex 09

Date de publication : octobre 2012

Toulouse



Société de Physiologie et de Médecine
◇ **Subaquatiques et Hyperbares**
de langue française

<http://www.medsubhyp.com>

MEDSUBHYP

Réunion d'Automne

Samedi 10 novembre 2012

HOTEL – DIEU

SALLE DES PELERINS

TOULOUSE

Réunion d'automne

**SOCIETE DE PHYSIOLOGIE ET DE MEDECINE SUBAQUATIQUES
ET HYPERBARES DE LANGUE FRANCAISE**

10 Novembre 2012 à TOULOUSE

HOTEL DIEU - SALLE DES PELERINS

8h30 : ACCUEIL : inscription gratuite sur place

9h00 – 9h15 : OUVERTURE Mr Jacques Romatet : Directeur Général du CHU de Toulouse, Pr Bernard Pradère : Président de la CME du CHU de Toulouse.

9h15-10h45 : Médecine hyperbare INFECTIONS OSTEO-ARTICULAIRES ET OHB

Modérateur : Michèle Genestal (CHU Toulouse)

- **Diagnostic et antibiothérapie: Bruno Marchou et Pierre Delobel (CHU Toulouse)**
- **Traitement chirurgical: Paul Bonneville (CHU Toulouse)**
- **Oxygénothérapie hyperbare : Daniel Mathieu (CHU Lille)**

10h45 – 11 h15 : Pause

11h15 – 12h45 : MEDECINE HYPERBARE Communications libres

Modérateur : Daniel Mathieu (CHU Lille)

- **Communications sur le thème :**

Prise en charge des ostéoradionécroses mandibulaires en 2012 :

- **L'oncologue-radiothérapeute : Anne Laprie (Institut Claudius Regaud Toulouse)**
- **Le chirurgien : Franck Boutault (CHU Toulouse)**
- **Le médecin hyperbariste : Michèle Genestal (CHU Toulouse)**

Prise en charge multidisciplinaire du pied diabétique : Jacques Martini et Marie-Cécile Barthet (CHU Toulouse)

- **Communications hors thème :**

Evaluation de la prise en charge des intoxications oxycarbonées dans les services d'urgence de la région PACA : Mathieu Coulange et col. (CHU Marseille)

Application d'un circuit fermé pour assurer une oxygénation normobare (ONB) prolongée en médecine d'urgence: Jürg Wendling (Bienne Suisse)

12h45 – 14h15 : Buffet Salle des Colonnes (participation aux frais)

14h15 – 16h15 : Médecine de plongée : PLONGEE AUX MELANGES

Modérateur : Alain Barthélémy (CHU Marseille)

Toulouse

- **Bases physiopathologiques: Sébastien de Maistre (SMHEP HIA Ste Anne Toulon)**
- **Plongée spéléologique – Evolution des techniques: Bernard Gauche (CH Libourne)**
- **Pratique et accidentologie :**
 - en plongée loisir : Mathieu Coulange (CHU Marseille)
 - en plongée professionnelle : Marc Borgnetta (INPP Marseille)
 - en plongée militaire : Pierre Louge (SMHEP HIA Ste Anne Toulon)

16h15 – 16h30 : Bourse MEDSUBHYP

16h30 – 17h00 : Pause

17h00 – 18h00 : MEDECINE DE PLONGEE Communications libres

Modérateur : Michel Hugon (SMHEP HIA Ste ANNE Toulon).

Plongée spéléologique : accidentologie dans le département du Lot: Patrick Landon et col. (Cahors et CHU Toulouse)

Solubilité des gaz dans les systèmes confinés. Approche par la thermodynamique non extensive : Pierre Letellier et Mireille Turmine (CNRS Paris)

Etude d'évaluation et de prévention aux risques d'exposition au méthanol lors d'un chantier sous-marin à saturation: Marc Borgnetta (INPP Marseille)

Cinétique d'apparition des épanchements gazeux intra-vasculaires après décès en plongée. Etude expérimentale par TDM chez le porc : Pierre-Eloi Laurent et col. (CHU Marseille)

Comité d'Organisation et Secrétariat - Professeur Michèle Génestal

Centre de Médecine Hyperbare

Hôpital PURPAN - TSA 40031 - 31059 Toulouse Cedex 9

Tél (33) 5 61 77 97 35 – (33) 5 61 77 22 88 - Fax (33) 5 61 77 77 43 –

Mail : reapu.sec@chu-toulouse.fr

RESUMES

Session : Médecine Hyperbare

EVALUATION DE LA PRISE EN CHARGE DES INTOXICATIONS OXYCARBONEES DANS LES SERVICES D'URGENCE DE LA REGION PACA

M. COULANGE (1), N. PERSICO (2), G. NOEL (3), N. POUSSARD (2), R. TOESCA (1), P. CANO (2), A. DESPLANTES (1), B. BARBERON (1), G. VIUDES (3), A. BARTHELEMY (1), J.P. AUFFRAY (1)

(1) Pôle Réanimation Urgences SAMU Hyperbarie, AP-HM, Marseille

(2) SAU Nord, AP-HM, Marseille

(3) Observatoire Régional des Urgences PACA (ORU PACA), Hyères

Introduction: L'intoxication oxycarbonée nécessite une oxygénothérapie normobare pendant 12 h. En cas de critères de gravité clinique ou de grossesse, le traitement doit être complété par une oxygénothérapie hyperbare (OHB) en urgence. Le risque de séquelle à long terme est directement lié à la qualité de la prise en charge thérapeutique. L'objectif de ce travail est d'évaluer les modalités d'oxygénation des patients adressés au service d'accueil des urgences (SAU) pour intoxication oxycarbonée.

Méthode: Il s'agit d'une analyse rétrospective utilisant les données extraites par l'ORU PACA à partir du Terminal Urgence de 25 SAU de la région PACA. Les critères de sélection sont le code de diagnostic de sortie T58 (CIM10 : intoxication oxycarbonée) et la durée de séjour (< 6 h, 6 à 12 h, > 12 h) sur l'année 2009 et 2010. Une analyse plus précise est effectuée sur un échantillon d'intoxiqués adressés dans l'un des 25 SAU. Les critères sont la clinique, la biologie, la durée de séjour et les modalités d'oxygénothérapie.

Résultats: 1041 dossiers ont été retenus en PACA. Le sex ratio est d'un homme pour une femme. 68% ont moins de 45 ans. La classification clinique des malades des urgences (CCMU) est à 1 chez 12%, à 2 chez 59%, à 3 chez 27% et à 4 ou 5 chez 2%. 11% des patients codés T58 ont une durée de séjour de plus de 12 h, 12% de 6 à 12 h et 77% inférieure à 6 h (avec des extrêmes allant de 50 à 100% en fonction des SAU). L'analyse plus précise de 88 dossiers permet de confirmer le diagnostic par des critères cliniques et biologiques chez 34 patients et de poser l'indication d'OHB chez 15 patients. Seulement trois intoxiqués sont adressés au centre hyperbare. En l'absence d'indication d'OHB (n=19), 2 intoxiqués avérés ont une durée de séjour de plus de 12 h (10%), 3 de 6 à 12 h (16%) et 14 de moins de 6 h (74%).

Conclusion: L'ORUPACA met à disposition un outil performant d'évaluation des pratiques professionnelles à travers le Terminal Urgence. Cette étude est toutefois limitée par la fiabilité du codage. Lorsque l'intoxication oxycarbonée est avérée par des critères cliniques et biologiques, seulement 15% des intoxiqués bénéficient d'une oxygénothérapie conforme aux recommandations. Une politique d'information des SAU pourrait améliorer la prise en charge thérapeutique en région PACA.

Toulouse

**APPLICATION D'UN CIRCUIT FERME POUR ASSURER UNE OXYGENATION
NORMOBARE (ONB) PROLONGEE EN MEDECINE D'URGENCE**

JÜRIG WENDLING,

Bienne Suisse

Introduction :

Souvent les patients qui respirent de l'oxygène (O₂) dans le but de recevoir une ONB jusqu'au service médicalisé n'obtiennent pas le pourcentage d'O₂ exigé ou l'oxygénation se termine prématurément par manque d'O₂ comprimé disponible.

Hypothèse :

Une intoxication au monoxyde de carbone ou un plongeur en situation lointaine pourraient profiter d'une autonomie 20 à 30 fois plus grande si l'O₂ était appliqué par un dispositif à circuit fermé.

Technique :

Un dispositif d'ONB à circuit fermé a été conçu, basé sur les critères 1) d'être applicable par des personnes sans éducation médicale approfondie, 2) être abordable et 3) être assez robuste pour être utilisé sur le site de plongée, chantier ou à bord d'un bateau.

Résultat :

Après le choix du matériel (absorbeur, masque, valve de surpression, montage prêt à porter) et une validation en milieu clinique (1991) un assemblage a satisfait aux tests et à la certification CE. Depuis, un grand nombre de plongeurs, surtout des plongeurs professionnels, ont choisi ce système pour les premiers secours en cas d'accident de plongée ; plusieurs expéditions de haute montagne l'ont utilisé pour une oxygénation en cas de maladie d'altitude. Entre-temps, la plupart des clubs de plongée en pays germanophones, les plongeurs scientifiques et les pompiers et police des lacs ont appliqué ce dispositif sans complication et avec des formations minimales. En outre, de tels appareils ont été utilisés en sauvetage alpin pour traiter des victimes d'hypothermie (glaciers, victimes d'avalanche). Récemment le service médical pour des projets de tunnels à air comprimé a été équipé avec ce système soit comme appareil d'évacuation soit en réanimation pour une ventilation contrôlée dans le compartiment à surpression.

Conclusion :

Une ONB par circuit fermé est réalisable et même recommandée là où les ressources d'O₂ sont limitées ou si l'évacuation dure longtemps.

Session : Médecine de plongée

PLONGEE SPELEOLOGIQUE : ACCIDENTOLOGIE DANS LE DEPARTEMENT DU LOT

P. LANDON, M.C. BARTHET, M. GENESTAL.

Centre de Médecine Hyperbare. Hôpital Purpan. CHU Toulouse. Place Baylac.

TSA 40031. F 31059 Cedex 9. centre hyperbare@chu-toulouse.fr

Le Lot est un département recherché pour ses nombreux sites spéléologiques par les plongeurs en eaux souterraines au niveau européen. Ce travail porte sur les événements survenus dans le département du Lot (46) de Janvier 2000 à Juin 2012. Au total 34 accidents ont été dénombrés (soit 2 à 3 par an) : ADD 60

%, accident biochimique 30 % et divers 10 % (noyade, traumatisme, OAP d'immersion). Les étiologies se répartissent de manière assez homogène entre les incidents purement techniques, les erreurs de procédure, les causes classiques telles que le froid, la fatigue, le manque d'entraînement et dans 20% des cas aucune cause évidente.

Evolution : 8 plongeurs sont décédés dont 7 décès sur site dans la cavité par accident biochimique ; 23 patients ont été hospitalisés (70%) en général pour des ADD traités en centre hyperbare. Pour ces plongeurs, la récupération après OHB a été complète dans plus de 90 % des cas ; lorsque des séquelles persistent après traitement elles restent très minimales ; 4 plongeurs non hospitalisés ont pu regagner leur domicile après des soins prodigués sur place avec récupération totale.

On constate que les 3/4 des plongeurs spéléo accidentés se sont rendus au centre hyperbare le plus proche par leurs propres moyens sans appel des secours, sans aucune médicalisation préalable sur site. De ce fait, le traitement hyperbare a été retardé (délai de 5 h à 24 h).

En conclusion notre étude démontre que la plongée souterraine est une activité « engagée » aussi accidentogène que d'autres activités de plein air « à risque ». Des efforts doivent être réalisés en matière de formation, de gestion du matériel et des procédures. La gestion des secours en milieu souterrain doit être améliorée en prenant l'exemple du milieu maritime.

SOLUBILITE DES GAZ DANS LES SYSTEMES CONFINES. APPROCHE PAR LA THERMODYNAMIQUE NON EXTENSIVE

PIERRE LETELLIER*, MIREILLE TURMINE

Laboratoire Interfaces et Systèmes Electrochimiques, CNRS, UPR15 LISE, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, Case 133, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France ;
e-mail: pierre.letellier@upmc.fr

La modélisation du comportement des fluides sursaturés en gaz est généralement conduite en attribuant une forme précise aux agrégats gazeux dans le milieu. L'énergie interfaciale entre le gaz contenu dans la bulle et le fluide est alors introduite, dans les conditions d'équilibre, à partir de la loi de Laplace.

Or, le plus souvent les interfaces gaz/environnement sont imprécises et ne permettent pas de situer exactement les frontières géométriques de l'agrégat. Sa forme est le plus souvent imposée par le système lui-même. On peut, pour s'en persuader prendre l'exemple d'une « bulle de gaz » qui se forme dans un tissu physiologique lors de la décompression du plongeur. Où se situe la frontière entre l'agrégat gazeux et son environnement ? Quelle est la valeur de l'aire interfaciale et de l'énergie qui lui est associée ? Comment introduire ces paramètres dans les relations de la thermodynamique pour décrire le comportement du système et son éventuelle évolution ?

Le recours à une thermodynamique non extensive (*Turmine, et coll. Journal of Physical Chemistry B 2004, 108, 18980*), qui suppose des frontières « floues » entre les phases en contact, permet de répondre en partie à ces questions et d'envisager de nouvelles voies de réflexion. On montre, entre autres

- qu'il est peu probable que la loi de Laplace s'applique aux petits agrégats gazeux
- que l'on peut prévoir des conditions de dégazage des fluides dans des conditions de saturation et même de sous-saturation.

Toulouse

ETUDE D'ÉVALUATION ET DE PREVENTION AUX RISQUES D'EXPOSITION AU METHANOL LORS D'UN CHANTIER SOUS-MARIN A SATURATION.

M BORGNETTA

INPP, Marseille

Introduction : Octobre 2010, Girassol, Angola, rupture par – 50 m de fond d'un flexible qui alimente en méthanol la conduite qui ramène au navire support de stockage et traitement le pétrole extrait des grands fonds marins.

Pourquoi du méthanol injecté dans le pétrole ? Le méthanol prévient la formation d'hydrates de gaz pouvant obstruer les conduites.

Le point crucial se joue sur le risque d'évaporation du méthanol dans la tourelle lors du retour des scaphandriers leurs vêtements pouvant en être enduits.

Nous avons cinq jours pour établir les procédures.

Méthode : À partir des caractéristiques physico-chimiques du méthanol, de ses risques physiques et toxiques, notre procédure se décompose en 4 phases échelonnées dans le temps.

1^{ère} phase : prévoir les Equipements de Protection Individuelle et les moyens de lutte contre l'incendie.

2^{ème} phase : réduire au maximum le risque d'évaporation. Nous décidons :

- un système d'aspersion réalisant un rinçage complet de l'équipement du scaphandrier
- la mise en surpression de la tourelle pendant la phase de rinçage de l'équipement du scaphandrier suivie d'une large ventilation. La vitesse d'évaporation d'une substance volatile en solution étant inversement proportionnelle à la pression ambiante.

