

D.I.U. de médecine subaquatique et hyperbare

VENTILATION MÉCANIQUE en CHAMBRE HYPERBARE

"La ventilation contrôlée demande une adaptation particulière au milieu hyperbare. Actuellement, un appareil qui soit conforme au respirateur idéal permettant notamment d'assurer tous les modes ventilatoires en milieu hyperbare n'a pas encore été réalisé."

*1^{ère} Conférence Européenne de Consensus sur la médecine hyperbare
4^{ème} question
Lille - Sept. 1994*

Où en est-on 10 ans plus tard ?

Dr Jean-Luc BOURGEOIS

PLAN :

Introduction

Indications de l'oxygénothérapie hyperbare (OHB) avec ventilation mécanique

- I- Physiopathologie de l'IRA (pour les indications relevant de l'OHB avec ventilation mécanique)
- II- Indications de la ventilation mécanique en OHB

Contraintes techniques posées par la ventilation mécanique en milieu hyperbare

- I- Les contraintes électrique et thermique, et le risque incendie
- II- Les contraintes ventilatoires
 - A- Mécanique respiratoire en milieu HB
 - B- Application au respirateur en milieu HB
- III- Cahier des charges du respirateur hyperbare idéal

Conduite pratique de la ventilation mécanique en chambre hyperbare

- I- Evaluation et préparation du patient
- II- Transport du patient ventilé
- III- Installation en chambre hyperbare

Monitoring de la ventilation en chambre hyperbare

- I- Spirométrie et Volume courant (VT)
- II- Pression tissulaire en Oxygène (PtiO₂)
- III- Pression trans-cutanée en Oxygène (PtcO₂)
- IV- Pression trans-cutanée en Gaz carbonique (PtcCO₂)
- V- Capnographie et Pression télé-expiratoire en Gaz carbonique (P_{ET}CO₂)
- VI- Gazométrie artérielle : PaO₂, PaCO₂, pH

Complications de la ventilation mécanique en chambre hyperbare

- I- Désadaptation patient-respirateur
- II- Extubation
- III- Déplacement de la sonde d'intubation
- IV- Hypoxémie relative
- V- Hypercapnie
- VI- Bronchospasme
- VII- Hypotension
- VIII- Œdème pulmonaire
- IX- Pneumothorax
- X- Hémotympan
- XI- Insuffisance de sédation

Sédation pour ventilation mécanique en chambre hyperbare

- I- Mode d'administration des médicaments en chambre hyperbare
- II- Particularités de quelques médicaments utilisés en hyperbarie
- III- Les drogues utilisées pour la sédation en réanimation
- IV- La surveillance de la sédation en chambre hyperbare

Conclusion

Annexe 1- Respirateurs HB : tableaux comparatifs descriptif et technique

Annexe 2- Description et étude individuelle des différents respirateurs HB utilisés

| | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| AmbuMatic (Ambu) | MAV 3 (Eku) |
| Avian (Bird Products) | Microvent (Dräger) |
| Bara-Vent (ETC) | Minuteman Stephenson |
| Bennett PR2 (Puritan-Bennett) | Monaghan 225 (Monaghan Medical Corp.) |
| BioMed IC-2A, MVP-10 (BioMed Devices) | Motivus |
| Bird-IMV, Mark 2 (Bird Products) | Nuffield (Penlon) |
| Campbell EV500 (Ulco) | OmniVent (Allied) |
| Emerson (J.H. Emerson) | Oxford (Penlon) |
| Evita 4 (Dräger) | Oxylog 2000 (Dräger) |
| Hospal 225SIMV (Gambro-Hospal) | PneuPac (Bear) |
| Hyperlog (Dräger) | RCH (Lama) |
| Iper 60VF Siaretron (Siare) | Sechrist 500A (Sechrist Industries) |
| Logic 03, 07 (Puritan-Bennett) | Servo 900 B, C, D (Siemens-Elcoma) |

Abréviations et Unités employées :

| | |
|---------------------|---|
| HB | hyperbare |
| OHB | oxygénothérapie hyperbare |
| C-HB | chambre hyperbare |
| | |
| F_iO_2 | fraction inspirée en Oxygène |
| | |
| P | pression |
| PO_2 | pression partielle d'Oxygène |
| PCO_2 | pression partielle de Gaz carbonique |
| $P_{ti}O_2$ | pression tissulaire en Oxygène |
| $P_{tc}O_2$ | pression trans-cutanée en Oxygène |
| $P_{tc}CO_2$ | pression trans-cutanée en Gaz carbonique |
| $P_{ET}CO_2$ | pression de fin d'expiration de Gaz carbonique |
| PaO_2 | pression partielle d'Oxygène du sang artériel |
| $PaCO_2$ | pression partielle de Gaz carbonique du sang artériel |
| PAO_2 | pression partielle alvéolaire d'Oxygène |
| | |
| V_E | volume expiré par minute, volume-minute |
| V_I | volume inspiré |
| VA | ventilation alvéolaire |
| VT | volume courant |
| FR | fréquence respiratoire |
| T_I | temps inspiratoire |
| T_E | temps expiratoire |
| V° | débit, flux |
| | |
| | |
| ATA | atmosphère absolue |
| bar(a) | bar absolu |
| mm_{Hg} | millimètre de mercure |
| cm_{H_2O} | centimètre d'eau |
| Pa, hPa, kPa | Pascal, hectoPascal, kiloPascal |
| | |
| | |
| IRA | insuffisance respiratoire aiguë |
| SDRA (=ARDS ou ALI) | syndrome de détresse respiratoire aiguë |
| IOT | intubation oro-trachéale |
| | |
| | |
| Q(a/A) | quotient artériolo-alvéolaire |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

INTRODUCTION

Préambule

Nous avons débuté en octobre 2004 une étude de la pratique de la ventilation mécanique en chambre hyperbare dans le monde. Elle consistait :

- *par un questionnaire court en 8 points,*
- *adressé à tous les centres hyperbares recensés dans le monde et ayant une adresse e-mail,*
- *en français, anglais et espagnol,*
- *à connaître leur pratique habituelle, et en particulier,*
- *à quantifier :*
 - *le nombre de chambres hyperbares, monoplace et multiplace,*
 - *le type du ou des respirateur(s) utilisé(s)*
 - *le nombre de patients traités sur les années 2002 et 2003*
 - *le nombre de séances hyperbares*
 - *le nombre de séance avec ventilation contrôlée,*
- *à connaître les indications d'OHB chez ces patients ventilés,*
- *à déterminer le type de monitoring utilisé pour ces patients ventilés,*
- *à connaître les habitudes de sédation,*
- *à connaître le niveau de satisfaction concernant le respirateur utilisé.*

Plus de 300 e-mails ont été adressés... Les réponses arrivent encore. En première analyse, ces retours nous ont permis de spécifier et de préciser les pratiques actuelles de la ventilation contrôlée en hyperbarie. Une étude statistique valable ne peut encore être effectuée. Néanmoins tous les chapitres de ce mémoire tiennent compte de ces premières réponses.

L'indication de l'oxygénothérapie hyperbare se pose parfois, et de façon variable selon les centres, chez des patients aigus de réanimation, sous assistance respiratoire. La pratique des séances d'oxygénothérapie hyperbare nécessite donc de poursuivre cette ventilation mécanique dans la chambre hyperbare. Dans les années récentes, avec l'augmentation des indications de l'oxygénothérapie hyperbare, le nombre des patients nécessitant une ventilation mécanique en chambre hyperbare a cru de façon importante.

Ce mémoire détaillera plus particulièrement les aspects suivants :

La ventilation contrôlée en chambre hyperbare est donc utilisée chez des patients aigus de réanimation, qui, outre l'indication pour laquelle ils sont confiés à l'oxygénothérapie hyperbare, présentent des pathologies autres diverses plus ou moins lourdes. **Les indications de l'oxygénothérapie hyperbare avec ventilation mécanique** feront l'objet d'un bref rappel.

La chambre hyperbare présente en effet un "challenge" tout particulier pour l'utilisation du respirateur. **Les contraintes techniques** y sont de plusieurs ordres :

Tout respirateur hyperbare doit respecter les strictes **réglementations de sécurité électrique** et **incendie** dans ce milieu où la pression partielle d'oxygène est augmentée.

Ensuite, la densité des gaz augmente proportionnellement avec la pression ambiante. Comme la densité augmente, le flux turbulent au travers des orifices du respirateur diminue, et une pression plus élevée est nécessaire pour vaincre les résistances aériennes, et insuffler les poumons du patient. **Ces contraintes ventilatoires** spécifiques liées à l'hyperbarie modifient les paramètres du respirateur de façon variable selon la technologie propre à ce respirateur.