3^{ème} phase : contrôle de l'absence de méthanol ambiant par tube colorimétrique.

4^{ème} phase : surveillance médicale des plongeurs pendant toute la phase de décompression. Du 4-6 méthyl pyrazole, antidote du méthanol, sera disponible sur site.

Résultat : L'opération s'est déroulée sans aucun incident. Afin de connaître l'intérêt des procédures envisagées, un des plongeurs portait une cotte de travail en texture de coton qu'il enleva avant de rentrer dans la tourelle et qu'il stocka à l'extérieur. A la fin des opérations, la recherche de méthanol au niveau de cette cotte de coton s'est avérée largement positive.

Conclusion : Nos craintes de contamination par du méthanol lors du retour des plongeurs à la tourelle se sont révélées exactes et cette procédure sera retenue par les Sociétés Offshore en cas de nouvel accident de ce type.

Mots clés : plongée, saturation, méthanol, hydrates, 4-6 méthyl pyrazole, Fomépizole®

Correspondance : Dr Marc BORGNETTA

Médecin chef du Service Médical de l'INPP, Entrée N° 3, Port de la Pointe Rouge, 13008 Marseille, France

marc.borgnetta@wanadoo.fr

**CINETIQUE D'APPARITION DES EPANCHEMENTS GAZEUX INTRA-VASCULAIRES
APRES DECES EN PLONGEE**

ETUDE EXPERIMENTALE PAR TDM CHEZ LE PORC

**LAURENT PIERRE-ELOI^{A*}, COULANGE MATHIEU^B, ROLLAND PIERRE-HENRI^A,
BARTOLI CHRISTOPHE^C, ROSTAIN JEAN-CLAUDE^B, LUCIANO MICHEL^B, COHEN
FREDERIC^A, BOUSSUGES ALAIN^B, BARTHELEMY ALAIN^B, PIERCECCHI MARIE-
DOMINIQUE^C, VIDAL VINCENT^A AND GORINCOUR GUILLAUME^A**

^a Laboratoire de physiopathologie et de thérapeutique vasculaire, Aix Marseille Université, Marseille

^b UMR MD2, Physiologie et Physiopathologie en Conditions d'Oxygénation Extrême (P2COE), Aix
Marseille Université et Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA), Marseille

^c Service de Médecine Légale et Droit de la Santé, CHU Timone, Marseille

* Corresponding author. Tel. : +33 (0)4 91 38 56 75 ; fax : +33 (0)4 91 38 58 81.

Email adress: pierre-eloi.laurent@ap-hm.fr

La tomодensitométrie post-mortem facilite le diagnostic des épanchements gazeux intra vasculaires chez le plongeur décédé. Elle est donc utilisée par certains auteurs pour orienter le diagnostic vers une embolie gazeuse systémique secondaire à un barotraumatisme. Toutefois, la putréfaction, les gestes de réanimations et la dénitrogénéation tissulaire post mortem génèrent également des épanchements gazeux intra vasculaires et font poser à tort le diagnostic de barotraumatisme.

Objectifs : ce travail a pour but de déterminer la topographie et le délai d'apparition des gaz post mortem liés respectivement à la putréfaction, aux gestes de réanimation, et à la dénitrogénéation.

Matériel et Méthodes : Une étude expérimentale contrôlée a été menée chez 9 porcs. Trois groupes de trois cochons ont été étudiés en scanner post-mortem de H0 à H24 : 1 groupe témoin non plongeur non réanimé, 1 groupe plongeur exposé en pre-mortem à une pression absolue maximale de 5 bars pendant 16 minutes avec respect des procédures de décompression et 1 groupe non plongeur réanimé avec ventilation manuelle et compression thoracique pendant 20 minutes. L'étude des gaz intra-vasculaires a été réalisée en tomодensitométrie et corrélée aux résultats de l'autopsie.

Résultats : Dans le groupe plongeur, les gaz de dénitrogénéation apparaissent précocement, dès la 1^{ère} heure post mortem dans le système veineux puis se généralise sur le versant artériel aux environs de la 3^{ème} heure. L'apparition du gaz artériel est plus tardive dans le groupe réanimé, et absente durant les 24 premières heures dans le groupe témoin.

Conclusion : Les épanchements gazeux post mortem observés en tomодensitométrie ne sont pas spécifiques du diagnostic de barotraumatisme. La précocité de la tomодensitométrie pourrait limiter l'impact des modifications post mortem, en particulier lorsque le décès survient au décours d'une plongée profonde.

Keywords

Embolie gazeuse, tomодensitométrie, animal, décès en plongée

CONFERENCE

INFECTIONS OSTEO-ARTICULAIRES DE L'ADULTE : DIAGNOSTIC ET ANTIBIOTHERAPIE

B. MARCHOU, P. DELOBEL. Service des Maladies Infectieuses et Tropicales, CHU Purpan, Toulouse (France).

Les infections ostéo-articulaires (IOA) sont des pathologies complexes, aiguës ou plus souvent chroniques (ou susceptibles de le devenir), qui requièrent une prise en charge multi-disciplinaire médico-chirurgicale. Sur le plan physiopathologique, on peut distinguer les infections par voie hématogène des infections par contamination directe, traumatique ou chirurgicale. Une deuxième distinction importante concerne les IOA survenant sur prothèse ou matériel d'ostéosynthèse de celles qui touchent le tissu natif.

Les infections susceptibles de relever de l'oxygénothérapie hyperbare impliquent sur le plan physiopathologique la présence d'une hypoxémie tissulaire favorisant la pullulation de bactéries anaérobies. Ainsi, l'oxygénothérapie hyperbare est utilisée dans les infections nécrosantes impliquant des bactéries anaérobies par contamination tellurique, souvent post-traumatique, ou digestive. Ces infections concernent le plus souvent les tissus mous (peau, fascia, muscles) mais peuvent également atteindre les tissus ostéo-articulaires. Un cas particulier d'intérêt de l'oxygénothérapie hyperbare est représenté par les ostéonécroses mandibulaires, situations dans lesquelles une infection chronique est souvent associée.

Les IOA chroniques se caractérisent par la présence d'un biofilm et la persistance de bactéries intracellulaires. Les biofilms se développent sur des surfaces inertes, séquestres osseux ou corps étrangers et mettent les bactéries à l'abri des cellules de l'inflammation...et des antibiotiques dont les concentrations requises pour inhiber *in situ* la croissance des bactéries peuvent être 1000 fois supérieures aux CMI testées *in vitro* sur les mêmes bactéries « planctoniques ». De plus certaines bactéries, entre autres *Staphylococcus aureus*, peuvent être internalisées au sein d'ostéoblastes et être inaccessibles à des antibiotiques à faible diffusion intra-cellulaire, d'autant plus que ces bactéries peuvent évoluer vers un phénotype variant de micro-colonies (*small colony variants*) avec une croissance ralentie et une résistance accrue vis-à-vis d'antibiotiques comme les β -lactamines, glycopeptides et aminosides. Dès lors, on conçoit que l'antibiothérapie ne peut être efficace dans les IOA chroniques qu'en complément d'une chirurgie « carcinologique »

Les situations cliniques rencontrées sont : (1) les infections (sub)aiguës hématogènes, ostéomyélites aiguës de l'enfant, spondylodiscites et sacro-iliites ; (2) les infections post-traumatiques ou post-chirurgicales le plus souvent sur matériel étranger ; (3) les infections osseuses/articulaires favorisées par une artériopathie notamment du pied diabétique ; (4) les ostéites par contiguïté avec une escarre ischiatique (paraplégiques) ou sacrée (grabataires) ou encore un abcès intra-pelvien (ostéite sacrée).

Le diagnostic d'IOA est parfois clinique : raideur douloureuse et segmentaire du rachis évoquant une spondylodiscite ; ulcération profonde avec contact osseux (mal perforant plantaire ou escarre ischiatique du paraplégique) ; fistule cutanée purulente signant une infection profonde, le plus souvent osseuse ou articulaire. Dans tous les cas, l'imagerie (radiographies standard, tomographie, IRM, scintigraphies) complète l'examen clinique pour confirmer le diagnostic d'infection ostéo-articulaire, mettre en évidence des collections et des séquestres osseux, zones non perfusées inaccessibles à l'antibiothérapie administrée par voie systémique.

Sur le plan microbiologique, les IOA peuvent être mono-microbiennes ou pluri-microbiennes souvent après une contamination tellurique post-traumatique. Les bactéries anaérobies méritent une mention particulière : bacilles à Gram positif sporulés (*Clostridium* dont *C. perfringens*), bacilles à Gram négatif non sporulés (*Bacteroides*, *Prevotella*...) ou cocci à Gram positif (*Peptostreptococcus*, streptocoques anaérobies...). La culture bactériologique des anaérobies est de faible rentabilité en raison de prélèvements faits dans des conditions aérobies : ces bactéries doivent donc être suspectées devant certains tableaux cliniques et prises en compte dans l'antibiothérapie choisie même si elles n'ont pas été mises en évidence en culture. Dans des infections post-traumatiques avec contamination tellurique ou par du goudron, penser aussi à *Bacillus cereus*, bacille aérobie à Gram positif, résistant à l'association amoxicilline/acide clavulanique et sensible aux aminosides (gentamicine) et fluoroquinolones.

Un diagnostic microbiologique est impératif pour répondre à l'exigence première du traitement antibiotique, à savoir d'être **bactéricide** : il repose donc sur l'isolement du (des) pathogène(s) au niveau du site de l'infection. A cet égard, il ne faut pas prélever le pus qui sourd au niveau d'une fistule ou faire un écouvillonnage dans la profondeur d'une escarre : le prélèvement sera positif...mais on ne saura pas faire la part entre colonisation et infection. Les prélèvements permettant d'attester le caractère infectieux doivent être des prélèvements « protégés » et profonds : ponction d'une collection, prélèvements per-opératoires (multiples +++), car un seul prélèvement positif à une bactérie commensale cutanée type *Staphylococcus epidermidis* ou *Propionibacterium acnes* peut n'être qu'un banal contaminant)

Sur le plan thérapeutique, l'élément central est la prise en charge chirurgicale des IOA chroniques, qui doit permettre l'excision la plus complète possible des tissus nécrosés, séquestres osseux ou corps étranger, la revascularisation d'un membre le cas échéant. Les autres moyens thérapeutiques, antibiothérapie et oxygénothérapie hyperbare ne viennent qu'en complément du geste chirurgical.

L'antibiothérapie initiale probabiliste doit cibler les pathogènes les plus souvent impliqués, puis être adaptée en fonction des antibiogrammes. Elle doit répondre à deux impératifs : bactéricide - par voie orale ou parentérale - et prolongée en moyenne six semaines. Le choix antibiotique doit privilégier les antibiotiques à bonne diffusion intra-osseuse (tableau 1) comme par exemple une association rifampicine+fluoroquinolone dans les ostéites à staphylocoque (si la souche est sensible à ces deux antibiotiques). Les bactéries anaérobies sont sensibles aux associations β -lactamine + inhibiteur de pénicillinase (amoxicilline ou ticarcilline + acide clavulanique ; piperacilline + tazobactam) et au métronidazole qui bénéficie d'excellentes caractéristiques PK/PD dans les IOA impliquant des bactéries anaérobies. Dans les ostéo-nécroses mandibulaires, post-radicales ou secondaires à la prise de biphosphonates, une infection chronique par des bactéries de la flore buccale est souvent associée (streptocoques oraux, *Peptostreptococcus*, *Prevotella*, *Actinomyces*...) L'antibiothérapie fera le plus souvent appel à l'amoxicilline + acide clavulanique et/ou à la clindamycine pour une durée prolongée.

Tableau 1 : Diffusion osseuse des antibiotiques

Bonne	Acide fusidique, fluoroquinolones, macrolides, métronidazole, rifampicine, teicoplanine, tétracyclines, triméthoprim
Moyenne	Céphalosporines, clindamycine, daptomycine, ureidopénicillines, fosfomycine, vancomycine, sulfaméthoxazole, linézolide,
Faible	Pénicillines M, aminopénicillines, imipenem, polypeptides, aminosides

Le tableau 2 indique les schémas antibiotiques proposés dans les principales IOA documentées de l'adulte.

Infections ostéo-articulaires

Tableau 2 : antibiothérapies proposées dans les principales IOA documentées de l'adulte.

Micro-organismes	Traitement de 1 ^{ère} intention	Relais oral
Staphylocoque méti-S	Péni M (ou céfazoline) + gentamicine	Rifampicine + Ofloxacine (ou AF ou cotrimoxazole ou Clindamycine)
Staphylocoque méti-R	Glycopeptide + gentamicine	Rifampicine + AF (ou cotrimoxazole)
Streptocoques	Amoxicilline ± gentamicine	Clindamycine (si érythro S)
BGN (sauf <i>Pseudomonas sp</i>)	C3G	Fluoroquinolone ou cotrimoxazole
<i>Pseudomonas</i>	Ceftazidime + aminoside ou cipro	Ciprofloxacine ≥15 jours de bithérapie
Anaérobies	Métronidazole (sauf <i>P. acnes</i>)	Clindamycine

L'oxygénothérapie hyperbare est souvent associée à la prise en charge thérapeutique des infections ostéo-articulaires avec nécrose et bactéries anaérobies, la lutte contre l'ischémie tissulaire étant un des facteurs-clés de l'évolution. Cependant, l'intérêt de ce traitement ne fait toujours pas l'objet de recommandations consensuelles faute de données issues d'essais contrôlés sur des effectifs suffisants.

Pour en savoir plus :

- PILLY 2012 : chapitres 45, 46 : Infections ostéo-articulaires ; infections du pied diabétique
- Zimmerli et al. Prosthetic joint infections. N Engl J Med 2004 ; 351 :1645-54.
- Desplaces N. Bactériologie des infections ostéo-articulaires de l'adulte. Rev Rhum 2006 ;73 :129-35.
- Dossier infections osseuses : Lettre de l'infectiologue, 2012, tome XXVII, 3 : 110-37.
- Recommandations pour la Pratique Clinique : Spondylodiscites infectieuses primitives, et secondaires à un geste intra-discal, sans mise en place de matériel, 2007
- Recommandations de pratique clinique : Infections ostéo-articulaires sur matériel, 2009
- IDSA Clinical Practice Guidelines for the Diagnosis and Treatment of Diabetic Foot Infections. Clin Infect Dis 2012;54(12):132–173

ARTICLES

BASES PHYSIOPATHOLOGIQUES DE LA PLONGEE AUX MELANGES

S. DE MAISTRE, P. LOUGE, E. GEMPP, M. HUGON. SMHEP. HIA Ste Anne.
Boulevard Sainte Anne. 83800 Toulon Armées (France).

ABSTRACT

Gas mixture diving physiopathological basis. S de Maistre, P Louge, E Gempp, M Hugon. Bull. Medsubhyp. 2012, 22 (supp): 93 - 101. Synthetic gas mixtures, used to allow longer and deeper dives than air diving, have limits of use that depend essentially from gas toxicity. They are at the origin of new possibilities of diving accidents, particularly if diving rebreathers are used. On the other hand, apart from the High Pressure Nervous Syndrome, there is no specific accident with gas mixtures diving. Furthermore, gas mixtures diving physiopathology is quite similar with air diving physiopathology. That way, gas mixture diving accidents treatment don't differ from air diving accidents treatment.