Un cahier des charges du respirateur hyperbare idéal peut dès lors être défini. Le respirateur hyperbare idéal n'existe pas pour le moment. Quelques-uns ont été conçus spécifiquement pour la médecine hyperbare. Nombres d'entre eux sont des respirateurs d'urgence, de transport, ou de réanimation, modifiés pour l'hyperbarie. La compression ou la décompression modifie à des degrés divers les paramètres de la ventilation et le fonctionnement des respirateurs utilisés. Les respirateurs utilisés doivent répondre en France, aux normes de sécurité définies pour l'anesthésie-réanimation, et aux exigences de la médecine hyperbare (ergonomie, solidité, facilité d'utilisation).

La conduite pratique de la ventilation mécanique en chambre hyperbare fera ensuite l'objet d'une étude et d'une description particulière, même si elle ne peut être isolée de la prise en charge globale et complète du patient.

La ventilation mécanique en hyperbarie nécessite d'être particulièrement efficace pour assurer une oxygénation tissulaire maximale. Elle nécessite donc un échangeur pulmonaire ou un recrutement alvéolo-capillaire optimal. En fait, en l'absence de pathologie pulmonaire, avec une ventilation contrôlée efficace, avec $F_{I}O_2$ à 100%, l'oxygénation artérielle est dans la plupart du temps optimale, même à la pression atmosphérique, par opposition à la ventilation spontanée au masque ou ceci n'est pas toujours le cas...(masque inadapté, fuites, etc..). Pour la ventilation mécanique, la surveillance se porte alors essentiellement sur la capnie car, comme on le verra, la compression et la décompression modifient essentiellement le volume minute et la ventilation alvéolaire. **La surveillance ou le monitoring de cette ventilation** doit permettre d'assurer le meilleur rapport "bénéfices sur risques".

Les complications de la ventilation contrôlée en chambre hyperbare feront l'objet d'une description spécifique. Les résultats d'une étude rétrospective dans l'unité hyperbare du service de réanimation de l'hôpital de Garches seront alors rapportés et détaillés.

Le transfert en chambre hyperbare oblige donc à changer de respirateur, et surtout de mode de ventilation, donc le plus souvent en mode "ventilation contrôlée" vrai. C'est le mode ventilatoire le plus simple, où la totalité du support ventilatoire est fournie par le ventilateur. Elle implique une passivité totale des patients avec suppression des efforts ventilatoires spontanés. Ce type de ventilation nécessite donc souvent un recours à **une sédation profonde, voire à une anesthésie générale**. Nous évoquerons les drogues utilisées à cette fin, et certaines particularités de leur pharmacocinétique en hyperbarie.

En annexe, **les respirateurs hyperbares, ou adaptés pour l'hyperbarie**, utilisés dans le monde, seront largement décrits et détaillés, avec leurs études diverses en milieu hyperbare, et leurs caractéristiques techniques principales.

INDICATIONS de L'OXYGÉNOTHÉRAPIE HYPERBARE avec VENTILATION MÉCANIQUE

I- Physiopathologie de l'insuffisance respiratoire aiguë (pour les indications relevant de l'OHB avec ventilation mécanique)

La physiopathologie de l'insuffisance respiratoire aiguë, qui conditionne la ventilation mécanique, est variable. On peut distinguer quatre mécanismes différents :

1- La pathologie initiale comporte une atteinte cardiaque (insuffisance ventriculaire gauche aiguë) ou neurologique grave (coma Glasgow score < 6) avec détresse respiratoire aiguë associée, mais sans pathologie respiratoire prépondérante. Les poumons sont alors considérés comme normaux.

2- Le patient présente une pathologie cardio-respiratoire préexistante déjà évoluée, et la survenue d'une complication (pouvant être traitée par OHB) décompense cette pathologie, et oblige à une assistance respiratoire précoce.

3- La pathologie initiale entraîne une complication respiratoire immédiate ou secondaire. L'insuffisance respiratoire aiguë est alors un élément péjoratif. Par exemple :

- gangrène gazeuse avec syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA),
- intoxication à l'oxyde de carbone (CO), avec inhalation de fumée,
- contusion musculaire étendue dans le cadre d'un polytraumatisme, avec contusion pulmonaire, ou inhalation de liquide gastrique.

4- Enfin, depuis 2 décennies, on parle aussi des complications propres de la ventilation mécanique : baro- et/ou plus souvent volo-traumatisme (Volume Induced Lung Injury, VILI).

II- Indications de la ventilation mécanique en OHB

Dans une série pédiatrique [Keenan et coll.³⁴], les indications d'HBO avec ventilation contrôlée étaient réparties comme suit :

- 66% : infections graves à germes anaérobies, ou mixtes, avec choc septique (fasciite, omphalite)
- 28% : intoxication à l'oxyde de carbone, avec coma initial,
- 6% : embolie gazeuse artérielle post circulation extra-corporelle.

Nous n'avons pas retrouvé d'études semblables chez l'adulte. En reprenant la 1^{ère} Conférence Européenne de Consensus sur la Médecine Hyperbare de Lille en 1994, on retrouve à peu près toutes ces indications dans les indications en urgence de l'OHB.

Une enquête mondiale personnelle, débutée en octobre 2004, par questionnaire adressé par Internet, est en cours (cf. § Introduction, Préambule). Elle recherche, entre autres, les indications de la ventilation mécanique en OHB, en 2002-2003. Bien que dans l'immédiat, non statistiquement exploitable, l'intoxication au CO, et les infections bactériennes anaérobies des tissus mous occupent largement la première place. (tab. I)

| Auteur | Séances V.Mec.(n) | Indications de la Ventilation Mécanique en OHB, (en 2003) | | | | | | | | |
|------------|----------------------|--|----------------------------------|--------------|---------------------------|------------|----------|-------------------|----------------|--------|
| | | ADD. II | Embolie Gazeuse Artérielle | Intox. CO | Infections An-aérobies | Crush Σ | Brûlures | Ischémie aiguë | E. anoxique | autres |
| And L. | 61 | | | X (50%) | X (50%) | | | | | |
| Ben M. | 250 | x | x | X (40%) | x | | | x | | |
| Bil P. | 75 | | x | x | | | | | | |
| Bue G. | ? | x | | x | | | | | | |
| Bus R. | 9 | x | x | x | x | x | | x (plast) | | |
| Car O. | 0 | | | | | | | | | |
| Cos M. | 1 | | | | | | | | | |
| Cre A. | 237 | | | | X (100%) | | | | | |
| Dav M. | 42 | | x | | X (66%) | | | | | |
| Del B. | ? 225 | x | x | X (33%) | x | | | | | |
| Des J. | ? 15 | x | x | X (80%) | x | | | | | |
| Duc J. | 80 | | x | X (90%) | | | | | | |
| End K. | 468 | | x | x | x | x | X (35%) | | | |
| Gal N. | 6 | | x | | x | | | | x (coma) | |
| Gas HB. | 225 | | | | x | | x | X | x | x |
| Hei C. | 22 | | | | | | | | | |
| Jan E. | 552 | | | x | X (90%) | | | | | |
| Jam P. | 0 | | | | | | | | | |
| Lin F. | ? 330-411 | | | x | X (70%) | | | | | |
| Lon P. | 110 | | | X (61%) | x | x | x | | | |
| Mek I. | # 0 | | | | | | | | | |
| Mue P. | ? | | x | | x | | | | | |
| Per J. | 193 | | | X (50%) | X (50%) | | | | | |
| Rap JC. | 64 | | x (15%) | x (20%) | X (64%) | | | | | |
| Roc M. | # 0 | | | | | | | | | |
| Ruz J. | 20 | | | x | x | x | | | | |
| San JP. | 22 | | | X (75%) | x | | | | | |
| Sch R. | 0 | | | | | | | | | |
| She P. | 0 | | | | | | | | | |
| Shu A. | ? | | | | | | | | | |
| Smo FM. | 69 | x | x | x | X (32%) | x | | | | x |
| Spe R. | 2 | | | | X | | | | | |
| Stu G. | ? | x | x | x | X | | | | | |
| Sue H. | 1 | | | | | | | | | |
| Swa V. | ? | | | | | | | | | |
| Van R. | 2 | | | X | | | | | | |
| Viq A. | 0 | | | | | | | | | |
| Wea L. | 338 | | x | X (42%) | X (42%) | | | x | | |
| Wil J. | 0-2 ? | | | X | | | | | | |

Tableau I : Indications de la ventilation mécanique en OHB, en 2003.