Keywords: Diving ; Synthetic gaz mixtures ; Diving Rebreathers ; Gas toxicity ; Physiopathology.

INTRODUCTION

Un mélange respiratoire est un mélange de gaz contenant au minimum de l'oxygène, en quantité suffisante pour assurer une bonne oxygénation tissulaire à une pression donnée, et un ou plusieurs gaz diluants. L'air, mélange respiratoire naturel, a été le premier et reste le plus utilisé en plongée. Cependant, le désir de plonger plus profond en limitant les paliers de décompression ou de plonger plus profondément conduisit à le remplacer tout ou en parti par de l'oxygène et d'autres gaz diluants. Pour économiser ces gaz, est apparue la nécessité d'utiliser des appareils à recyclage de gaz. Avec l'introduction de ces mélanges gazeux et de ces nouvelles techniques de plongée sont apparus de nouvelles possibilités de survenue d'accidents de plongée.

Après des rappels sur l'utilisation des mélanges respiratoires en plongée, on étudiera la physiopathologie des accidents survenant en plongée aux mélanges. On se limitera à la plongée autonome et à la plongée au narghilé, la plongée par système n'étant plus pratiquée en France actuellement.

RAPPELS SUR L'UTILISATION DES MELANGES RESPIRATOIRES

Origine et intérêt des mélanges respiratoires

L'air, mélange respiratoire naturel, a été évidemment le premier utilisé pour l'alimentation des scaphandres ; mais il est apparu qu'à partir du moment où il est respiré à des pressions supérieures à la pression atmosphérique, il provoque, pendant la plongée, des troubles divers et nécessite à la remontée des précautions pour éviter les accidents de désaturation. Ses constituants, l'oxygène (21 p. 100) et l'azote (79 p. 100) étaient considérés, l'un comme indispensable à la vie et donc inoffensif, l'autre comme un simple diluant que l'on rendait responsable de tous les troubles observés. Il était donc logique d'envisager d'utiliser seulement l'élément vital, et c'est là l'origine des appareils à oxygène pur.

Mais l'usage inconsidéré de ces appareils donna lieu à des accidents dont l'oxygène n'était pas toujours la cause, et la nécessité de diluer l'oxygène par un gaz inerte apparut.

Le désir d'éviter les inconvénients de l'azote (densité, narcose, saturation des tissus) conduisit à employer, d'une part, des mélanges suroxygénés et, d'autre part, des mélanges dans lesquels l'azote était remplacé, tout ou en parti, par de l'hélium ou de l'hydrogène voire d'autres gaz plus exotiques, avec l'espoir d'abrèger la durée de la décompression et d'augmenter la profondeur accessible.

Deux mélanges respiratoires sont couramment employés aussi bien en plongée professionnelle que sportive.

Le Nitrox est composé d'oxygène et d'azote. On peut distinguer les Nitrox suroxygénés contenant plus de 21% d'oxygène encore appelé « Air enrichi », « Enriched Air » (EA) ou « Enriched Air Nitrox » (EAN) des anglo-saxons ou bien souvent Nitrox s'il est sous-entendu que le mélange est suroxygéné (ex : Nitrox 32,5 composé à 32,5% d'O₂ et à 67,5% de N₂); et les Nitrox sous-oxygénés dont le pourcentage d'oxygène est inférieur à 21% qui sont utilisés en plongée à saturation (niveau-vie). On ne s'intéressera ici qu'au Nitrox suroxygéné. Son utilisation permet de diminuer sa charge en azote par rapport à une plongée à l'air avec les mêmes paramètres. C'est le bon à tout faire, gaz principal pour des plongées longues et peu profondes, pour les plongées d'altitude en eau glaciale, gaz intermédiaire ou de décompression lors des plongées profondes au Trimix.

Le Trimix est composé d'oxygène, d'hélium et d'azote (ex : Trimix 23/41 composé à 23% d'O₂, de 36% de N₂ et de 41% d'He permet d'aller à 80 mètres de profondeur). Par rapport à l'air, son pourcentage d'azote est réduit permettant ainsi d'augmenter les profondeurs maximales de plongée. Il présente sur l'Héliox l'avantage de limiter le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions (SNHP), les pertes caloriques, les phénomènes de contre-diffusion isobarique et le coût. Néanmoins, il grève légèrement l'aisance respiratoire (un Trimix 10/67 à 130 mètres permet l'aisance respiratoire de l'air comprimé à 49 mètres). Au-delà de 150 mètres, la capacité de travail est restreinte. C'est LE gaz fond de la plongée sportive Tek.

Des mélanges respiratoires ont été ou sont encore utilisés en plongée professionnelle.

Le Neox est un mélange de néon et d'oxygène. Peu soluble, le néon s'absorbe moins vite que l'azote et pourrait présenter un intérêt pour des plongées brèves ou comme gaz intermédiaire afin de limiter la saturation. Mais il se restitue lentement, son avantage devient un inconvénient. Les études menées à son propos sont rares, les protocoles de

décompression fiables à son propos restent à inventer, et des plongeurs de l'Union Carbide traités pour accidents de décompression au néon semblent avoir mal répondu aux thérapies habituelles. C'est en outre un gaz au coût prohibitif. Bref, Le Neox, comme l'Argox (argon/oxygène – au contraire très soluble et narcotique), sont essentiellement des « gaz de laboratoire », leur présence dans quelques logiciels de décompression est surtout... artistique !

L'Hydreliox est un mélange d'hydrogène, d'hélium et d'oxygène. L'hydrogène est l'élément le plus léger sur terre. Il confère une extraordinaire aisance ventilatoire aux plongeurs (grande diminution des résistances dynamiques ventilatoires) : un Hydrox peut proposer à 600 mètres un mélange d'une densité de 6 g/l, soit 4,5 fois celle de l'air atmosphérique (environ 40 mètres à l'air). La solubilité de l'hydrogène dans les lipides supérieure à celle de l'hélium diminue les risques de SNHP. Son potentiel narcotique est à mi-chemin entre celui de l'azote et de l'hélium. L'Hydreliox est le gaz utilisé lors de l'expérience Hydra X menée par la COMEX. -701mètres en caisson, un exploit mondial. La réaction explosive de l'hydrogène confronté à l'oxygène réserve son usage à des pourcentages d'O₂ très faibles, inférieurs à 4%, donc à de très grandes profondeurs. Pour les mêmes raisons, sa mise en œuvre demande une technologie de pointe. L'Hydreliox est de très loin hors du champ d'action du plongeur sportif.

L'Heliox est un mélange d'hélium et d'oxygène utilisé pour les plongées profondes. Le pourcentage d'oxygène sera fixé à partir de la profondeur du chantier. Ce pourcentage est au minimum de 16% si le mélange doit être respiré à la surface ; sinon un autre gaz doit être prévu pour initier la descente (air comprimé par exemple). La profondeur minimum du changement de gaz sera celle où la PpO₂ de l'Héliox est de 0,16 ATA (6 mètres pour un Héliox 10/90). De même, un changement de gaz doit être prévu lors de la remontée car la décompression doit se faire avec un mélange au minimum normoxique. L'absence totale d'azote élimine les problèmes de narcose. La

masse volumique de l'hélium, 7 fois plus faible que celle de l' N_2 (densité de l'Héliox modérée en profondeur), induit moins de résistances dynamiques lors de sa ventilation d'où moins de risque d'essoufflement et capacité de travail du scaphandrier préservée (un Héliox 10/90 se respire à 130 mètres comme de l'air comprimé à 22 mètres). Cependant la densité de l'Héliox au-delà de 200 mètres redevient critique et limite les capacités de travail des scaphandriers. Avec l'Héliox on commence à aborder les gaz sportifs. L'Héliox est surtout utilisé en plongée professionnelle, en saturation. En plongée sportive, il l'est surtout par quelques plongeurs expérimentés, entraînés et lors d'immersion dépassant les cent mètres. Ou encore dans certains recycleurs.

Un petit mot pour l'oxygène : il n'est pas un mélange mais il est présent dans tous, et il reste LE gaz de la décompression (et le gaz thérapeutique lorsque survient un problème).

Il est actuellement admis qu'un mélange respiratoire a une action physiologique qui dépend à la fois de sa composition, de la concentration des ses constituants et de la pression à laquelle il est respiré. Ces deux derniers facteurs déterminent la pression partielle d'un gaz dans un mélange dont la valeur est, par définition, égale au produit de sa concentration par la pression absolue.

Le fait que l'action physiologique d'un gaz dépende de la valeur de sa pression partielle explique qu'un mélange respiratoire, toléré à la pression atmosphérique, puisse être toxique à partir d'une certaine profondeur.

Limites imposées par l'oxygène

Les valeurs de la pression partielle d'oxygène supportables pendant quelques heures consécutives, sans qu'apparaissent des troubles immédiats ou différés, sont comprises entre des limites que l'expérimentation a précisées.

Il ne faut pas que la concentration de ce gaz tombe au-dessous de 17 p. 100 dans un mélange respiré en pression atmosphérique (pression partielle $0,17 \times 1 = 0,17$ ATA), si l'on veut être à l'abri de troubles anoxiques dont le risque est aggravé par

l'effort musculaire. Au repos des concentrations en oxygène inférieures à 17 p. 100 sont supportables, mais à partir de 10 p. 100 environ (pression partielle de $0,10 \times 1 = 0,10$ ATA), la perte de connaissance est inéluctable.

Il ne faut pas non plus, que l'oxygène soit respiré pur à des profondeurs supérieures à 7 mètres, si l'on ne veut pas risquer d'accident hyperoxique, susceptible de se manifester brutalement dès que la pression partielle de l'oxygène dépasse la valeur de $1 \times 1,7 = 1,7$ ATA.

On admettait autrefois qu'à pression partielle égale, l'oxygène était plus toxique respiré pur que respiré dans un mélange. De nombreuses expériences ont infirmé cette opinion, et si l'on veut éviter l'apparition d'accidents aigus par manque ou par excès d'oxygène, mieux vaut s'en tenir, pour des durées d'inhalation de l'ordre d'une à deux heures, aux valeurs suivantes : $0,17$ ATA < PiO_2 < 2 ATA.

Pour des durées d'inhalation plus longues mais ne dépassant guère 6 heures, il est sage de maintenir la PiO_2 au-dessous de 1,7 ATA ; enfin, pour des durées encore plus longues, excédant 6 heures, il faut maintenir la PiO_2 aussi près que possible de 0,21 ATA pour éviter l'apparition des accidents chroniques d'irritation pulmonaire.

Limites imposées par le diluant (azote, hélium, hydrogène, argon)

Les gaz diluants utilisés dans la préparation des mélanges ont une action physiologique propre.

Jusqu'ici, ils sont choisis seuls ou en mélanges, de façon à éviter la narcose dans une tranche de profondeur donnée ; on tient compte des qualités de dissolution des gaz considérés dans l'organisme pour établir les tables de décompression appropriées à chaque gaz.

Plus grande est la profondeur de la plongée et moindre est le poids moléculaire du gaz diluant utilisé : l'argon, de fort poids moléculaire, provoque la narcose pour des pressions partielles plus faibles que l'azote, de poids moléculaire moindre, et c'est pourquoi il n'est pas utilisé pour la fabrication des mélanges de plongée. L'hélium de poids moléculaire inférieur à l'azote, est utilisé, seul ou mélangé à de l'azote, pour des plongées profondes.

Fort opportunément, l'utilisation à grande profondeur de gaz de faible poids moléculaire permet de maintenir les résistances dynamiques ventilatoires dans des limites acceptables.

Azote

Les mélanges oxygène-azote, appelés Nitrox, sont les plus couramment employés.

Du point de vue de la toxicité, les troubles imputables à l'azote limitent raisonnablement à 60 mètres la plongée à l'air. La pression partielle d'azote (P_{N_2}) a, dans ces conditions, la valeur suivante : $P_{N_2} = 7 \text{ ATA} \times 0,79 = 5,6 \text{ ATA}$. C'est la pression partielle limite d'emploi de l'azote en plongée.

Le plus souvent, étant donné qu'il est admis que l'oxygène joue un rôle négligeable dans l'apparition des accidents de désaturation, on utilise à des mélanges plus riches en oxygène que l'air atmosphérique, contenant donc moins d'azote, et la limite toxique de la pression partielle de ce gaz, fixée ci-dessus, n'est jamais atteinte. Par contre, la dissolution de l'azote dans les tissus, bien qu'inférieure en quantité à ce qu'elle est dans la plongée à l'air, conduit néanmoins, selon la profondeur et la durée, à effectuer une remontée strictement contrôlée pour éviter des accidents de désaturation.

Hélium

L'hélium, gaz inerte et léger (poids moléculaire 4 au lieu de 28 pour l'azote), existe à l'état naturel en grande quantité dans certains pays. Il fut expérimenté par la Marine américaine dès 1925 pour essayer d'abrèger la remontée, sans augmenter les risques d'accident de décompression.

Il apparut qu'il était beaucoup moins toxique que l'azote puisqu'il supprimait les troubles de la plongée profonde à l'air (nitrogen narcosis). Cependant, aux grandes profondeurs qu'autorise l'hélium peut apparaître un Syndrome Nerveux des Hautes Pressions (SNHP) particulièrement en cas de compression rapide, en pratique rarement avant 150 mètres. En outre, l'hélium est un gaz « froid ». Sa conductivité thermique est sa chaleur spécifique sont 5 à 6 fois plus importantes que celles de l'azote. La respiration d'un HélioX en conditions

hyperbare est susceptible d'entraîner des pertes caloriques dépassant les capacités de production de l'organisme (la profondeur critique se situe entre 250 et 280 mètres). Par ailleurs, il existe un phénomène de contre-diffusion isobarique responsable d'un phénomène bulleux sans variation de la pression environnante. Cette situation est réalisée quand un sujet saturé avec un gaz très soluble et peu diffusible inhale brutalement un gaz moins soluble et peu diffusible : plongeurs saturés en N_2 brutalement passés sous HélioX (Predictive Studies IV), passage de l'HydrelioX à l'HélioX (expérimentations Hydra V de COMEX). De plus, les propriétés de solubilité et de diffusibilité de l'hélium étant différentes de celle de l'azote, la décompression se révèle plus longue et plus délicate qu'après une plongée à l'air. Du fait de sa faible densité, la voix est changée (effet Donald-Duck), ce qui engendre des problèmes de communication. Enfin, c'est un gaz coûteux.

La Marine Nationale française entre autres utilise l'hélium pour les plongées profondes. Dès 1963, le GERS a préconisé, pour les plongées entre 60 et 150 mètres, l'emploi de mélanges ternaires dans lesquels le gaz diluant est formé pour moitié d'azote et pour moitié d'hélium : le mélange ternaire est satisfaisant au point de vue de la mécanique ventilatoire, et il évite de gaspiller l'hélium.

Hydrogène

Du point de vue de la dissolution dans les tissus, il se rapproche de l'azote, mais nécessite le calcul d'une table de plongée particulière.