A- Les intoxications graves au CO, avec troubles de la conscience, ou insuffisance respiratoire aiguë (IRA)

La détresse respiratoire au cours de cette intoxication peut-être secondaire à :

- une intoxication grave d'emblée avec troubles de la conscience ou coma; l'importance de l'intoxication elle-même, en général au-delà de 30% de carboxyhémoglobine (HbCO)
- ou IRA associée par brûlure respiratoire au cours
 - d'un incendie
 - ou d'une explosion suivie d'un incendie, blast.
- ou intoxication associée au cyanure [9].

B- Les infections graves à germes anaérobies, ou mixtes, avec choc septique et/ou SDRA

Elles regroupent les formes les plus graves de ces infections bactériennes anaérobies et/ou aérobies.

- soit myonécroses clostridiales
- ou myonécroses non clostridiales
- soit cellulites aiguës
- les cellulites subaiguës présentent habituellement moins de signes généraux et ne justifient que rarement une assistance respiratoire. La ventilation mécanique peut parfois être nécessaire dans un second temps devant un choc septique secondaire.

C- Les embolies gazeuses graves avec troubles neurologiques

Les classifications les différencient selon deux critères^[80] ;

- en milieu médical ou chirurgical,
- iatrogènes ou non iatrogènes.

Elles sont essentiellement iatrogènes et presque autant médicales que chirurgicales. Dans leurs formes graves, elles comportent toujours des troubles neurologiques, avec troubles de la conscience, syndrome ou état de mal convulsif, et hypertonie généralisée, voire troubles neuro-végétatifs. Le traitement est une urgence thérapeutique comprenant des mesures immédiates de réanimation, dont la ventilation avec $F_I O_2$ à 100%, soit par masque facial, soit par ventilation mécanique [Annane¹]. Puis il convient d'organiser dans les plus brefs délais l'OHB qui constitue le traitement spécifique et définitif de l'embolie gazeuse.

D- Les accidents de décompression graves (de type II) avec trouble de la conscience.

Les formes graves des accidents de décompression avec troubles neurologiques centraux^[80] nécessitent toujours des manœuvres de réanimation, dont une intubation oro-trachéale pour ventilation contrôlée.

E- Les syndromes d'écrasement des membres

Quand ils surviennent dans le contexte d'un polytraumatisme, avec défaillance viscérale multiple, il s'agit le plus souvent de patients "lourds" de réanimation médico-chirurgicale, ventilés artificiellement pendant de longue période. La coopération de nombreuses équipes médicales et chirurgicales est ici fondamentale.

F- Les encéphalopathies anoxiques aiguës

Dans les pendants manqués [⁹⁶⁻¹¹³] (near-hanging des anglophones), la ventilation mécanique fait partie intégrante de la réanimation symptomatique. Associée à l'OHB associée, elle atteint deux objectifs :

- maintenir et préserver les fonctions vitales :
 - liberté des voies aériennes et correction de l'hypoxie par une ventilation adaptée,
 - stabilisation de l'hémodynamique,
 - correction des troubles métaboliques.
- réduire les conséquences de l'anoxie cérébrale :
 - en diminuant l'œdème cérébral : rôle additif de l'hyperventilation contrôlée et OHB par la vasoconstriction hyperoxique,
 - en luttant contre l'aggravation initiale de la phase de reperfusion,
 - en favorisant la réparation cellulaire et la reprise du métabolisme aérobie.

G- Les brûlures étendues avec atteinte respiratoire

Pour Germonpré et coll.[²⁵], l'intérêt théorique de l'oxygénothérapie hyperbare dans les brûlures semble multiple, à la phase initiale (réduction des pertes plasmatiques, préservation d'éléments dermiques, effet anti-sludge, diminution de production de radicaux libres de l'O₂), comme à la phase secondaire (effet anti-bactérien adjuvant, optimisation du pouvoir bactéricide des polynucléaires, néo-angiogénèse)

Mais si pour ces auteurs, les bénéfices de l'OHB dans la pathologie de la brûlure thermique semblent évidents, il n'existe guère de consensus pour reconnaître l'indication de l'OHB dans ce domaine. En effet, selon la 1^{ère} CEC, les indications de l'OHB restent ici très restreintes et limitées.

Les patients à risque d'atteinte pulmonaire sont ceux qui combinent une brûlure étendue, et une inhalation de fumée. Ainsi, la détresse ou insuffisance respiratoire aiguë (IRA) chez le brûlé peut survenir suite à :

- inhalation de fumée ("inhalation injury") [⁴⁹]
- infection : pneumopathies bactériennes, atélectasies
- un syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA)

Germonpré P.[²⁵] et Hart GB.[³⁰] incluent ainsi l'inhalation sévère de fumée dans leurs indications d'OHB. Une analyse préliminaire montrait une nette diminution de la nécessité de support ventilatoire chez ces patients par probable diminution de l'inflammation pulmonaire. Ray et coll.[⁶⁹], dans leur étude limitée à 18 patients brûlés répartis en 2 groupes, concluaient : l'OHB "pourrait améliorer" la survie et la durée de la ventilation mécanique chez les patients avec ARDS.

Le poumon présente un risque d'atteinte indirecte, même en l'absence de brûlures respiratoires initiales [³²]. Le mécanisme physiopathologique associe :

- les effets des médiateurs physico-chimiques de la brûlure elle-même,
- les complications secondaires du traitement médical,
- et l'infection.

L'œdème survient ainsi sur un poumon qui n'a pas été directement lésé par la brûlure. La pression oncotique plasmatique est diminuée par la perte de protéines plasmatiques dans les tissus brûlés et sains, et une HTAP survient classiquement dans les 24-36h après la brûlure. Les médiateurs de l'inflammation tels que les peroxydes lipidiques, les prostanoïdes, et le complément ont aussi été impliqués dans l'atteinte pulmonaire : ils prépareraient "le lit de l'infection" pulmonaire secondaire.

La survenue d'une défaillance respiratoire aiguë après une brûlure grave augmente le risque de mortalité. L'inhalation de fumée accroît l'incidence d'une IRA de 5% à 73%. Le pourcentage de surface brûlée est aussi un indice de survenue de complications pulmonaires. Cependant l'IRA elle-même est un facteur de mortalité indépendant de l'âge et de la surface brûlée.

En bref, actuellement, en l'absence d'études randomisées, prospectives, à niveau de preuve suffisant, les indications de l'OHB dans les brûlures restent celles où sont associées :

- une inhalation de fumée
- une intoxication grave au CO

Dans ces indications, la ventilation mécanique est souvent nécessaire dès les premiers secours.

CONTRAINTES TECHNIQUES POSÉES par la VENTILATION MÉCANIQUE en milieu HYPERBARE

I- Les contraintes électriques et thermiques, et le risque incendie

Dans l'analyse des risques potentiels en chambre hyperbare [Le Péchon JC.⁴⁴⁻⁴⁵], le respirateur intervient dans :

A- Les risques liés aux équipements et aux matériels

Les respirateurs font partie de ces matériels :

- ce sont des appareils à pression,
- ils participent aux nuisances dues au bruit dans l'enceinte hyperbare : détente des gaz comprimés,
- les circuits et canalisations d'oxygène autour du respirateur ont leur risque propre,
- le risque d'électrocution est en principe "éliminé": les respirateurs sont tous pneumatiques, ou bien leur partie électrique est externe au caisson, et ils fonctionnent grâce à un circuit de faible voltage et intensité, ou bien ils sont alimentés par une batterie interne de faible voltage et rechargeable.

B- Le risque incendie

D'une façon générale, le départ d'un incendie requiert la présence simultanée de trois éléments:

- un comburant
- un combustible
- une source d'ignition



Le triangle du feu

1- Le comburant: l'oxygène

A pression atmosphérique, dans une ambiance où la concentration d'oxygène est inférieure à 6%, la combustion est impossible, mais peut devenir complète à partir de 12%.

Ce danger augmente cependant avec :

- l'augmentation de la concentration en oxygène,
- la compression.

Le risque s'en trouve donc majoré en chambre hyperbare, où ces conditions sont réunies. Ils le sont d'autant plus dans un caisson pressurisé à l'oxygène pur (caisson monoplace). D'où l'intérêt évident :

- de l'installation de déverseurs pour la chambre, pour les masques de ventilation spontanée, et bien entendu pour le respirateur,
- de la ventilation ("aération") de la chambre, et d'un dispositif de ventilation forcée qui doit permettre d'éliminer rapidement tout excès d'O₂,
- le contrôle continu de la composition du gaz de la chambre par des analyseurs de F₁O₂ régulièrement contrôlé et étalonné.