Du point de l'emploi, il présente malheureusement un grave inconvénient, puisque les mélanges oxygène-hydrogène sont spontanément explosifs quand le pourcentage d'oxygène est supérieur à 4 p. 100.

Emploi des mélanges respiratoires

Les mélanges respiratoires ont tout d'abord été utilisés pour la plongée profonde avec des scaphandres à casque, légèrement modifiés en vue d'améliorer la ventilation et l'élimination du dioxyde de carbone, puis avec des scaphandres autonomes.

Leur emploi implique des moyens de surface importants, et conduit à une consommation excessive de gaz lorsque l'alimentation du plongeur se fait en circuit ouvert. Afin de réduire le gaspillage de gaz diluant, les appareils à circuit ouvert ont été remplacés en partie par des appareils à recyclage de gaz. L'emploi de tourelles et de systèmes de récupération des gaz permet de plonger profondément aux mélanges de façon raisonnablement économique.

PLONGEE EN CIRCUIT OUVERT AUX MELANGES

Les appareils à circuit ouvert permettent d'apporter directement au plongeur un mélange gazeux contenu dans une bouteille sous pression par l'intermédiaire d'un détendeur qui fournit au plongeur le gaz à la pression où il évolue (pression ambiante). Le gaz ventilé est donc identique à celui contenu dans la ou les bouteilles après détente. La fraction de gaz utilisée lors d'un cycle respiratoire est alors rejetée à l'extérieur et est donc perdue.

A chaque mélange devrait correspondre une table de plongée particulière, voire un algorithme de plongée particulier. Pour la plongée au Nitrox, il est possible cependant d'utiliser les tables de plongée à l'air en introduisant la notion de « profondeur équivalente ».

Un mélange contenant X p. 100 d'azote respiré à une profondeur réelle de P mètres se comporte, du point de vue de la pression partielle et de la décompression (puisque seul l'azote intervient), de la même façon que de l'air (79 p. 100 d'azote) respiré à une profondeur fictive de P' mètres appelée « profondeur équivalente ». A P' mètres de profondeur, la pression absolue exprimée en mètres d'eau est égale à : $P' + 10$ (10 mètres d'eau correspondant sensiblement à la valeur de la pression atmosphérique). L'égalité des pressions partielles d'azote s'écrit alors : $(P + 10).X = (P' + 10) \times 0,79$.

La profondeur équivalente est donc fournie par la formule : $(P' + 10) = (P + 10).X/0,79$.

PLONGEE EN RECYCLEUR

Les principaux avantages des appareils à recyclage de gaz sont une faible consommation de gaz (procurant une plus longue autonomie) et une plus grande discrétion, au moins acoustique (intérêt pour les photographes).

Plusieurs critères permettent de classer ces appareils.

Selon leur type d'alimentation en gaz

On distingue :

- ceux qui utilisent des **mélanges gazeux synthétiques préétablis**,

- soit binaires (azote - oxygène)

- soit ternaires (hélium - azote - oxygène).

- ceux qui **fabriquent eux mêmes leur gaz**.

Selon leur fonctionnement

On distingue généralement deux types d'appareils à recyclage des gaz :

- **appareils à circuit fermé**, ou à recyclage complet (CCR)

=> aucune bulle,

=> le gaz expiré par le plongeur est reconditionné par :

- épuration du dioxyde de carbone,

- récupération de ce gaz épuré dans le "faux-poumon",

- enrichissement en oxygène pour compenser la consommation du plongeur.

- **appareils à circuit semi-fermé**, ou à recyclage partiel (SCR)

=> même principe de reconditionnement du gaz expiré

=> émettent une faible quantité de bulles.

Cette fuite obligée :

- permet de maintenir une PO_2 physiologique

- autorise des profondeurs beaucoup plus importantes

- minimise le risque d'hyperoxie.

Selon le procédé par lequel est ajusté la PpO_2

Il existe trois grands principes de fonctionnement :

1 - **Appareil à renouvellement proportionnel** qui utilise deux technologies différentes :

- le principe de **fuite proportionnelle** à la ventilation

- le principe **d'admission d'un volume proportionnel** au volume ventilé.

2 - **Appareil à débit massique constant** par des buses calibrées.

3 - **Appareil à PO₂** (pression partielle d'O₂) **régulée** : La régulation du taux d'oxygène est faite par une commande électronique (CCR_e) ou par une commande manuelle (CCR_m) à partir des données de capteurs d'oxygène.

PHYSIOPATHOLOGIE DES ACCIDENTS DE PLONGEE AUX MELANGES

Si on exclut le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions (SNHP), il n'existe pas d'accident spécifique de la plongée aux mélanges. Ce dernier ne se produisant pas avant 150 mètres de profondeur, le plus souvent en plongée par système, nous n'en parlerons pas dans ce chapitre.

PLONGEE AUX MELANGES ET ACCIDENTS BIOCHIMIQUES

Les accidents biochimiques sont liés à la toxicité des gaz respirés. La toxicité d'un gaz obéit à une relation dose-effet : elle est fonction de sa pression partielle et de la durée d'exposition.

Tous les accidents biochimiques peuvent aboutir à une perte de connaissance en eau précédée ou non de signes plus ou moins bruyants. Cette dernière peut entraîner une noyade, engageant immédiatement le pronostic vital du plongeur qui ne serait pas soustrait du milieu aquatique.

L'HYPEROXIE

L'hyperoxie aiguë (ou effet Paul Bert) est caractérisée par une perte de connaissance brutale suivie d'une phase tonique puis clonique de type grand mal. Cette crise s'achève toujours par une phase post-critique caractérisée par une asthénie,

une agitation, une confusion ou une amnésie post-critique. Elle est parfois précédée de salves de tachycardie (signe diagnostique intéressant lors des séances de caisson) et de prodromes non spécifiques (myoclonies et paresthésie de la face, angoisse, nausées, etc.).

La relation qui lie la pression partielle d'O₂ et la durée d'exposition suit une hyperbole à asymptote horizontale, estimée à 1,7 ATA chez l'homme, limitant ainsi les plongées à l'oxygène pur à une profondeur maximale de 7 mètres. Il existe une grande variabilité inter individuelle dans la tolérance à l'hyperoxie. Ces crises apparaissent en eau ou immédiatement à l'arrivée en surface et le plus souvent en fin de plongée de longue durée.

En plongée en circuit ouvert ou en recycleur SCR, l'hyperoxie aiguë résulte généralement d'un dépassement de la profondeur limite d'utilisation du mélange gazeux. Plus rarement, elle peut être liée à des mélanges incorrects dans les bouteilles ou à une sous-estimation du taux d'équilibrage en oxygène avec les SCR.

Avec les recycleurs CCR, l'hyperoxie peut être liée à un mauvais fonctionnement des capteurs d'oxygène, un dysfonctionnement des électrovannes (avec les CCR_e), une admission intempestive d'oxygène par le plongeur ou un défaut d'admission de diluant (avec les CCR_m).

Enfin, il existe régulièrement un contexte d'hypercapnie initiale qui lèverait le verrou vasoprotecteur hyperoxique (Cantais et coll. 2000 ; Louge et Méliet 2006). Retenons donc que ces crises hyperoxiques sont d'une part liées à la P_{iO₂} (fonction du mélange gazeux respiré et de la profondeur) mais aussi à l'appareil utilisé qui peut favoriser l'hypercapnie (contraintes ventilatoires).

L'hyperoxie chronique (effet Lorrain-Smith), concerne les personnes exposées à une pression partielle d'oxygène élevée (P_{iO₂} > 0,5 ATA) pendant une durée prolongée (plusieurs dizaines d'heures) et se traduit par des lésions pulmonaires pouvant évoluer vers la fibrose. Elle n'est pas observée en plongée autonome ou au narghilé.

L'HYPERCAPNIE

Elle est caractérisée par une dyspnée

progressivement croissante, accompagnée de céphalées violentes. Elle apparaît lors de la respiration d'un mélange avec une $PiCO_2$ supérieure à 20 hPa. Elle débute par un essoufflement, des céphalées, un malaise général, des nausées et une sensation d'oppression thoracique.

Ces hypercapnies sont principalement d'origine endogène (60%), c'est-à-dire liées au plongeur (Gempp et coll. 2011) (inadéquation entre la production endogène de CO_2 et son élimination ventilatoire). Ce type d'hypercapnie est souvent retrouvé dans les plongées avec effort (port de charges, palmage à contre courant, etc.) dans le froid. L'augmentation des résistances ventilatoires et du travail ventilatoire (liée au matériel, en particulier à l'utilisation de recycleurs, et à l'augmentation de la densité des gaz avec la profondeur).

Dans quelques cas, on retrouve une origine exogène liée à un problème d'épuration des gaz expirés dans les recycleurs de gaz (chaux saturée en fin de plongée de longue durée, chaux non renouvelée ou inopérante parce que noyée par défaut d'étanchéité de l'appareil ou simplement humide) (Galland 1992) ou par une contamination des gaz comprimés (pollution lors de la mise en pression du gaz).

Par ailleurs, le CO_2 possède un effet potentialisateur vis-à-vis des autres accidents de plongée : hyperoxie, narcose, accidents de désaturation.

L'HYPOXIE

L'hypoxie en plongée se rencontre principalement avec les appareils de plongée à recyclage de gaz. En effet, du fait de l'augmentation rapide de la PpO_2 avec la profondeur, le plongeur en circuit ouvert se trouve obligatoirement en hyperoxie relative.

Elle est symptomatique lorsque la PiO_2 atteint 0,10 ATA et se caractérise par une perte de connaissance sans prodrome, parfois associée à des mouvements convulsifs, avec une reprise de la conscience sans coma post-critique.

Concernant les appareils à circuit semi-fermé, l'origine de ces hypoxies est mécanique : incident technique sur l'injecteur d'appoint ou valeur de la fuite insuffisante (problème d'étanchéité du petit sac habituellement).

Avec les recycleurs CCR, l'hyperoxie peut être liée à un mauvais fonctionnement des capteurs d'oxygène, un dysfonctionnement des électrovannes (avec les CCR_e) ou un défaut d'admission d'oxygène par le plongeur (avec les CCR_m).

Les hypoxies peuvent aussi être liées à l'utilisation en plongée d'un gaz réserve pauvre ou sans oxygène : l'utilisation de bouteille sortant de réépreuve gonflée à l'azote (N_2) pur en est le parfait exemple.

LA NARCOSE

La narcose ou « ivresse des profondeurs » est un accident lié à la toxicité de l'azote (N_2) respiré sous pression : celui-ci présente des propriétés apparentées à une intoxication par les psychodysléptiques avec des troubles comportementaux et des altérations de la conscience. La symptomatologie de la narcose est insidieuse, progressive, variable d'un individu à l'autre et chez un même individu, et réversible au retour en surface. La narcose est favorisée par les mauvaises conditions physiques (fatigue, manque de sommeil), par l'anxiété, l'inexpérience à la profondeur, le froid, le travail intense, la prise de certains médicaments, la perte des repères environnementaux (descente dans le bleu) et la vitesse rapide de la descente. Elle est systématique en plongée à l'air au-delà de 60 mètres ($PiN_2 = 5,6$ ATA).

Lors de l'utilisation de mélanges suroxygénés, c'est la toxicité de l'oxygène qui limite la profondeur d'intervention et les signes de narcose sont moins marqués qu'en plongée à l'air. Par ailleurs, le remplacement tout ou en partie de l'azote par un gaz non narcotique, permet de reculer les limites de survenue de la narcose.

ACCIDENTS DE DESATURATION

L'accident de désaturation (ADD) se définit par l'extériorisation aiguë de signes cliniques secondaires à la présence de bulles de gaz dans l'organisme secondaire à une mauvaise désaturation. Les gaz concernés par cette mauvaise désaturation sont les gaz diluants (essentiellement azote (N₂) et hélium (He)).

Que ce soit en plongée à l'air ou aux mélanges, l'événement bullaire associé à l'ADD ne représente que le facteur déclenchant d'une cascade de phénomènes biochimiques, inflammatoires et immunitaires, communément appelée maladie de décompression, qui va évoluer pour son propre compte, entretenir et compliquer cette agression initiale des bulles sur l'endothélium vasculaire. La dysfonction endothéliale provoquée par l'abrasion mécanique des bulles sur la paroi vasculaire est au centre de perturbations biologiques complexes ; elle est étroitement intriquée avec l'activation des éléments figurés du sang.

L'utilisation des recycleurs peut majorer le risque d'ADD en cas de problème technique: surestimation du taux d'équilibre en O₂ avec les SCR, mauvais contrôle de la PpO₂ avec les CCR.

On pourrait penser que les ADD survenant au décours des plongées profondes aux mélanges résultent de la formation de bulles de tailles plus importantes qu'au cours des ADD à l'air ; partant de là, on pourrait espérer traiter de manière plus efficace les ADD des plongées profondes aux mélanges avec des tables thérapeutiques hyperbares plus profondes (augmentation de l'effet pressonnier sur les bulles).

Par ailleurs devant un accident de désaturation survenant à l'issue d'une plongée à l'Héliox ou au Trimix, s'il a déjà été montré qu'un traitement hyperbare à l'héliox était préférable à l'utilisation d'air comprimé (Hyldegaard et Jensen 2007), il n'a jamais été mis en évidence une supériorité de l'héliox par rapport à l'oxygène pur (Arieli et coll. 2007).

OEDEMES PULMONAIRES D'IMMERSION

Ce type d'accident est lié à l'augmentation de la pression transmurale au niveau de la membrane alvéolo-capillaire. L'œdème pulmonaire d'immersion est une pathologie récente dans le monde de la plongée (Wilmshurst et coll. 1989). Il peut se compliquer, dans les cas les plus graves, d'une décompression cardiaque pouvant entraîner le décès du plongeur (Cochard et coll. 2005). Son étiologie est multifactorielle.

Quel que soit le type de plongée pratiquée, on observe une augmentation de la pression capillaire pulmonaire liée à l'immersion, à la vasoconstriction liée au froid et au stress, et à l'effort physique.

Par ailleurs, la ventilation en charge liée à la plongée peut favoriser l'œdème pulmonaire d'immersion du fait de l'augmentation des variations de pression alvéolaire (augmentation du différentiel de pression entre pressions inspiratoire et expiratoire). Ces variations de pressions vont dépendre du type d'appareil utilisé (résistances ventilatoires variables entre circuit ouvert et recycleur) et de la densité du mélange gazeux employé (dépendant de la masse molaire des constituants du mélange et de la profondeur d'utilisation). Enfin, avec les appareils de plongée, on peut avoir une augmentation importante de la pression inspiratoire par rapport à la pression expiratoire avec en moyenne une diminution de la pression expiratoire (recycleur à port dans le dos en position horizontale et, lors de la remontée en circuit ouvert détenteur en bouche).

Enfin, il existe des phénomènes responsables de lésions et donc d'une fragilité de la membrane alvéolo-capillaire, d'origine inflammatoire (inhalation d'eau de mer, toxicité de l'oxygène, etc.), d'origine bullaire (mauvaise désaturation avec un accident de désaturation pulmonaire associé (chokes)) ou par la sécrétion d'ANP (Atrial Natriuretic Peptide) (Curry 2005). Du fait du rôle possible joué par la toxicité de l'oxygène, on peut penser que l'utilisation de mélanges suroxygénés favorise la survenue d'un œdème pulmonaire d'immersion.