2- Le combustible

Pratiquement tous les corps organiques, voire métalliques, sont combustibles dans l'oxygène. S'ils ne le sont pas à l'air, ils le deviennent quand la concentration d'oxygène (F₁O₂), ou la pression partielle d'oxygène (P(O₂)) augmente.

3- La source d'ignition

L'activation du processus peut être consécutive à plusieurs facteurs :

- un arc électrique ++,
- un problème de surfaces chaudes ++,
- une réaction chimique exothermique ++,
- un réchauffement des gaz (?),
- les étincelles électriques ne seraient pas dangereuses [Le Péchon JC].

L'enceinte hyperbare présente ces trois éléments, et le respirateur constitue une source potentielle d'incendie surtout comme élément d'ignition. Le respirateur, comme tous les autres appareils dans le milieu hyperbare, doit respecter les contraintes électriques et thermiques. C'est une des raisons qui ont fait que les premiers et la plupart des respirateurs étaient pneumatiques. On en verra plus loin dans ce chapitre les limites.

Depuis une décennie sont apparus cependant des respirateurs à énergie électrique, qui ont permis une amélioration de la prise en charge ventilatoire et respiratoire des patients, "presque" comme dans le service de réanimation, dont ils sont issus. En effet, l'introduction d'instruments mécaniques ou électriques dans une atmosphère hyper-oxygénée expose au risque d'incendie par :

- les arcs électriques essentiellement. Ils sont produits lors de la mise en contact de 2 éléments du circuit électrique (court-circuit). Ainsi, il est recommandé de ne pas manœuvrer les interrupteurs des différents appareils, et plutôt de les "éliminer" de l'enceinte hyperbare. Les solutions techniques les plus récentes consistent, comme pour tout autre appareil, à garder dans la chambre la partie pneumatique, et à "sortir" la partie électrique.

- très accessoirement l'énergie thermique perdue lors de leur fonctionnement. Les respirateurs comportent tous un mécanisme hydraulique, dont le fonctionnement entraîne une perte de chaleur. La lubrification des pièces métalliques permet de diminuer cette production d'énergie thermique, mais pose le problème de sa nature. Beaucoup de lubrifiants sont en effet facilement inflammables en présence de pressions partielles élevées d'oxygène. Ce mécanisme reste cependant très secondaire pour les niveaux de pression utilisés en hyperbarie médicale, même pour des durées prolongées d'utilisation.

Des normes européennes et françaises nombreuses existent dans le domaine électrique. De nombreux textes ne sont pas réglementairement applicables aux C-HB, mais restent utiles pour leur conception. La réglementation spécifique concernant les C-HB précise néanmoins que :

- la tension électrique à l'intérieur du caisson est limitée à 42 V en courant continu; en fait, 12V suffisent pour faire fonctionner correctement les différents éléments d'un respirateur. Ces potentiels se situent donc dans le domaine des très basses tensions TBT (cf. tab. II). Les circuits doivent être pourvus de dispositifs détecteurs de défaut d'isolement. Les appareils électriques utilisés ne devront pas produire d'étincelles.

Tableau II : Limites des tensions

| Domaine des tensions | | Valeurs limites (Volt) | |
|---------------------------|--------------|------------------------|-----------------------|
| Désignation | Abréviations | Courant alternatif | Courant continu lisse |
| Très basse tension | TBT | 0 à 50 | 0 à 120 |
| Basse tension A | BTA | Plus de 50 à 500 | Plus de 120 à 750 |
| Basse tension B | BTB | Plus de 500 à 1000 | Plus de 750 à 1500 |
| Haute tension A | HTA | Plus de 100 à 50 000 | Plus de 1500 à 75 000 |
| Haute tension B | HTB | Plus de 50 000 | Plus de 75 000 |

- aucun lubrifiant inflammable (le combustible) ne doit être utilisé dans le respirateur; seul l'usage de lubrifiants incombustibles est autorisé (Fomblin, Voltalef),
 - le pourcentage d'oxygène (le comburant) doit être maintenu à moins de 25%, et en pratique bien souvent inférieur à 23 %.

C- Les risques liés au matériel médical spécial du patient

Du point de vue de l'ensemble respirateur, circuit respiratoire, et surveillance de la respiration, on peut les définir selon le tableau III :

Tableau III : Risques liés au respirateur HB, mesures de prévention

| Danger ou risque | Type du risque | Cible du risque | Mesures de prévention |
|--------------------------------------|---|--|--|
| Mécanique | Ecrasement à la compression | Pour le respirateur | Technologie - hyperbare (compatibilité hyperbare du constructeur) - ou modifiée pour l'hyperbarie |
| | | Circuit respiratoire | Compliance basse du circuit Ballonnet de la sonde d'intubation |
| | Eclatement à la décompression | Pour le respirateur | Technologie - hyperbare - ou modifiée pour l'hyperbarie |
| | | Circuit respiratoire | Compliance basse du circuit Ballonnet de la sonde d'intubation |
| | Inadaptation à la différence de pression | Pour le système d'aspiration bronchique trachéo- | Maintien d'une différence de pression >1bar |
| | Electrique | Electrocution | Respirateur |
| Monitoring de la respiration | | | Spiromètre mécanique |
| Arc électrique / incendie (ignition) | | Respirateur : interrupteurs | Respirateur pneumatique ou Respirateur électro-pneumatique "Eliminer" les interrupteurs électriques Fusibles |
| Thermique | Dégagement de chaleur (ignition) | Respirateur | Eliminer les moteurs à baillis Utiliser les lubrifiants incombustibles autorisés |
| Incendie | Contamination de l'atmosphère de la C-HB par O ₂ (comburant) | Circuit expiratoire | Déverseur propre au respirateur Ventilation de la C-HB Mesure continue et permanente de la F _i O ₂ |
| Respiratoire, toxique | Résistance respiratoire du circuit Accumulation de CO ₂ , (hypercapnie) | Circuit respiratoire | Circuit respiratoire adapté au poids du patient Déverseur propre au respirateur Monitoring de la respiration (P _{tc} CO ₂ , P _a CO ₂ , P _{ET} CO ₂) |
| Bactériologique | Difficulté de stérilisation | Circuit respiratoire | Respect des protocoles et procédures d'hygiène : produit et temps de stérilisation |

Telles sont les premières contraintes techniques à respecter :

- pour l'ingénieur biomédical lors de la conception ou de la modification d'un respirateur hyperbare.
- pour le médecin hyperbare responsable lors de la ventilation mécanique d'un patient en chambre hyperbare

Enfin et surtout, il ne faut pas oublier, comme le rappelle justement JC. Le Péchon [44.45] que :
"Pour chacun des risques ci-dessus, et malgré les mesures techniques de prévention, il subsiste le risque constant de l'erreur humaine, aussi bien dans les gestes de soins que dans la mise en œuvre des appareils médicaux (respirateur) ou du caisson lui-même."

II- Les contraintes ventilatoires

A- Mécanique ventilatoire en milieu hyperbare

L'augmentation des pressions à l'intérieur la chambre entraîne :

- une augmentation de la densité du gaz comprimé
- et une diminution progressive de la compressibilité de ce même gaz; en fait, ce facteur n'intervient pas pour les niveaux de pression habituellement utilisés en hyperbarie médicale.

Les muscles respiratoires (le respirateur dans notre étude) doivent vaincre des résistances [Hrncir³⁴] :

- 1- Des résistances statiques, représentées par les tissus plus ou moins élastiques de la paroi thoracique, des poumons et des bronches (élasticité thoraco-pulmonaire).

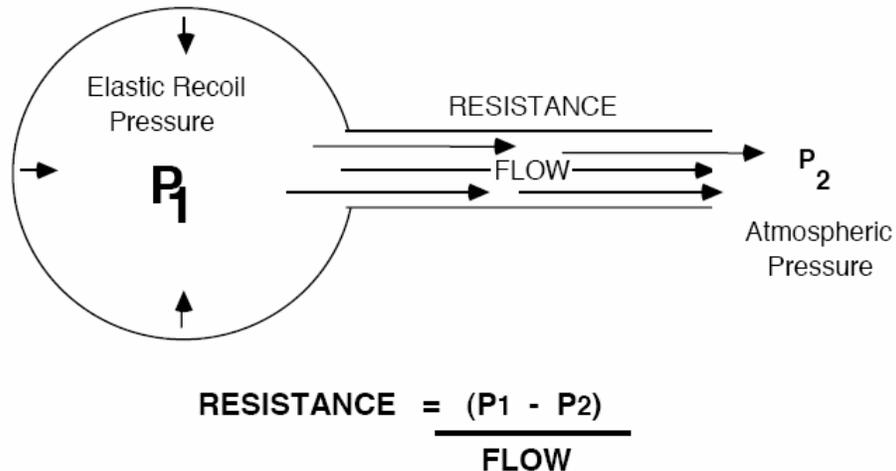
$$R_{\text{resp.tot}} = R_{\text{pariétales}} + R_{\text{tissu pulm.}} + R_{\text{bronchiques}}$$

Elles sont :

- proportionnelles aux variations de volume,
- indépendantes du débit.

- 2- Des résistances dynamiques, liées essentiellement à la mise en mouvement des molécules de gaz dans les canalisations du respirateur, et dans les voies aériennes du sujet. La résistance à l'écoulement d'un gaz dans un tuyau se traduit par une perte de charge, c'est-à-dire une diminution de la pression entre l'amont et l'aval de la résistance. La résistance obéit généralement à la loi d'Ohm:

$$R_{\text{dyn.}} (\text{cmH}_2\text{O/l/s}) = \Delta P (\text{cmH}_2\text{O}) / V^{\circ} (\text{l/s})$$



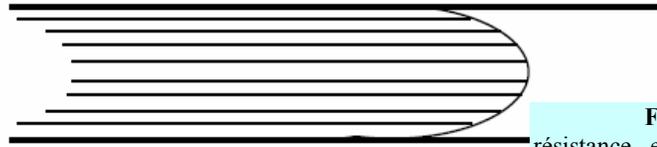
Ces résistances dynamiques sont :

- dépendantes du calibre, du nombre et de la longueur des "conduits"; ainsi, elles sont plus élevées à l'expiration car le diamètre bronchique diminue.

- surtout, dépendantes du type d'écoulement :

- a- La relation entre la pression et le débit est linéaire lorsque le débit est laminaire, dans ce cas, le rapport pression/débit est toujours le même et la résistance ne varie pas en fonction du débit. C'est le cas

des voies aériennes de petit calibre, chez un sujet normal, en ventilation de repos ou régime spontané.



LAMINAR FLOW

Fig.[1] En régime laminaire, la résistance est constante (loi de Hagen-Poiseuille) et la relation pression / débit est linéaire pour chaque niveau de résistance.

L'équation de la loi d'Ohm en flux laminaire "devient" la loi de Hagen-Poiseuille:

$$\Delta P = K_1 * V^\circ$$

- où :

$$K_1 = 8.\eta.l / \pi.r^4$$

η : viscosité, propre à la nature du gaz, mais indépendante de la pression

l : longueur du conduit

r : rayon du conduit

- donc :

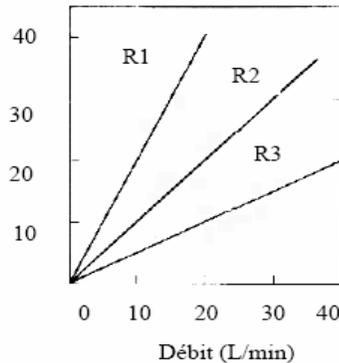
$$\Delta P = (V^\circ * 8.\eta.l) / \pi.r^4$$

Il apparaît donc que :

- la différence de pression entre 2 points du réseau bronchique est proportionnelle au débit V° .

- les résistances R sont proportionnelles à la viscosité du gaz η et inversement proportionnelles à la quatrième puissance du rayon bronchique r^4 .

On explique ainsi les variations très importantes de perte de charge et de débit de gaz en fonction de la modification du rayon du conduit.



b- La relation entre la pression et le débit peut être non linéaire lorsque le débit est turbulent (trachée et grosses bronches, bifurcations, sonde d'intubation et raccords). C'est le cas de la ventilation mécanique contrôlée.



TURBULENT FLOW

Une équation incorpore à la fois les caractéristiques du conduit aérien, et celles du gaz (vélocité, caractéristiques chimiques), pour décrire la possibilité qu'un flux devienne turbulent. Le nombre de Reynolds permet de prévoir la survenue d'un flux turbulent prédominant quand il devient supérieur à 2000.

$$Re = \frac{2rvd}{n}$$

- où :

- r = rayon du conduit
- v = vitesse moyenne du gaz
- d = densité du gaz
- n = viscosité du gaz

Dans ce cas, la loi d'Ohm ne s'applique plus et la résistance est proportionnelle au carré du débit.

$$\Delta P = K_2 * V^2$$

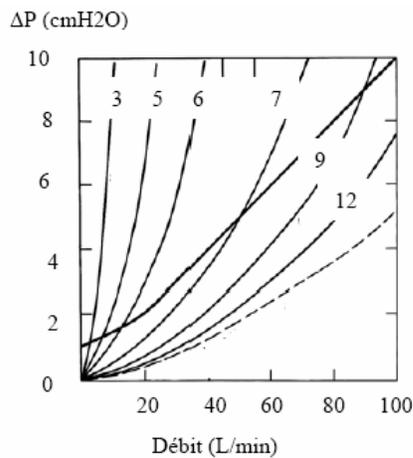


Fig.[2] En régime turbulent, la résistance augmente avec le débit. La sonde d'intubation (diamètre 3 à 12 mm) ajoute une résistance importante par rapport à la résistance physiologique.

- en pointillé: résistance normale des voies aériennes
- en traits pleins: résistances en fonction du diamètre de la sonde d'intubation

Cette constante K_2 varie alors directement avec la densité du gaz +++
Moins le gaz est dense, moins il y a perte d'énergie en turbulences, et moins de perte de charge.

D'où l'intérêt d'utiliser l'hélium dans certaines circonstances avec résistances aériennes totales élevées.

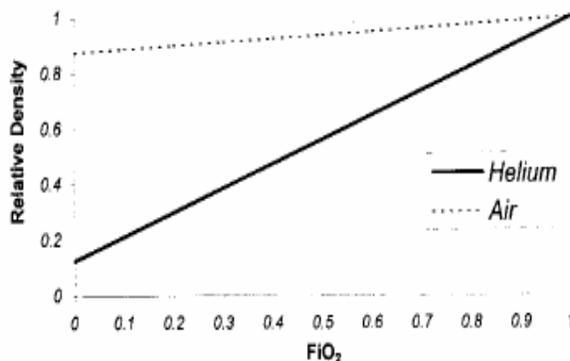


Fig. [3] Densité relative des mélanges :
 - He-O₂
 - N₂-O₂

On en conçoit alors tout l'intérêt en pathologie humaine, en plongée subaquatique ou en hyperbarie expérimentale.

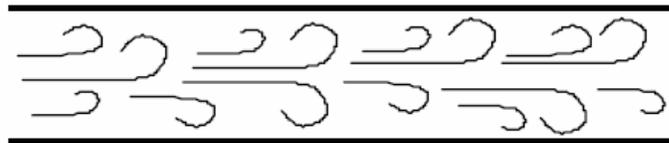
Ex : chez les emphysémateux, il est possible de soulager momentanément ces malades en leur faisant inhaler un mélange hélium-oxygène (Heliox) dont la densité d est plus faible que celle du mélange azote-oxygène : ceci présente l'avantage de réduire le nombre des bronches où l'écoulement est turbulent, et là où ce régime subsiste, de réduire les résistances qui sont également fonction de la densité.

De même, ces mélanges ont été utilisés dans l'asthme grave, chez des patients en ventilation spontanée, et en ventilation contrôlée. Mais actuellement aucun respirateur fiable n'a été construit pour permettre de ventiler de façon adéquate ces patients [Oppenheim-Eden⁶³]

De la même façon, au cours de la plongée subaquatique, l'augmentation de la pression entraîne une augmentation de la densité des gaz ; l'inhalation d'un mélange hélium-oxygène réduit les résistances à l'écoulement de ces gaz.

En plongée expérimentale au sec, d'autres mélanges ont été utilisés associant oxygène, hélium et/ ou hydrogène, dans ce même but.

c- En réalité, dans la plupart des voies aériennes, le flux est transitionnel entre flux laminaire et flux turbulent.



TRANSITIONAL FLOW

La relation entre pression et débit de gaz combine alors les éléments des 2 équations précédentes, et s'exprime selon l'équation de Rohrer. La variation de pression (ΔP) entre 2 points du système ventilatoire est une fonction mixte entre les 2 types d'écoulement des gaz telle que :

$$\Delta P = (K_1 * V^0) + (K_2 * V^{02})$$

- où :

V_1 = débit du courant gazeux laminaire

K_1 = constante de flux laminaire, dépend de la viscosité, propre à la nature du gaz, mais indépendante de la pression

V_2 = débit du courant gazeux turbulent

K_2 = constante de flux turbulent, dépend de la densité, fonction de la pression

- en divisant les paramètres de cette équation par un même débit V^0 :

$$\frac{\Delta P}{V^0} = \frac{(K_1 * V^0)}{V^0} + \frac{(K_2 * V^{02})}{V^0}$$

$$R = K_1 + K_2 * V^0$$

A chaque instant donné, ces 2 constantes K_1 et K_2 interviennent, et la formule ci-dessus décrit au mieux ce régime de flux transitionnel.