CONCLUSION

La plongée aux mélanges présente des limites d'utilisation différentes de celles de la plongée à l'air, le souvent à la toxicité des gaz qui constitue le mélanges. Hormis le Syndrome Nerveux des Hautes Pressions (SNHP), il n'existe pas d'accident spécifique de la plongée aux mélanges. Par ailleurs, la physiopathologie des accidents de plongée aux mélanges ne diffère pas fondamentalement de celle des accidents de plongée à l'air. Le traitement des accidents de plongée aux mélanges sera donc comparable à celui des accidents de plongée à l'air. En revanche, l'utilisation de recycleurs induit une panoplie plus étendue de possibilités d'accidents de plongée, tout particulièrement en ce qui concerne les accidents biochimiques. Si des problèmes techniques peuvent être à l'origine de ces accidents (essentiellement avec les CCR), c'est souvent l'humain qui est à la source de l'accident.

REFERENCES

Arieli R, Svidovsky P, Abramovich A. Decompression sickness in the rat following a dive on trimix: recompression therapy with oxygen vs. heliox and oxygen. *J Appl Physiol* 2007, 102:.

Cantais E, Louge P, Goutorbe P. Flow velocity changes in the cerebral arteries during a long period of oxygen breathing. *Proceedings of the 26th annual meeting of*

European Underwater and Baromedical Society (EUBS) 2000.

Cochard G, Arvieux J, Lacour JM, Madouas G, Mongredien H, Arvieux CC. Pulmonary edema in scuba divers: recurrence and fatal outcome. *Undersea Hyperbaric Med* 2005, 32(1): 39-44.

Curry F-RE. Atrial natriuretic peptide: an essential physiological regulator of transvascular fluid, protein transport, and plasma volume. *J Clin Invest* 2005, 115(6): 1458-1461.

Galland FM. La chaux sodée des appareils de plongée. Etude des facteurs de l'absorption du CO₂. Proposition de standardisation des essais de laboratoire. Mémoire de spécialité du service de santé des armées « médecine de la plongée 1992.

Gempp E, Louge P, Blatteau J-E, Hugon M. Descriptive epidemiology of 153 diving injuries with rebreathers among French military divers from 1979 to 2009. *Mil Med* 2011, 176(4): 446-450.

Hyldegaard O, Jensen T. Effect of heliox, oxygen and air breathing on helium bubbles after heliox diving. *Undersea Hyper Med* 2007, 34(2): 107-122.

Louge P, Méliet JL. Toxicité neurologique de l'oxygène. In : Broussolle B, Méliet JL, Coulange M. (eds). *Physiologie et médecine de la plongée*. 2^{ème} éd. Ellipse, Paris. 2006, p282-294.

Wilmshurst PT, Nuri M, Crowther A, Webb-Peploe MM. Cold-induced pulmonary oedema in scuba divers and swimmers and subsequent development of hypertension. *Lancet* 1989, 1(8629): 62-65.

RESUME

Bases physiopathologiques de la plongée aux mélanges. S de Maistre, P Louge, E Gempp, M Hugon. Bull. Medsubhyp. 2012, 22 (supp.) : 93 – 101. Les mélanges respiratoires, utilisés pour permettre des plongées plus prolongées ou plus profondes qu'avec l'air, ont des limites d'utilisation qui dépendent principalement de la toxicité de leurs constituants. Ils sont à l'origine de nouvelles possibilités de survenue d'accidents de plongée, surtout en cas d'utilisation d'appareils à recyclage de gaz. En revanche, en dehors du Syndrome Nerveux des Hautes Pressions, il n'existe pas d'accident spécifique de la plongée aux mélanges. Par ailleurs, la physiopathologie des accidents de plongée aux mélanges ne diffère pas fondamentalement de celle des accidents de plongée à l'air. Le traitement des accidents de plongée aux mélanges sera donc comparable à celui des accidents de plongée à l'air.

Mots-clés : Plongée ; Mélanges gazeux ; Recycleurs de plongée ; Toxicité des gaz ; Physiopathologie.

Auteur correspondant:

Sébastien de Maistre

Sebastien.de-maistre@wanadoo.fr

SMHEP. HIA Ste Anne. Boulevard Sainte Anne. 83800 Toulon Armées.

De Maistre et coll.

ETUDE D'ÉVALUATION ET DE PREVENTION AUX RISQUES D'EXPOSITION AU METHANOL LORS D'UN CHANTIER SOUS-MARIN A SATURATION

M. BORGNETTA. Service Médical de l'INPP, Entrée N° 3, Port de la Pointe Rouge, 13008 Marseille (France).

ABSTRACT

Assessment and prevention of methanol exposure hazards, during submarine worksite carried out in saturation. M Borgnetta. Bull. Medsubhyp. 2012, 22 (supp.) : 103 – 112.

Introduction: In October 2010, Girassol field, Angola, a jumper flexible, which supplies with methanol the pipe which collecting petroleum to the floating production storage and offloading, broke by 50 meters deep. Why injection methanol in petroleum? To prevent from the creation of gaseous hydrates that may block pipes.

The crucial point is the methanol evaporation hazard in bell when divers are coming back, their diving suit being able to be coated with methanol.

We have just 5 days to set up the procedures.

Method: From physicochemical characteristics of methanol and its physic and poisonous risks, 4 steps are set in the time :

1st step: personal protective equipment and fire-extinguishing means

2nd step: To reduce at lowest level the risk of evaporation, we decide:

- a spraying system able to wash entirely the diver's equipment

- to put in overpressure the bell during the spraying time followed of a substantial ventilation. The evaporation speed is in inverse proportion of surrounding pressure.

3rd step: checking the absence of methanol's vapour with colorimetric tubes.

4th step: Medical supervision of divers during the decompression time. 4-6 méthyl pyrazole (methanol antidote) will be available on site.

Outcomes: the operation went like foreseen, without any problem. In order to know the interest of these procedures, one of the divers wore cotton overalls who he undressed off before coming back in the bell and he placed this cotton overalls outside of the bell. At the end of these operations the research of methanol on the cotton overalls was widely positive.

Findings: Our fears of contamination by methanol, at the time of return of diver to the bell, proved to be exact. This procedure will be the solution adopted by Offshore Companies in case of further accident of this kind.

Mots clés : diving, saturation, méthanol, hydrates, 4-6 méthyl pyrazole, Fomépizole[®]

INTRODUCTION

Le site pétrolier d'exploitation off-shore : Au large des cotes Africaines s'étend un immense champ d'exploitation pétrolifère représentant à lui seul près de 10% des réserves mondiales. Atteindre ce trésor enfoui est un véritable défi technologique en eau profonde car l'extraction du pétrole y est réalisée à une profondeur de 1400 m à partir des « têtes de puits » disséminées sur le fond marin et reliées par un ensemble de flexibles (les **Tours Risers**) aux installations de surface : les **FPSO (Floating Production Storage Offloading)**.

La Tour Riser : véritable trait d'union entre le fond et la surface, 4 fois plus haute que la tour Eiffel, est un ensemble de flexibles dont certains acheminent le pétrole du fond vers la surface et d'autres permettent d'injecter directement dans le

pétrole ascendant, depuis le fond, diverses substances chimiques nécessaires à son bon écoulement, une de ces substance chimique étant le METHANOL.

FPSO : navire support de stockage et traitement dont une des missions est de séparer le gaz et l'eau du pétrole brut avant de le charger à bord des pétroliers venus s'y approvisionner.

Pourquoi du METHANOL injecté dans le pétrole brut ? : sous l'action de la pression et du froid (4°C) régnant à de telles profondeurs, l'eau et le gaz contenus dans le pétrole brut risquent de former des **Hydrates de gaz** susceptibles d'obstruer le flexible ramenant le pétrole en surface. L'injection de Méthanol permet de prévenir ce phénomène.

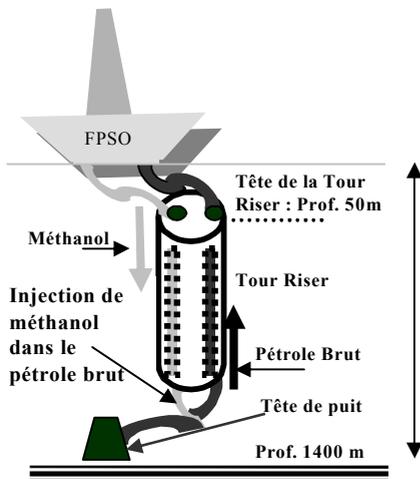


Figure 1: Schéma simplifié d'un FPSO et d'une Tour Riser

Les Hydrates de Gaz (ou Clathrates de Gaz) : ce sont des solides cristallins possédant des propriétés proches de la glace, structures polyédriques où des molécules d'eau forment « des cages » piégeant une molécule de gaz. Le gaz est le plus souvent du Méthane, on parlera alors d'Hydrate (ou clathrate) de Méthane mais d'autres hydrocarbures sont possibles.

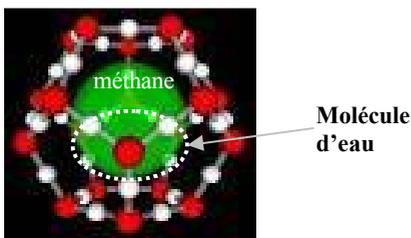


Figure 2. Hydrate (ou Clathrate) de Méthane

Les molécules d'eau organisées en une structure cristalline piègent en leur centre une molécule de méthane

Rupture du flexible de Méthanol : courant Octobre 2010, le responsable des opérations hyperbares d'un important groupe d'exploitation pétrolière off-shore nous contacte pour nous

annoncer la nécessité d'établir une procédure d'intervention par 50 mètres de fond, un flexible de méthanol vient de céder au niveau de sa connexion avec la tête d'une des Tours Risers. La procédure doit intégrer une plongée par système et à saturation du fait du temps d'intervention nécessaire aux plongeurs pour effectuer la réparation qui se déroulera à fortiori dans un nuage de Méthanol. C'est une urgence écologique et économique, nous n'avons que 5 jours pour finaliser notre rapport sur l'évaluation des facteurs de risques, et leurs préventions, à une exposition au Méthanol lors d'une plongée à saturation. Procédures qui se devront d'être simples, facilement et rapidement applicables.

La méthode de travail envisagée : les caractéristiques physico-chimiques du méthanol et ses facteurs de risques d'inflammabilité, d'explosivité et de toxicité sont bien connus mais à pression atmosphérique et pour des durées d'exposition correspondant au temps de travail habituel (8H00 maximum). A partir de ces données nous extrapolerons la conduite à tenir pour la prévention des risques en situation hyperbare dont la durée d'exposition sera bien supérieure au temps de travail habituel.

Conditions de réalisation du chantier hyperbare : c'est une opération de plongée à saturation classique à l'Héliox réalisée par Tourelle. La profondeur d'exécution est de 50 mètres ce qui correspond à la profondeur où se situe la Tête de la Tour Riser, lieu de la rupture du flexible de Méthanol à réparer.

La Tourelle sera positionnée à une distance de 50 mètres de la Tête de la Tour Riser, distance maximale d'intervention pour les plongeurs imposée par la longueur du narguilé.

Il est émis comme hypothèse que le nuage de méthanol s'échappant du flexible rompu s'étendra jusqu'au niveau de la tourelle.

Les paramètres de la plongée à saturation :

- La procédure de pressurisation : vitesse de 3 mètres par minute depuis la surface jusqu'au niveau vie.
- La pression partielle d'oxygène (PpO2) au niveau vie maintenue à 400 hectopascals (hPa) soit 0,4 Bar +/- 50 hPa (50 millibars(mbar))

- La procédure de décompression : depuis le niveau vie jusqu'à 15 mètres la vitesse de décompression est de 45 minute par mètre avec une PpO2 maintenue entre 575 hPa (0,575 bar) et 600 hPa (0,6 bar). Depuis 15 mètres à la surface la vitesse de décompression est de 60 minutes par mètre avec un taux d'oxygène ambiant maintenu à 23%.

Enfin une pression partielle de dioxyde de carbone (PpCO2) inférieure à 10 mbar.

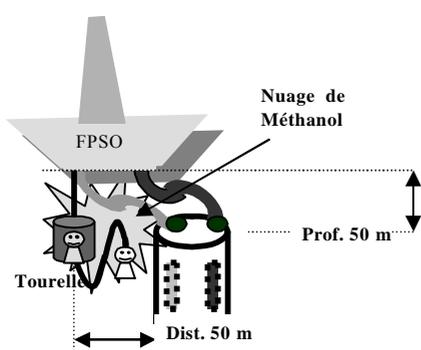


Figure 3. Schéma simplifié des conditions de réalisation du chantier hyperbare (1 plongeur intervenant + 1 Bell-Man).

METHODE

Les objectifs à atteindre dans le cadre de la prévention des risques de ce chantier hyperbare seront, si l'on suit la chronologie du déroulement des différentes phases des opérations :

- Quelle protection pour le plongeur intervenant en ambiance contaminée par le Méthanol ?
- Le plongeur intervenant pourrait-il revenir à la tourelle avec un vêtement contaminé par du Méthanol ? Si cette question admet une réponse

positive, quel est le potentiel d'évaporation du Méthanol ?

Le risque d'évaporation de Méthanol à l'intérieur de la tourelle est le point crucial de notre étude puisque supposer ce risque entraîne évaluation et prévention des risques :

- d'inflammabilité et d'explosivité
- d'intoxication de l'autre travailleur intervenant en plus du plongeur soit le bell-man, et quels équipements de protection lui prévoir.

Le Méthanol et ses propriétés physico-chimiques

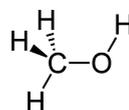


Fig. 4. Molécule de Méthanol

Le méthanol, ou alcool méthylique, est un composé chimique de formule brute CHO_3H . Il est le plus simple des alcools primaires dont le groupement hydroxyle, très mobile, est doté d'une capacité réactionnelle particulièrement grande. Avec les composés riches en oxygène (notamment les oxydants puissants) le méthanol peut réagir violemment.

L'oxydation du méthanol conduit à la formation d'aldéhyde puis d'acide formique, composés particulièrement toxiques.

Le méthanol, liquide incolore, dégage une odeur caractéristique pour laquelle aucun seuil olfactif n'a jamais pu être déterminé donc utilisé en tant que critère de détection.

Pour mémoire : le méthanol est également connu sous l'appellation « esprit (ou alcool) de bois » car obtenu dans le passé par distillation du bois. Il est également ce poison redoutable retrouvé dans les alcools frelatés qui fait encore de nos jours de nombreuses victimes dans les pays du tiers monde.