Cette relation fondamentale entre constantes K_1 et K_2 des régimes laminaire et turbulent, densité du gaz, débit et pression, va permettre d'expliquer en grande partie les variations des paramètres ventilatoires des respirateurs en milieu hyperbare.

B- Application au respirateur en milieu hyperbare

Cette augmentation de la densité du gaz comprimé reste le principal obstacle à l'utilisation aisée des respirateurs à l'intérieur de la chambre hyperbare. Comme on vient de le voir, le flux est inversement proportionnel à la densité du gaz,

Avec l'augmentation de la pression, les molécules de gaz s'écoulent avec une perte de charge croissante à travers les valves, les tubes, les régulateurs de flux, qui composent le respirateur. Ceci entraîne une déviation des valeurs de FR, VT et VE, variables selon les niveaux de pression et les différents types de respirateurs.

Suite à la première classification des respirateurs de WW. Mapleson de 1962, de nombreuses autres classifications ont été proposées. Une classification fonctionnelle pratique utilise les mécanismes qui permettent d'insuffler les poumons, et ceux qui permettent le "cyclage" inspiration-expiration. Pour les respirateurs utilisés en milieu hyperbare, on peut ainsi distinguer :

1- les respirateurs pneumatiques "time-cycled"

Le volume courant VT n'est pas directement déterminé ou affiché, mais représente la fin de l'inspiration atteinte après un temps inspiratoire déterminé T_I . Au terme de ce délai, le mécanisme s'inverse, et l'expiration a lieu.

Ex (cf. Annexe 2) : Urgency (Bird), Oxylog (Dräger), Logic 03 et 07 (Puritan-Bennett), Autovent 2000 (Dräger), Hyperlog (Dräger), Iper 60VF (Siare)

2- les respirateurs pneumatiques "pressure-cycled"

Le volume courant VT n'est pas directement déterminé ou affiché, mais représente la fin de l'inspiration atteinte à une pression limite demandée. Cette pression limite atteinte, le mécanisme s'inverse, et l'expiration a lieu.

Ex (cf. Annexe 2): Stephenson Minuteman, Mark 10 et 14 (Bird)

3- les respirateurs "volume-cycled"

Le volume courant est directement programmé, affiché, déterminé.

Ex (cf. Annexe 2) : Hydraulic Emerson (JH.Emerson), Oxford (Penlon), Monaghan 225

4- les respirateurs pneumatiques générateurs de débit

Ex (cf. Annexe 2) : RCH (Lama)

Les différentes études [Vezzani⁸⁸, Stahl⁸¹] sur ces différents types de respirateurs en atmosphère hyperbare ont été réalisées avec des "poumons tests". De nombreux modèles (Test lung, Test analogue, Lung simulator) existent et ont permis de les tester en hyperbarie expérimentale (fig.5) :

- Lung Volume Performance Analyzer (LVPA) Manley (British Oxygen Co., et Medial Developments Ltd, Chesham, Bucks, U.K.)
- Lung Analogue (Michigan Instruments, Grand Rapids, MI, E.U.)
- VentAid Training Test Lung (Michigan Instruments, Grand Rapids, MI, E.U.)
- LS 1500 (Drägerwerk, Allemagne)
- PneuView (Michigan Instruments, Gran Rapids, MI, E.U.) [fig. 4]



Manley Lung Simulator

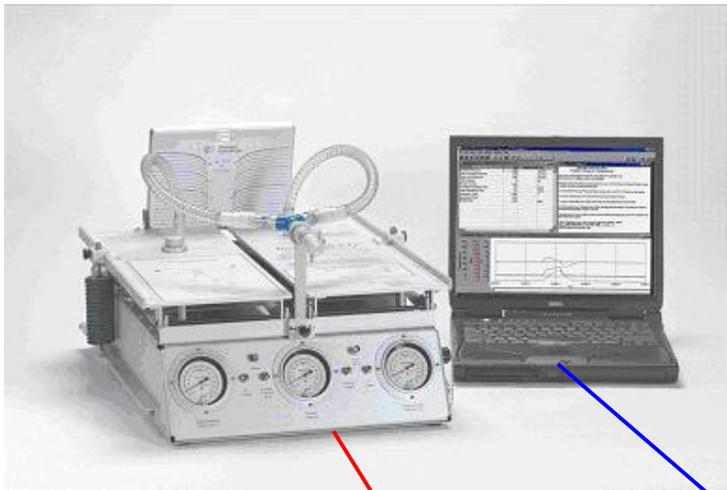


Fig. [4] PneuView® ventilator testing & training Systems : caractéristiques

- Boucles Débit/volume, et Pression/volume,
- Affichage en temps réel des courbes de Pression, Volume, et Débit,
- Acquisition, conservation et revue des résultats des expérimentations,
- Etude des performances du respirateur jusqu'à 72 h,
- Mesure de Pression, Volume, Débit en fonction du temps,
- Génération de rapports affichés et

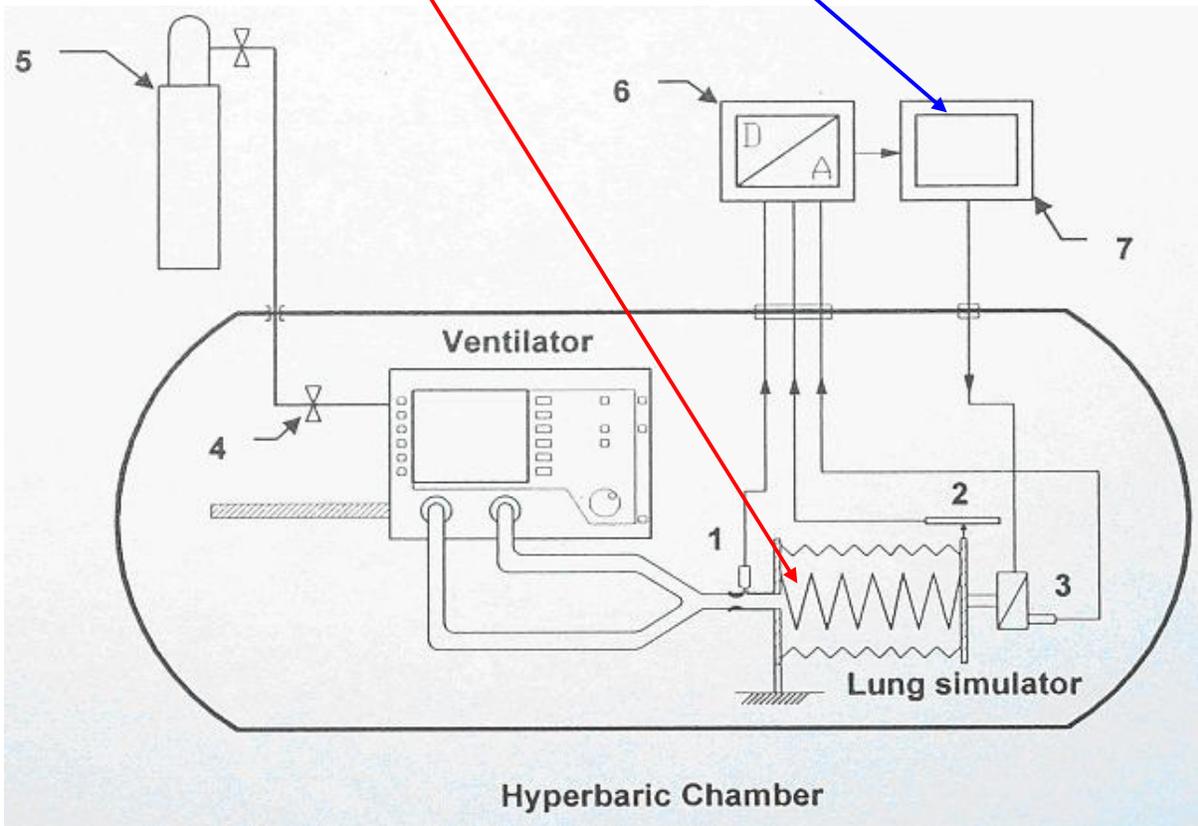


Fig. [5] Diagramme schématique de l'installation expérimentale pour étude d'un respirateur en milieu hyperbare.

- 1= capteur de Pression différentielle
- 2= moniteur de déplacement linéaire du poumon test (soufflet)
- 3= moteur électromécanique
- 4= valve de contrôle de Pression chargée de maintenir une Pression différentielle

Ces expérimentations sont concordantes. Elles montrent les comportements suivants pour les différentes constantes habituellement mesurées :

1- le volume courant VT

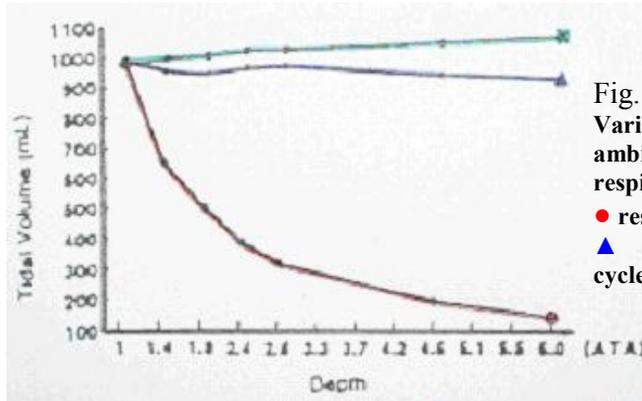


Fig. [6]
Variation de VT (ml) en fonction de la P. ambiante (ATA), pour les 3 types de respirateurs.
● respirateurs pneumatiques "time-cycled"
▲ respirateurs pneumatiques "pressure-cycled"

2- le temps inspiratoire T_i

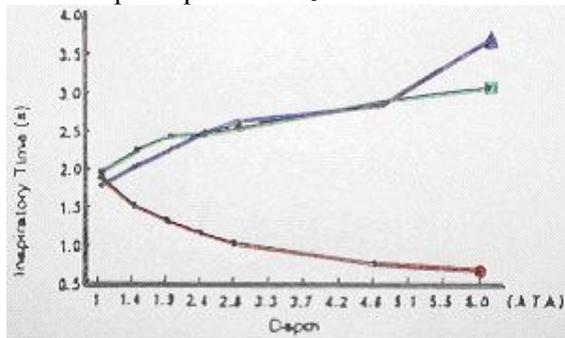


Fig. [7]
Variation de T_i (s) en fonction de la P. ambiante (ATA), pour les 3 types de respirateurs :
● respirateurs pneumatiques "time-cycled"
▲ respirateurs pneumatiques "pressure-cycled"

3- le temps respiratoire T_E

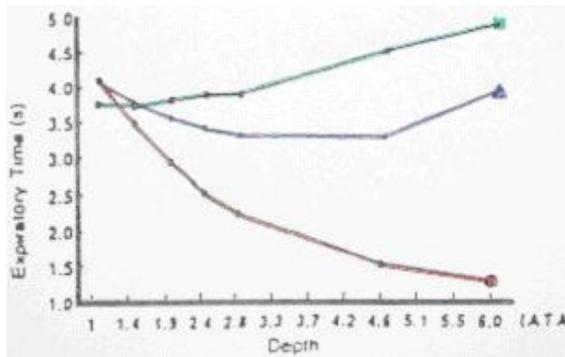


Fig. [8]
Variation de T_E (s) en fonction de la P. ambiante (ATA), pour les 3 types de respirateurs :
● respirateurs pneumatiques "time-cycled"
▲ respirateurs pneumatiques "pressure-cycled"

4- la fréquence respiratoire FR

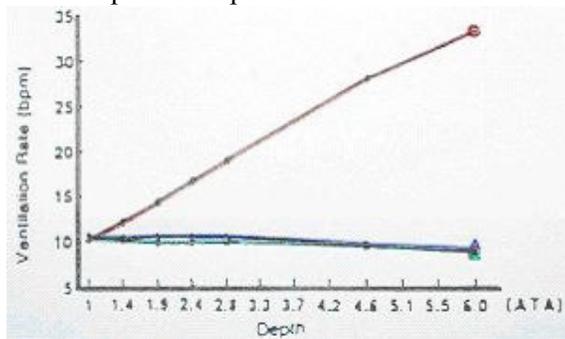


Fig. [9]
Variation de FR (c/mn) en fonction de la P. ambiante (ATA), pour les 3 types de respirateurs :
● respirateurs pneumatiques "time-cycled"
▲ respirateurs pneumatiques "pressure-cycled"

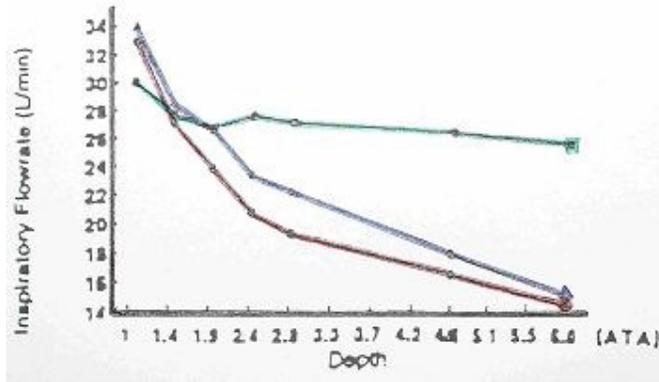


Fig. [10]
Variation de V_I (s) en fonction de la P. ambiante (ATA), pour les 3 types de respirateurs :
● respirateurs pneumatiques "time-cycled"
▲ respirateurs pneumatiques "pressure-

On constate effectivement que tous les respirateurs de même mécanisme, de même principe, ou de même classe, **même appartenant à des constructeurs différents**, obéissent aux mêmes lois, et présentent des modifications de leurs paramètres ventilatoires du même type.

Ainsi, dans une étude comparative en atmosphère hyperbare de 4 respirateurs (Servo 900C Siemens, Microvent Dräger, Evita 4 Dräger, Oxylog 2000 Dräger), Stahl et coll.^[81], en 2000, expliquent les modifications observées selon la classe ou le type du respirateur :

1- Pour les respirateurs pneumatiques "time-cycled" (fig. 6 à 10, courbes ●)

La baisse du débit inspiratoire et du VT est clairement une conséquence d'une augmentation de la densité des gaz avec l'élévation de pression. **Cette relation inverse entre Pression ambiante et VT est spécifique de chaque respirateur utilisé, de son concept technologique (valves inspiratoires, mécanismes de contrôle de débit)**

2- Pour les respirateurs pneumatiques "pressure-cycled" (fig. 6 à 10, courbes ▲)

Le VT reste stable à chaque niveau de pression ambiante. Cependant, on doit tout de même garder à l'esprit que, même en pression contrôlée, le débit inspiratoire devient légèrement plus lent à des niveaux de pression élevée, toujours du fait de l'augmentation de densité des gaz. Si durant la "ventilation en pression contrôlée", l'algorithme de contrôle de pression compense largement cet effet en adaptant le degré d'ouverture de la valve inspiratoire afin d'atteindre le niveau de pression programmé, le débit de gaz maximum délivré décroît constamment en condition hyperbare, limitant de ce fait le niveau de compensation.

Ainsi, dans les situations où le débit ne devient pas nul en fin d'inspiration, c'est-à-dire en cas d'augmentation de la résistance des voies aériennes, la P. ambiante élevée "coupera" l'inspiration en fonction de cette pression ambiante. Ainsi, le VT peut aussi diminuer, dans ces conditions de résistances aériennes élevées, même sous ventilation de type "pressure-cycled".

3- Monitoring de la ventilation en condition hyperbare

Le monitoring du débit de chaque respirateur devient non fiable avec l'augmentation de pression ambiante. Le débit expiratoire V_E , et en conséquence le volume courant VT, sont généralement surestimés avec l'augmentation de pression. Cependant, les pressions des voies aériennes restent, elles, fiables avec l'augmentation de pression ambiante.