Tableau I : Propriétés physico-chimiques du Méthanol à 20°C et 1013 hPa de Pression Atmosphérique

	METHANOL	Eau	Acétone	Ether
Masse molaire	32,04 g/mol			
Masse pour 1ppm	1,33 mg/m ³			
Coefficient partage octanol/eau (logPow)	- 0,74			
Tension superficielle (en Newton par mètre)	22,6.10 ⁻³ N/m	Eau pure =72,76. 10 ⁻³ N/m Eau de Mer (pour une Salinité moyenne de 35) =73,53. 10 ⁻³ N/m		
Pression vapeur saturante	12,8 KPa (96 mmHg)	2,37 KPa (17,7 mmHg)	22,8KPa (173mmmHg)	58,6 KPa (445mmHg)
Point d'ébullition	64,6°C	100°C	56°C	35°C
Densité vapeur (Air=1) Hélium=0,139	1,11			
Point d'éclair en coupelle fermée Pour une solution de méthanol à 50% de méthanol à 10%	12°C 24°C 54°C			
Limite Inférieure d'Inflammabilité (L.I.I.)	6 %			
Limite Supérieure d'Inflammabilité (L.S.I.)	36,5 %			
Température d'auto-inflammation	470°C			

Analyse des propriétés physico-chimiques du Méthanol et ce que l'on peut en déduire :

- le coefficient de partage octanol/eau (Pow) permet la mesure de la solubilité d'un composé chimique dans deux solvants (l'octanol et l'eau) et d'appréhender ainsi son caractère hydrophobe ou hydrophile. L'abréviation Pow désigne le rapport de la concentration du composé étudié dans l'octanol sur sa concentration dans l'eau. Si ce rapport (Pow) est supérieur à 1 le composé est hydrophobe et hydrophile si inférieur à 1. Ce rapport est exprimé de façon conventionnelle par sa valeur logarithmique : Pow > 1 implique log

Pow > 0 pour une substance hydrophobe et Pow < 1 implique log Pow < 0 pour une substance hydrophile.

Le logPow du Méthanol égal à -0,74 désigne une **grande solubilité dans l'eau** mais faible pour les huiles et les graisses.

- **la Tension superficielle** est la force qui existe au niveau de toute interface entre deux milieux différents (solide, liquide ou gaz). Une goutte de liquide déposée sur une surface solide, plane et horizontale s'étalera d'autant plus que les forces de cohésion des molécules du liquide entre

elles seront faibles. Si l'on considère l'angle de raccordement liquide-solide (σ) nous pouvons dire que le liquide a un caractère **mouillant** lorsque cet angle est inférieur à 90° . Avec l'exemple ci-dessous le liquide (A) a un caractère mouillant ($\sigma < 90^\circ$) alors que le liquide B est peu mouillant ($\sigma > 90^\circ$), comme si la goutte du liquide (B) avait moins « d'adhérence » à la surface du solide que la goutte du liquide A. La **Tension superficielle** est alors définie comme la force nécessaire pour accroître la surface d'étalement de la goutte de liquide, une dépense d'énergie qui sera proportionnelle aux forces de cohésion des molécules du liquide entre elles. En reprenant notre exemple la Tension superficielle du liquide (A) sera nettement inférieure à la Tension superficielle du liquide (B). La Tension superficielle a les dimensions d'une force par unité de longueur et s'exprime en Newton par mètre (N/m ou $N.m^{-1}$)

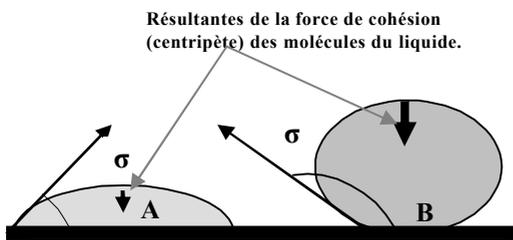


Figure N°5 : La Tension Superficielle

Les paramètres physico-chimiques qui peuvent modifier la Tension superficielle d'un liquide :

- la dissolution de composés électrolytiques augmente la Tension superficielle, comme nous le remarquons dans le tableau N°I en comparant la tension superficielle de l'eau pure à celle de l'eau de mer de salinité 35, à température et pression atmosphérique égale.
- la Température diminue la Tension superficielle. A pression constante, l'eau pure à $0^\circ C$ a une Tension superficielle de

$75,64. 10^{-3} N/m$ alors qu'elle est de $72,76. 10^{-3} N/m$ à $20^\circ C$.

- l'augmentation de la Pression ambiante accroît le nombre de molécules de gaz par unité de surface au niveau de l'interface liquide-gaz ce qui compense partiellement les forces de cohésion des molécules du liquide de direction centripète. La diminution de la Tension superficielle qui en résulte serait de l'ordre de 50% pour 150 Bars de Pression absolue.

Dans les conditions du chantier hyperbare considéré (6 Bars de Pression Absolue) les modifications apportées par l'action de la température, de la pression ambiante ou de la dissolution de composés électrolytiques sur la Tension superficielles, restent négligeables.

- Substance Tensioactive (ou surfactant) : la présence d'une substance tensioactive dont la caractéristique physico-chimique principale est son caractère amphiphile (présence d'un pôle hydrophile et d'un pôle lipophile) a pour conséquence d'effondrer la Tension superficielle des liquides en se rassemblant à l'interface liquide-solide, augmentant ainsi le pouvoir mouillant du liquide. C'est le cas des polluants, comme les détergents et les hydrocarbures, que l'on peut retrouver en mer et la présence d'hydrocarbure est plus que probable dans les conditions de notre chantier situé en zone de forage pétrolière.

En conclusion le Méthanol dilué dans l'eau de mer verra sa Tension superficielle augmentée mais la présence d'hydrocarbure effondrera la Tension superficielle de la solution Méthanol-eau de mer en lui conférant ainsi un caractère mouillant.. **Il est alors très probable que le plongeur intervenant revienne à la tourelle avec un vêtement enduit d'une solution Méthanol-eau de mer.**

- **La Pression de vapeur saturante et le phénomène d'évaporation. La possibilité d'évaporation de Méthanol dans l'enceinte de la tourelle** est, comme nous l'avons déjà évoqué, le point crucial de notre étude puisque nous admettons la présence de Méthanol sur le vêtement du plongeur à son retour à la tourelle.

La Pression de vapeur saturante est la pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec sa phase liquide (ou solide). La pression de vapeur saturante ne dépend, à une pression donnée, que de la température et lui est proportionnelle. Afin de mieux illustrer la notion de Pression de vapeur saturante nous allons évoquer les trois changements d'état (liquéfaction, évaporation et ébullition) possibles et dépendant des valeurs de la pression ambiante (P_{amb}), de la pression partielle (P_p) et de la Pression de vapeur saturante (P_{sat}) :

Si $P_{amb} > P_{sat} > P_p$ il y a **évaporation**

Si $P_p > P_{sat}$ il y a **liquéfaction**

Si $P_{sat} > P_{amb}$ il y a **ébullition**

Si $P_p = P_{sat}$ c'est l'état d'**équilibre**.

Nous comprenons que toute modification de la pression ambiante et/ou de la pression de vapeur saturante en modifiant la température (puisque la P_{sat} ne dépend que de la température) permet le changement d'état. En terme de volatilité plus la pression saturante est élevée plus la substance considérée sera volatile (cf. tableau I).

Maintenant savoir que le Méthanol est une substance particulièrement volatile et que sa présence sur le vêtement du plongeur entraînera obligatoirement son évaporation à l'intérieur de la tourelle ne nous apporte pas de solution en matière de prévention du risque d'évaporation du Méthanol. **L'étude du flux d'évaporation** d'une substance potentiellement toxique et inflammable est du plus grand intérêt dans l'évaluation des risques encourus par les personnes qui risquent d'y être exposées. L'évaporation d'un liquide, réaction par ailleurs endothermique, se traduit par une perte de masse par unité de temps. L'on peut trouver dans la littérature de nombreuses formulations mathématiques publiées notamment par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) et l'INERIS (Institut National de l'Environnement et des Risques). L'équation que nous retenons prend en considération tous les facteurs thermodynamiques et cinétiques du flux d'évaporation et n'en sous-évalue jamais les valeurs ce qui représente une marge de sécurité acceptable.

Formulation mathématique estimant la vitesse du flux d'évaporation en gramme par seconde :

$$V = 22,01 \cdot S \cdot U \cdot M^{0,4} \cdot P_{sat} \cdot P_{atm}^{-1}$$

- V = vitesse d'évaporation en grammes par seconde ($gr.s^{-1}$)
- S = surface d'évaporation en m^2
- U = vitesse de l'air au niveau de la surface en mètre par seconde ($m.s^{-1}$). La valeur minimale de 0,3 sera prise en cas de flux d'air nul.
- M = masse moléculaire en kilo par mole ($kg.mol^{-1}$)
- P_{sat} = pression de vapeur saturante à la température et pression ambiante, en Pascal
- P_{atm} = pression atmosphérique en Pascal

L'analyse des termes de cette équation met en évidence que :

° La vitesse d'évaporation est proportionnelle :

- à la Pression de vapeur saturante : qui ne dépend que de la température mais il paraît difficile d'agir sur ce facteur.
- à la vitesse du flux d'air, ce qui implique que **toute ventilation de la tourelle entraînera une accélération de l'évaporation du Méthanol présent sur le vêtement du plongeur.**

° La vitesse d'évaporation est inversement proportionnelle à la pression ambiante par conséquent **toute augmentation de la pression ambiante ralentira l'évaporation du Méthanol présent sur le vêtement du plongeur.**

NB : En cas de mélanges de substances entièrement miscibles et ne réagissant pas chimiquement entre elles, comme une solution aqueuse de méthanol, la pression partielle dans la phase gazeuse de chaque composant du mélange est égale au produit de la pression de vapeur de la substance pure par sa fraction molaire dans la solution, telle que :

$$V = 22,01 \cdot S \cdot U \cdot M^{0,4} \cdot P_{sat} \cdot \% \cdot (P_{atm} \cdot 100)^{-1}$$

(% = le pourcentage de la fraction molaire dans la solution)

- **Inflammabilité (ou Explosivité)** : la combustion désigne l'oxydation complète ou partielle d'un corps (le combustible), c'est une réaction chimique de type exothermique suffisamment rapide pour qu'elle se matérialise par une flamme, étincelles, explosion.... Le corps chimique oxydant (le comburant) est le plus souvent le dioxygène.

L'inflammabilité (ou explosivité) d'un composé liquide, considéré comme inflammable, dépend essentiellement de la concentration du composé dans la phase gazeuse environnante. L'inflammation se produira soit en portant le liquide à une température minimale appelée **température d'auto-inflammation** (470°C pour le méthanol), soit par échauffement local de la phase gazeuse par une source d'ignition.

- **Limite d'inflammabilité (ou d'explosivité)** : une combustion ne peut s'entretenir que si la concentration des vapeurs combustibles dans le mélange gazeux environnant se situe entre deux valeurs limites : la **Limite Inférieure d'Inflammabilité (L.I.I.)** où la concentration du composé dans la phase gazeuse environnante est trop faible pour entretenir la combustion, et la **Limite Supérieure d'Inflammabilité (L.S.I.)** où la phase gazeuse environnante est trop pauvre en comburant (le dioxygène).

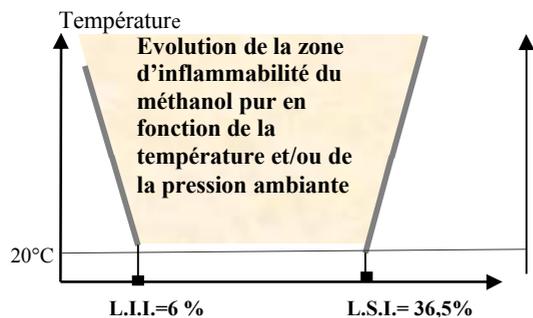


Fig. 6

Toute élévation de la température écarte les limites de l'inflammabilité.

Toute augmentation de la pression ambiante, donc de la pression partielle de l'oxygène (le comburant), élargit également la zone d'inflammabilité.

Même en solution aqueuse le méthanol reste inflammable comme le témoigne les valeurs de température du point éclair (température minimale où les vapeurs sont suffisantes pour produire une déflagration au contact d'une flamme ou d'un point chaud) selon le taux de concentration du méthanol (tableau I).

En conclusion nous pouvons dire que le méthanol est un corps qui présente un risque d'inflammabilité particulièrement élevé et proportionnel à la PpO2 environnante.

- **Toxicité** : le méthanol n'est pas toxique par lui-même mais par les métabolites issus de sa biotransformation hépatique, sous l'action de l'alcool déshydrogénase, en formaldéhyde puis en acide formique sous l'action de l'aldéhyde déshydrogénase. La voie d'absorption du méthanol peut être digestive, respiratoire ou percutanée et ses voies d'élimination (du méthanol et de ses métabolites) se font dans l'air expiré et les urines. La toxicité du méthanol est essentiellement neurologique et ophtalmologique. Cliniquement l'intoxication du méthanol s'exprime par un tableau neurologique de type cérébelleux avec fréquemment des signes digestifs et secondairement survient les troubles de la vision à type de névrite optique. Les cas les plus graves présentent une symptomatologie secondaire à une acidose métabolique.

Il est important de noter que les signes cliniques d'intoxication au méthanol peuvent avoir une latence de 12 à 48 heures d'où la nécessité d'une surveillance clinique post critique. Le diagnostic biologique peut être réalisé par dosage plasmatique comme urinaire, méthode de dosage qui reste la plus intéressante en milieu isolé.

Le traitement de l'intoxication au méthanol est unique dès l'apparition de signes cliniques évocateurs associés à un taux de méthanol urinaire pathologique*. Ce traitement consiste en l'utilisation dans les plus brefs délais de son **antidote spécifique le 4-méthylpyrazole (Fomépizole®)**. L'administration du 4-méthylpyrazole (Fomépizole®) se fait classiquement par voie veineuse, toutefois il a été démontré que son **administration par voie orale** et aux mêmes posologies permet d'obtenir des taux plasmatiques identiques et des **résultats thérapeutiques similaires**.

* Taux urinaire de méthanol : dans la population générale < à 5 mg/L ; en cas d'exposition et pour un maximum de 8h00 < à 15 mg/L en fin de poste.

Des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) dans l'air des locaux professionnels ont

été établies pour le méthanol (tableau II) mais pour un maximum d'exposition de 8h00 et à pression atmosphérique ; nous sommes bien loin des conditions de notre chantier. La seule **valeur de référence en situation hyperbare** nous est donnée par le Marine Américaine (U.S NAVSEA submarine atmosphere control manual) : **10 ppm pour un maximum de 90 jours d'exposition, soit un maximum de 1,6 ppm dans les conditions de notre chantier.**

VEMP (Valeur d'Exposition Moyenne Pondérée sur 8h00)	VECD (Valeur d'Exposition de Courte Durée < 15minutes)
200 ppm (262 mg/m ³)	250 ppm (328 mg/m ³)

Tableau II

- **Mesures de prévention des risques** : à la lumière des résultats de notre analyse des propriétés physico-chimiques et de la toxicité du méthanol nous pouvons proposer les mesures suivantes, simples et facilement applicables, de préventions des risques à l'exposition au méthanol lors de cette plongée à saturation.

- **Les équipements de protection individuelle (EPI)** : doivent assurer une protection respiratoire, cutanée et oculaire. Le plongeur intervenant est équipé d'un vêtement sec spécialement conçu pour les interventions en milieu contaminé. Le bell-man faisant office de plongeur secours est déjà équipé de son vêtement sec avec gants auquel est ajouté un masque facial.
- **Éliminer le méthanol du vêtement du plongeur, en limiter son évaporation et éliminer les éventuelles vapeurs dissipées** : un système d'aspersion d'eau installé dans la tourelle est utilisé dès l'apparition du plongeur au niveau du sas afin d'éliminer au maximum le méthanol présent sur l'équipement du plongeur. Dans le même temps **la tourelle est mise en surpression** ce qui permet de ralentir le processus d'évaporation du méthanol à l'intérieur de

la tourelle. Par la suite il est procédé à une **large ventilation de la tourelle**. La ventilation est volontairement exécutée seulement après la manœuvre d'aspersion-surpression car comme nous l'avons décrit dans le paragraphe consacré à l'évaporation un flux gazeux à la surface d'un liquide en favorise l'évaporation.

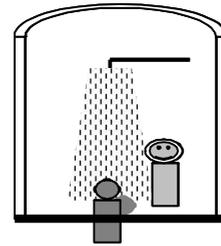


Fig. 7 Système simple d'aspersion d'eau qui assure un rinçage dès l'arrivée du plongeur au sas.

- **Méthode de détection de vapeurs de méthanol** : après la ventilation le bell-man contrôlera en plusieurs points bas de la tourelle et à l'aide d'appareil à réponse instantanée équipé de tubes réactifs colorimétriques, la présence ou non de vapeurs de méthanol. Il est à noter que ces appareils de détection ne sont pas spécifiques du méthanol mais détectent tous les alcools.
- **Les techniques de lutte contre les incendies dus au méthanol** préconisent l'utilisation de poudres chimiques sèches, le dioxyde de carbone ou les mousses résistant à l'alcool mais toutes ces substances ne sont pas utilisables en chambre hyperbare ou seule l'eau additionnée d'un émulsifiant est utilisable. Nous avons vu que le méthanol en solution aqueuse reste inflammable et c'est pour cette raison que l'eau n'est pas recommandée en première intention comme moyen de lutte contre l'incendie. Toutefois l'eau utilisée en brouillard ou en fines gouttelettes et en très grande quantité permet d'absorber les vapeurs de

méthanol et de le diluer jusqu'au point de le rendre ininflammable.

- **Un suivi médical** est organisé durant la phase des travaux et de la décompression grâce au système audio-vidéo qui relie les scaphandriers à la surface. Un dosage urinaire de méthanol est réalisé toutes les 12h00. En cas de début d'intoxication probable le traitement par le 4-méthylpyrazole (Fomépizole®) sera mis en route immédiatement par voie orale. Le suivi médical est poursuivi 48h00 après la fin de la décompression étant donné la période de latence possible de l'apparition des premiers signes cliniques d'intoxication.

RESULTATS

Les procédures de prévention sont parfaitement respectées, la réparation du flexible est réalisée en un peu moins de 24h00. La recherche de méthanol

par les procédés colorimétriques reste négative. De même, le suivi médical et les dosages de méthanolurie ne montrent aucun signe d'intoxication. Maintenant restait à prouver l'intérêt de ces mesures de prévention. Pour cela nous équipons un des plongeurs d'une surcote en tissu qu'il laisse dans un container prévu à cet effet, juste avant de pénétrer en tourelle. De retour en surface l'analyse du film liquidien qui recouvre la surcote met en évidence la présence notable de méthanol : la preuve est faite.

CONCLUSIONS

La méthode d'analyse des risques d'exposition au méthanol à partir de ses propriétés physico-chimiques et les mesures de préventions qui en ont découlé permettent d'extrapoler l'ensemble de ces procédures à toutes substances potentiellement volatiles et susceptibles de polluer l'atmosphère de la tourelle lors d'une plongée à saturation.

REFERENCES

- Barsby C. Methanol brochure. Alberta gas chemical Ltd. Technical memo N°850220. 7 mars 1985. 8 p.
- Berleur MP, Sarrut B, Guatel S..Le point sur le Fomépizole. Centre National Hospitalier d'Information sur le Médicament. Dossier N°2. 2000. 57- 74.
- Biotox-Ssubstance. Institut National de Recherche et de Sécurité INRS. Dosage urinaire du méthanol. 2009. 3 p.
- Boeniger MF. Recommendation for chemicals protective clothing. National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH. 2001.
- Braconnier R, Chaineaux J, Triollet J, Fontaine JR, Sallé B. Mesure du flux d'évaporation de liquides volatils dans des ambiances de travail. Institut National de Recherche et de Sécurité INRS. Cahiers de notes documentaires-3°trimestre 2008, 212 : 61-68.
- Broch H. Mécanique des fluides. Université Nice Sofia Antipolis. Cours LSV. 33 p
- Chaineaux J, Janes A, Sallé B, Petit JM. Conditions de formation d'une atmosphère explosive lors de la mise en œuvre d'un liquide inflammable. Institut National de Recherche et de Sécurité INRS. ND 2313. 2009. 216 :23-31.
- Copin-Montegut G. Physique et chimie marine. Institut océanographique, Paris. 1996. 320 p.
- Copin-Montegut G. Propriétés physiques de l'eau de mer. Techniques de l'ingénieur (ed). 2002. 170 p.
- Corriou JP. Thermodynamique chimique. Techniques de l'ingénieur, traité génie des procédés. 1985. J1028-2 à 30.
- Courtois B. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984. 2° ed, Paris. Institut National de Recherche et de Sécurité INRS 2007. 20 p.

- Dalmard G. Le forage et l'exploitation du pétrole profond. Mémoire de Diplôme d'Etudes Supérieures. Janvier 2005. 1-20.
- Dartois E, Debofle D. Methane clathrate FTIR spectrum. Implication for its cometary and planetary direction. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, 490 : L19-L22.
- De Gennes PG. Les objets fragiles. Plon (ed). 1994. 272 p.
- Gabel C. Drysuit Maintenance. *International Diving Schools*. 2012, Edition N° 20: 12-13
- Institut National de Recherche et de Sécurité INRS. Méthanol. FT 5. 2009. 1-8.
- Mégarbane B. Intoxication aiguë par le méthanol. *Encyclopédie Orphanet*. Mars 2003. 4 p.
- Methanex corporation. Le méthanol : renseignements techniques et consignes de sécurité. Version 3.0. Septembre 2006. 30 p.
- Petavy L, Monfort JP, Gaillard C. Investigation of methane hydrate formation in a recirculating flow loop. *Oil and Gas Science and Technology - Rev.IFP*, 1999, 54 (3): 365-374.
- Services techniques et médicaux de l'Institut National de Recherche et de Sécurité INRS. Méthanol. FT 5. 2009. 7p.
- Solomon SJ, Custer T, Schade G. Atmospheric methanol measurement using selective catalytic methanol to formaldehyde conversion. *Atmospheric chemistry and physics discussion*, 2005, 5 : 3533-3559.
- Triolet J, Sallé B. Evaluation de la vitesse d'évaporation et de la concentration d'un composé organique volatil dans l'atmosphère d'un local de travail. Institut National de Recherche et de Sécurité INRS. 2009. ED 6058.1-7.
- U.S. Navy Diving Manual. SS521-AG-PRO-010. Revision 4. 1999. Chap15 p23.
- Viking Scandinavian diving equipment. Diving in contaminated water, chemical and biological tests of dry suits and accessories. 3rd edition. 2001. 24 p.

RESUME

Etude d'évaluation et de prévention aux risques d'exposition au méthanol lors d'un chantier sous-marin à saturation. M Borgnetta. Bull Medsuhyp. 2012, 22 (supp.) : 103 – 112.

Introduction : Octobre 2010, Girassol, Angola, rupture par – 50 m de fond d'un flexible qui alimente en méthanol la conduite qui ramène au navire support de stockage et traitement le pétrole extrait des grands fonds marins.

Pourquoi du méthanol injecté dans le pétrole ? Le méthanol prévient la formation d'hydrates de gaz pouvant obstruer les conduites. Le point crucial se joue sur le risque d'évaporation du méthanol dans la tourelle lors du retour des scaphandriers leurs vêtements pouvant en être enduits.

Nous avons 5 jours pour établir les procédures.

Méthode : À partir des caractéristiques physico-chimiques du méthanol, de ses risques physiques et toxiques, notre procédure se décompose en 4 phases échelonnées dans le temps.

1^{ère} phase : prévoir les Equipements de Protection Individuelle et les moyens de lutte contre l'incendie.

2^{ème} phase : réduire au maximum le risque d'évaporation. Nous décidons :

- un système d'aspersion réalisant un rinçage complet de l'équipement du scaphandrier

- la mise en surpression de la tourelle pendant la phase de rinçage de l'équipement du scaphandrier suivie d'une large ventilation. La vitesse d'évaporation d'une substance volatile en solution étant inversement proportionnelle à la pression ambiante.

3^{ème} phase : contrôle de l'absence de méthanol ambiant par tube colorimétrique.

4^{ème} phase : surveillance médicale des plongeurs pendant toute la phase de décompression. Du 4-6 méthyl pyrazole, antidote du méthanol, sera disponible sur site.

Résultat : L'opération s'est déroulée sans aucun incident. Afin de connaître l'intérêt des procédures envisagées, un des plongeurs portait une cote de travail en texture de coton qu'il enleva avant de rentrer dans la tourelle et qu'il stocka à l'extérieur. A la fin des opérations, la recherche de méthanol au niveau de cette cote de coton s'est avérée largement positive.

Conclusion : Nos craintes de contamination par du méthanol lors du retour des plongeurs à la tourelle se sont révélées exactes et cette procédure sera retenue par les Sociétés Offshore en cas de nouvel accident de ce type.

Mots clés : plongée, saturation, méthanol, hydrates, 4-6 méthyl pyrazole, Fomépizole®

Correspondance : Dr Marc BORGNETTA
Médecin chef du Service Médical de l'INPP, Entrée N° 3, Port de la Pointe Rouge, 13008 Marseille, France
marc.borgnetta@wanadoo.fr

SOLUBILITE DES GAZ DANS LES SYSTEMES CONFINES

P. LETELLIER*, M. TURMINE - Laboratoire Interfaces et Systèmes Electrochimiques, CNRS, UPR15 LISE, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, Case 133, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05 (France)

ABSTRACT

Solubility of gas in confined systems. P Letellier, M Turmine. *Bull. Medsubhyp.* 2012, 22 (supp.): 113 – 116. The use of the concepts of nonextensive thermodynamics allows reconsidering the equilibrium of bubble solubilization, and more commonly of gaseous aggregates in solutions supersaturated in gas. The introduced relations are general and include as particular cases the equations usually used to describe these phenomena. Various possibilities of thoughts on the behavior of the gaseous aggregates and nano-systems are proposed. Thus, the introduced relations permit to consider the presence of gaseous aggregates in equilibrium with the solution even for undersaturated solution.

Keywords: bubbles, nano-bubbles, sessile bubbles, thermodynamics, nonextensive thermodynamics, solubility, Henry's law, Laplace's law.

L'APPROCHE PAR LA THERMODYNAMIQUE CLASSIQUE

La compréhension du comportement des solutions sursaturées en gaz est bien évidemment fondamentale pour l'établissement des procédures de décompression des personnes qui interviennent en atmosphère hyperbare (plongeurs sous-marins, scaphandriers). Mais ces milieux intéressent également d'autres domaines (magmas, agroalimentaires : boissons gazeuses, purification de l'eau, etc.), ce qui explique l'engouement actuel des milieux scientifiques pour ces systèmes (205 publications depuis 2000 avec une croissance exponentielle).

Généralement, la modélisation du comportement des liquides sursaturés en gaz est conduite en attribuant une forme précise à l'agrégat gazeux (bulle sphérique, bulle posée sur une surface, dans une anfractuosité du matériau, etc.). L'énergie interfaciale entre le gaz contenu dans la bulle et le fluide est alors introduite, dans les conditions de l'équilibre, à partir de la loi de Laplace. Si γ est la tension interfaciale entre le gaz et le liquide, la différence de pression entre l'intérieur, P_{int} , d'une bulle de rayon r , et la pression environnante, P , est

$$P_{\text{int}} - P = 2 \frac{\gamma}{r}$$

Lorsque l'on fait intervenir cette différence de pression dans les relations thermodynamiques qui définissent l'évolution du système, on montre que

pour une concentration donnée de gaz en solution, C_i , supérieure à la saturation, C_i^0 , prévue par la loi de Henry, il existe une situation dans laquelle le gaz contenu dans une bulle de rayon r est en équilibre avec la solution. En adoptant des conditions simplificatrices, (loi des gaz parfaits, solutions diluées, volumes molaires partiels des gaz faibles), on montre que le taux de sursaturation, \mathfrak{R} , s'écrit

$$\mathfrak{R} = \frac{C_i}{C_i^0} = 1 + \frac{1}{P} \frac{2\gamma}{r}$$

Cette approche implique que le phénomène de dégazage ne peut théoriquement survenir dans une solution sursaturée que si l'on franchit une barrière énergétique caractérisée par la valeur de \mathfrak{R} . On peut ainsi imaginer la possibilité d'une décompression pour laquelle les bulles ne s'agrègent pas, dès lors que leur rayon ne dépasse pas une valeur critique.

Cette propriété est assez générale et on la rencontre dans d'autres domaines. Elle correspond au fait que l'apparition d'une phase au sein d'un liquide (précipitation, cristallisation, ébullition, etc.) est généralement thermodynamiquement défavorable. On justifie ainsi l'existence de liquides surchauffés, de solides surfondus, de solutions sursaturées, des retards à la cristallisation, etc.

La réalité est sans doute moins simple.

L'applicabilité de la loi de Laplace pour les agrégats gazeux a pu récemment être testée par Ohgaki et coll. (2010) qui ont publié une étude sur

le comportement de nano-bulles de différents gaz de rayon égal à 50 nm dans l'eau à 298 K. Pour l'azote, ces auteurs montrent qu'ils obtiennent des suspensions de bulles stables pendant plus de deux semaines, contenant jusqu'à 600 cm³ de gaz confiné (condition standard) par litre de solution. Même s'il est thermodynamiquement « instable », dans le sens où on se situe à un maximum d'énergie, l'équilibre du système constitué par les bulles dans le milieu n'est pas rapidement détruit par les fluctuations de l'environnement. La solubilité de l'azote dans la solution est 36 fois celle caractéristique des phases illimitées. La valeur expérimentale de la pression interne a été trouvée égale à 63 bars, alors que l'application de la loi de Laplace avec une tension superficielle égale à $72 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ conduit à une valeur de 30 bars, soit environ la moitié de celle déterminée. La valeur de la pression interne excède donc largement celle calculée.

La divergence entre ces valeurs peut avoir différentes origines dont une estimation un peu trop idéalisée de la forme et de la taille des bulles. Toutefois, il semble plus raisonnable d'envisager que la loi de Laplace ne s'applique pas à ces objets, en prenant pour argument que leur frontière géométrique est mal définie. C'est une remarque qu'avait déjà effectuée Bowers en 1996. Celui-ci supposait que les interfaces pour les nano-bulles étaient imprécises, et qu'il existait un domaine de transition entre le gaz et le liquide (appelé « blob »). Ce qui est vrai pour les nano-bulles l'est sans doute également pour les systèmes de plus grande taille.

On devra donc considérer dans l'étude de ces systèmes et leur modélisation que les interfaces gaz/environnement sont imprécises et ne permettent pas de situer exactement les frontières géométriques de l'agrégat gazeux. Ceci est d'autant plus vrai pour les « bulles de gaz » qui se forment dans un tissu physiologique lors de la décompression du plongeur. Où se situe la frontière entre l'agrégat gazeux et son environnement ? Quelle est la valeur de l'aire interfaciale et de l'énergie qui lui est associée ? Comment introduire ces paramètres dans les relations de la thermodynamique classique pour décrire le comportement du système et son

éventuelle évolution ?

L'APPROCHE PAR LA THERMODYNAMIQUE NON EXTENSIVE

C'est pour tenter de répondre à ces questions que nous avons abordé le problème de la solubilisation des gaz en utilisant une approche « non extensive » de la thermodynamique (voir annexe), que nous avons formulée en 2004 (Turmine et coll. 2004). Cette extension de la thermodynamique classique nous a permis de décrire le comportement d'un grand nombre de phases condensées (solides et liquides) à l'état nanométrique. Nous avons ainsi traité la solubilité des petits agrégats (Letellier et coll. 2007), leur potentiel redox (Letellier et coll. 2008), leur température de fusion (Letellier et coll. 2007), leurs propriétés tensioactives dans un solvant (Letellier et coll. 2008) ou encore leurs mouillabilités (Letellier et coll. 2007). Dans ces études, nous montrons que, pour les phases non extensives, le potentiel chimique, qui est une variable intensive dans le cas des phases illimitées, perd cette propriété. Sa valeur dépend alors de la masse des agrégats par une loi de puissance. Dans l'approche que nous proposons, les frontières des phases ne sont pas précisées. Les interfaces sont supposées « floues » (figure 1).

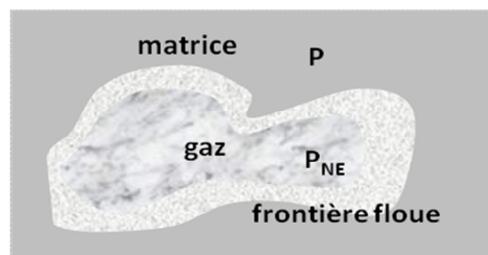


Figure 1 : schématisation du système étudié. Le gaz constitue une phase non extensive en contact avec la matrice par une interface floue.

On montre alors que la différence de pression entre l'intérieur de l'agrégat P_{NE} (pression dans la phase non extensive) et l'extérieur s'écrit

$$P_{NE} - P = m \tau \alpha V^{m-1}$$

V est le volume total de la quantité de gaz agrégé, m (dont la valeur est inférieure à 1) est un coefficient qui représente la « dimension thermodynamique du système » (dans le cas d'une sphère $m = 2/3$), α est un coefficient caractéristique du système envisagé.

Le paramètre τ est une grandeur intensive qui caractérise la nature de l'interface. L'application de cette relation à une sphère de gaz de rayon r, avec $\tau = \gamma$ permet de retrouver la loi de Laplace.

A la différence de la tension interfaciale toujours positive, la grandeur τ peut être positive ou négative selon le système considéré, ce que l'on a pu vérifier par ailleurs, par exemple sur les températures de fusion des nanomatériaux.

Dans le cas des bulles, on peut donc imaginer des agrégats dont la pression interne est inférieure à la pression ambiante.

Dans de telles conditions, la solubilité du gaz s'écrit

$$\mathfrak{R} = \frac{C_i}{C_i^0} = 1 + \frac{1}{P} m \tau \alpha V^{m-1}$$

Cette relation montre que pour un taux de sursaturation donné, il existe une situation d'équilibre pour laquelle la masse de l'agrégat gazeux est définie, dans les conditions imposées par son environnement.

L'originalité de cette formule est de permettre d'envisager la création de bulles dans un milieu en sous-saturation dans le cas où τ est négatif. Dans cette occurrence, on ne peut écarter la possibilité d'observer la création d'agrégats de gaz en équilibre avec la solution même pour des concentrations de gaz en solution inférieures ou égales à la saturation.

Un tel comportement ne peut être justifié par la thermodynamique classique.

Cette relation permet d'envisager différents comportements du système selon la valeur de m choisie. Avec $m = 2/3$, on retrouve formellement celui des bulles sphériques. D'autres valeurs sont intéressantes, comme par exemple $m = 1$. La loi de solubilisation prend alors la forme

$$\{P\} = K_i^0 \{C_i\} - \tau \alpha$$

Cette situation correspond, par exemple, à une

phase non extensive qui se réplique à l'identique lorsque l'on augmente la quantité de gaz. Le décalage entre la concentration de la solution sursaturée et la concentration à saturation est constant et ne varie pas avec la quantité de gaz considérée. On peut trouver une illustration de ce comportement dans l'étude de Bowers et coll. (1995) qui mettent en évidence une « super loi de Henry » pour la solubilité de l'oxygène produit par la décomposition catalysée de l'iode par l'eau oxygénée. Dans cette étude, le tracé de la concentration de gaz dissous en fonction de la pression conduit à une droite parallèle à celle représentative de la loi de Henry.

CONCLUSION

Le recours aux concepts de la thermodynamique non extensive permet de formaliser d'une manière très générale, même dans les systèmes complexes, l'équilibre de solubilité des gaz contenus dans des bulles dispersées en solution. Cette approche permet également de décrire le comportement d'un agrégat gazeux en contact avec plusieurs interfaces. La généralisation de la relation sur la solubilité conduit à

$$\mathfrak{R} = \frac{C_i}{C_i^0} = 1 + \frac{1}{P} \sum_j m_j \tau_j \alpha_j V^{m_j-1}$$

où les indices j sont relatifs aux interfaces considérées.

Selon les signes des variables d'intensité τ_j , qui peuvent être positives ou négatives, la concentration C_i peut être supérieure ou inférieure à C_i^0 .

ANNEXE

En thermodynamique, une quantité Y est dite « extensive » lorsqu'elle dépend de la masse par une loi de proportionnalité. Lorsque l'on multiplie la masse du système par un nombre λ , Y est également multiplié par λ . Il en est ainsi, par exemple, du volume d'une goutte de solution. Si on multiplie la masse de la solution, à composition

constante, par 2, la valeur du volume est multipliée par 2. On dit que l'aire est une fonction homogène de degré 1 de la masse.

La grandeur Y est dite non-extensive, si cette condition n'est pas remplie. Il en est ainsi, par exemple, de l'aire cette même goutte. Lorsque l'on multiplie la masse de la goutte par 2, son aire est multipliée par $2^{2/3}$. Dans ce cas, on dit que l'aire est une fonction homogène de degré $2/3$ de la masse.

En thermodynamique classique, par convention, les fonctions d'état sont extensives. Si l'on veut pouvoir décrire le comportement de systèmes mettant en jeu des aires interfaciales importantes, il est nécessaire d'envisager une approche non extensive de la thermodynamique.

REFERENCES

Bowers PG, Hofstetter C, Letter CR., Toomey RT. supersaturation limit for homogeneous nucleation of oxygen bubbles in water at elevated pressure - super Henry law. *Journal of Physical Chemistry* 1995, 99: 9632-9637.

Bowers PG, BarEli K, Noyes RM. Chemical oscillations and instabilities: Unstable supersaturated solutions of gases in liquids and nucleation theory. *J. Chem. Soc.-Faraday Trans.* 1996, 92: 2843.

Letellier P, Mayaffre A, Turmine M. Solubility of nanoparticles: nonextensive thermodynamics approach. *Journal of Physics-Condensed Matter*

2007, 19: 436229.

Letellier P, Mayaffre A; Turmine M. Melting point depression of nanosolids: Nonextensive thermodynamics approach. *Physical Review B* 2007, 76: 045428

Letellier P, Mayaffre A, Turmine M. Drop size effect on contact angle explained by nonextensive thermodynamics. Young's equation revisited *J. Colloid Interface Sci.* 2007, 314: 604-614.

Letellier P, Mayaffre A, Turmine M. Redox behavior of nanoparticles: Nonextensive thermodynamics approach. *Journal of Physical Chemistry C* 2008, 112: 12116-12120.

Letellier P, Mayaffre A., Turmine, M. Micellar aggregation for ionic surfactant in pure solvent and electrolyte solution: Nonextensive thermodynamics approach. *J. Colloid Interface Sci.* 2008, 321: 195-204.

Ohgaki K, Khanh NQ, Joden Y, Tsuji A., Nakagawa T. Physicochemical approach to nanobubble solutions. *Chemical Engineering Science* 2010, 65: 1296-1300.

Turmine M, Mayaffre A, Letellier P. Nonextensive approach to thermodynamics: Analysis and suggestions, and application to chemical reactivity. *Journal of Physical Chemistry B* 2004, 108: 18980-18987.

RESUME

Solubilité des gaz dans les systèmes confinés. P Letellier, M Turmine. Bull. Medsubhyp. 2012, 22 (supp.) : 113 – 116. L'utilisation des concepts de la thermodynamique non extensive permettent de reconsidérer l'équilibre de solubilisation des bulles, des bulles posées sur des supports, et plus généralement des agrégats gazeux dans les solutions sursaturées de gaz. Les relations introduites sont générales et incluent comme cas particulier les équations habituellement utilisées pour décrire ces phénomènes. Différentes pistes de réflexion sur le comportement des agrégats gazeux et des nano-systèmes sont proposées. Ainsi, les relations introduites permettent d'envisager la présence d'agrégats gazeux en équilibre avec la solution, même lorsque celle-ci est sous-saturée.

Mots clés : bulles, nano-bulles, bulles posées, thermodynamique, thermodynamique non extensive, solubilité, loi de Henry, loi de Laplace.

e-mail: pierre.letellier@upmc.fr

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

MANUSCRIT:

Le manuscrit soumis pour publication sera adressé, à l'Editeur du Bulletin (Dr JC ROSTAIN - Physiopathologie et Action Thérapeutique des Gaz Sous Pression - UPRES - EA 3280 - Faculté de Médecine Nord - 13344 Marseille Cedex 15 →), soit en triple exemplaires, y compris les tableaux, figures, annexes et résumés (total de 9 pages maximum, sauf accord préalable) et enregistré sur une disquette au format Word (.doc) pour PC, soit de préférence adressé par courriel à jean-claude.rostain@univmed.fr.

Le texte sera écrit en français, en Times New Roman 12, simple interligne, texte justifié, début de paragraphe sans retrait, saut d'une ligne entre chaque paragraphe. Les pages seront numérotées de 1 à 9 dès la page de titre (pagination automatique Word). Les titres seront précédés et suivis d'un saut de ligne. Pas de ponctuation en fin de titre.

Eviter les caractères italiques et les soulignements. Seules les abréviations internationales connues peuvent être utilisées. En ce qui concerne les signes peu courants, il faudra signaler leur justification, entre parenthèses, la première fois qu'ils apparaîtront dans le texte.

Un bref résumé de l'article en français et en anglais avec un titre en anglais, sera joint au manuscrit (150 mots ou 1000 caractères espaces compris pour chacun des résumés).

Chaque manuscrit devra comporter :

- les noms exacts et les prénoms des auteurs, ainsi que leurs adresses complètes avec l'e-mail du premier auteur
- le nom et l'adresse de l'hôpital, du centre ou de l'institut où a été réalisé le travail.
- le titre et le résumé en anglais, l'introduction, les matériels et méthode, les résultats, la discussion, les références et le résumé en français.

REFERENCES:

Les citations dans le texte se feront entre parenthèses de la façon suivante :

- 1 auteur : (Bennett 1975)
- 2 auteurs : (Rostain et Naquet 1974)
- 3 auteurs et plus : (Brauer et coll. 1974)

Les références bibliographiques seront présentées par ordre alphabétique :

- pour un mémoire : 1/ le nom des auteurs et les initiales de leurs prénoms ; 2/ le titre intégral du mémoire dans la langue originale ; 3/ le nom du journal (abrégé selon les normes internationales) ; 4/ l'année de parution ; 5/ le tome ; 6/ la première et la dernière page
- pour un livre : 1/ le nom des auteurs et les initiales de leurs prénoms ; 2/ le titre de l'ouvrage ; 3/ le numéro d'édition à partir de la seconde édition ; 4/ le nom de la maison d'édition ; 5/ la ville ; 6/ l'année de parution ; 7 / le nombre de pages
- pour un article dans un livre : 1/ le nom des auteurs et les initiales de leurs prénoms ; 2/ le titre intégral de l'article ; 3/ le nom de l'éditeur ; 4/ le titre de l'ouvrage ; 5/ le numéro d'édition à partir de la seconde édition ; 6/ le nom de la maison d'édition ; 7/ la ville ; 8/ l'année de parution ; 9/ le nombre de pages

Exemples

REVUE :

Rostain JC, Gardette B, Naquet R. Effects of exponential compression curves with nitrogen injection in man. *J Appl Physiol* 1987, 63 : 421-425.

LIVRE :

Jannasch HW, Marquis RE, Zimmerman AM, (eds). *Current perspectives in High Pressure Biology*. Academic Press, London. 1987, 341 p.

ARTICLE DANS UN LIVRE :

Rostain JC, Lemaire C, Naquet R. Deep diving, neurological problems. *In* : P. Dejours, (ed). *Comparative physiology of environmental adaptations*. Karger, Basel. 1987, p 38-47.

ILLUSTRATIONS:

Ne fournir que des photographies sur papier, des figures et schémas aux dimensions prévues pour la publication ou des reproductions de bonne qualité sur ordinateur.

Tenir compte du degré de réduction avant de fixer la dimension des lettres figurant sur le dessin.

Les schémas et illustrations seront numérotés en chiffres arabes. Les tableaux seront notés en chiffres romains. En ce qui concerne la radiologie, ne fournir que d'excellents tirages sur papier.

Dactylographier sur une feuille à part les légendes des figures. Légendes et figures sont à envoyer séparées du texte.

SOMMAIRE

REUNION D'AUTOMNE : TOULOUSE	81- 83.
RESUMES	84 - 88.
CONFERENCE	
INFECTIONS OSTEO-ARTICULAIRES DE L'ADULTE : DIAGNOSTIC ET ANTIBIOTHERAPIE B MARCHOU, P DELOBEL.	89 - 91.
ARTICLES	
BASES PHYSIOPATHOLOGIQUES DE LA PLONGEE AUX MELANGES. S DE MAISTRE, P LOUGE, E GEMPP, M HUGON.	93 – 101.
ETUDE D'EVALUATION ET DE PREVENTION AUX RISQUES D'EXPOSITION AU METHANOL LORS D'UN CHANTIER SOUS-MARIN A SATURATION. M BORGNETTA.	103 – 112.
SOLUBILITE DES GAZ DANS LES SYSTEMES CONFINES. P LETELLIER, M TURMINE	113 – 116.