Nous reverrons plus loin, les conditions de cette mesure avec les différents spiromètres (cf. § Monitoring)

4- Concernant la compensation ou la correction de la baisse du VT
 - En ventilation de type "volume-cycled" (fig. 6 à 10, courbes ■), l'altération du fonctionnement des respirateurs dans ce mode peut être corrigée assez aisément avec la modification de pression, selon la formule suivante :

$$VT_{set} = VT_{cible} / (VT_{actuel}/VT_{cible})$$

La limite de cette compensation, cependant, est imposée par la limite maximum paramétrable de VT pour chaque respirateur [fig.11]

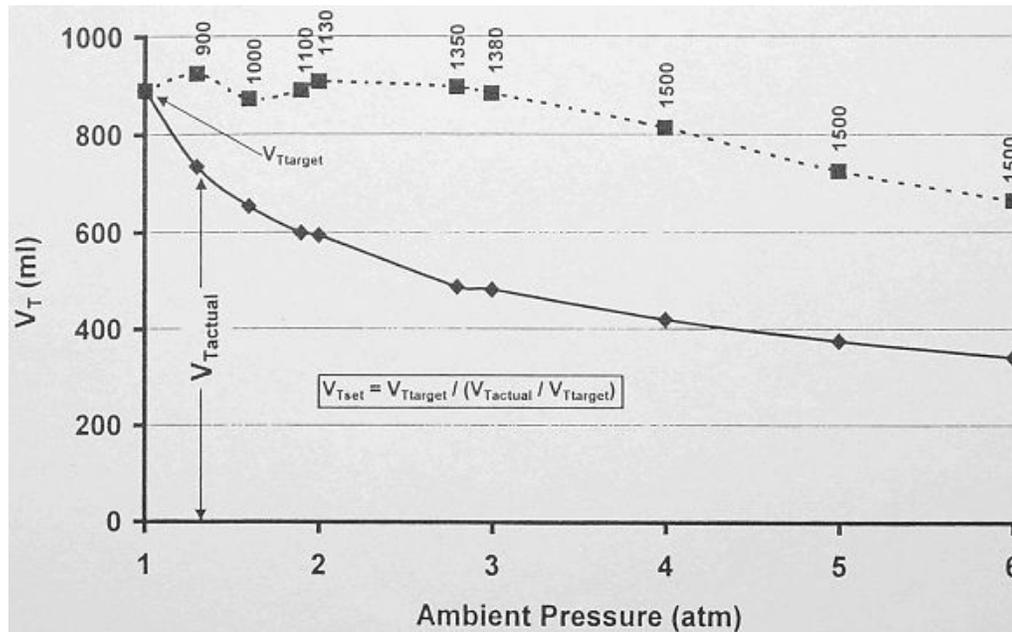


Fig. [11] : Compensation du volume courant VT avec un respirateur "volume-cycled". Au-delà d'un certain niveau de Pression (spécifique à chaque respirateur), les possibilités sont dépassées : ici au-delà de 3 ATA, un VT affiché de 1500 ml ne permet plus d'atteindre la valeur cible de 900ml.

[d'après Stahl et coll.⁸¹]

- En ventilation de type "pressure-cycled", si une baisse de volume courant VT survient dans les conditions précédemment décrites (augmentation des résistances aériennes), elle peut aussi être corrigée en augmentant le temps inspiratoire T_I, jusqu'au point où le débit inspiratoire s'annule.

De ces modifications ventilatoires en fonction de chaque type de respirateurs, les auteurs précisent:

- les respirateurs "volume-cycled" (Hydraulic Emerson, Oxford Penlon, Monaghan 225) offrent les meilleures performances globales.

- pour les respirateurs "pressure-cycled" (Bird Mark 10, 14), le volume courant VT reste stable à chaque niveau de pression ambiante. Cependant, on doit tout de même garder à l'esprit que, même en pression contrôlée, le débit inspiratoire devient légèrement plus lent à des niveaux de pression élevée, toujours du fait de l'augmentation de densité des gaz. Si avec ce type de respirateur, l'algorithme de contrôle de Pression compense largement cet effet en adaptant le degré d'ouverture de la valve inspiratoire afin d'atteindre le niveau de Pression programmé, le débit de gaz maximum délivré

décroît constamment en condition hyperbare, limitant de ce fait le niveau de compensation.

Cependant, en cas d'augmentation de la résistance des voies aériennes, la pression ambiante élevée "coupera" l'inspiration en fonction de cette pression ambiante. Ainsi, VT peut aussi diminuer, dans ces conditions de résistances aériennes élevées, même avec ces respirateurs "pressure-cycled".

- les respirateurs "time-cycled" restent sans aucun doute les moins faciles à utiliser en condition hyperbare. Avec les modifications suivantes :

- la réduction moyenne de 12% de VT,
- la diminution de 33% de T_I ,
- la diminution de 30% de T_E ,
- la chute de 40% du débit inspiratoire
- l'augmentation linéaire de 300% de FR,

ces respirateurs :

- nécessitent des corrections permanentes des paramètres ventilatoires pendant les modifications de pression,
- ces corrections restent parfois insuffisantes aux pressions élevées et dépassent les capacités des appareils,
- exposent au risque d'hypercapnie (cf. § "Complications"), de majoration de la toxicité de l'O₂, et au risque de convulsions hyperoxiques.

Stahl et coll.^[81] concluent donc : "Si disponible, la ventilation de type "pressure-cycled" doit être préférée en situation hyperbare, grâce à la relative stabilité des paramètres ventilatoires (FR et VT). Basée sur les propriétés spécifiques du respirateur considéré, des corrections appropriées restent possibles pour permettre une utilisation sécuritaire, y compris en ventilation de type "volume-cycled".

Ce n'est pas l'avis de Blanch et coll.^[5-6] : "Les respirateurs pneumatiques "pressure-cycled" sont un mauvais choix pour l'hyperbarie, car le VT dépend directement de la compliance thoraco-pulmonaire, et de la résistance des voies aériennes. Une modification aiguë dans l'un ou l'autre de ces paramètres détermine un changement potentiellement dangereux du VT".

Ainsi, le mode classique "ventilation contrôlée" garde une place fondamentale en médecine hyperbare. On assiste cependant depuis plusieurs années au développement des "modes d'assistance ventilatoire partiels". Ces modes ventilatoires sont de plus en plus utilisés en réanimation, car ils :

- facilitent l'adaptation du patient au respirateur,
- permettent d'optimiser les échanges gazeux,
- (et aident au sevrage ventilatoire).

Ces modes restent pour l'instant très peu utilisés en médecine hyperbare pour les raisons suivantes :

- les respirateurs qui permettent ces modes ventilatoires ne sont pas tous utilisables en milieu hyperbare, souvent pour des raisons d'énergie électrique,
- les contraintes ventilatoires spécifiques de l'hyperbarie modifient les paramètres de façon différente selon le type de respirateur,
- ils n'ont pas fait encore l'objet d'études en milieu hyperbare.

L'utilisation d'un respirateur en hyperbarie doit dès lors répondre nécessairement à plusieurs objectifs. Un cahier des charges du respirateur hyperbare peut être envisagé.

III- Cahier des charges du respirateur hyperbare idéal

Dès la première conférence de consensus sur la médecine hyperbare, il y a dix ans, était posé le problème de la ventilation mécanique, et d'un respirateur adapté au milieu hyperbare...

**1^{ère} CONFERENCE EUROPEENNE DE
CONSENSUS SUR LA MEDECINE
HYPERBARE**

LILLE., 19 au 21 septembre 1994
RECOMMANDATIONS DU JURY*

.... QUESTION N°4 :

QUELLES REGLES DE CONCEPTION DE SÉCURITE DOIVENT SUIVRE LES CHAMBRES ET EQUIPEMENTS MEDICAUX POUR UN USAGE HYPERBARE ?

1 - Qualités minimales requises pour la conception des caissons et pour les équipements médicaux destinés à traiter un patient en situation d'urgence et de réanimation

* Troubles de la conscience, défaillance respiratoire, instabilité hémodynamique ne doivent pas constituer un obstacle à la pratique de l'oxygénothérapie hyperbare, (recommandation de type 1).

* La prise en charge d'un patient en situation d'urgence et de réanimation, en chambre hyperbare, demande de pouvoir assurer les perfusions et traitements parentéraux nécessaires, le monitoring hémodynamique ainsi que tous les traitements permettant d'assurer la stabilité hémodynamique, un monitoring de la respiration ainsi que tous les traitements nécessaires à assurer une ventilation correcte des patients, un monitoring des effets de l'oxygénothérapie hyperbare en particulier par les mesures d'oxygène transcutanées (recommandation de type 1).

* Pour minimiser les risques d'incendie, les appareils et dispositifs médicaux ne peuvent être utilisés dans une chambre hyperbare que :

- Si ces équipements ont été spécialement réalisés pour un usage dans les chambres hyperbares et leur sécurité contrôlée dans ces conditions
- Ou si ces équipements ont été modifiés spécialement pour le milieu hyperbare et si leur sécurité a été contrôlée
- Ou si ces équipements restent en dehors de la chambre hyperbare avec utilisation seulement à l'intérieur des électrodes ou des capteurs, la connexion électrique se faisant par des passages de coques, (recommandation de type 1).

*** La ventilation contrôlée demande une adaptation particulière au milieu hyperbare. Actuellement, un appareil qui soit conforme au respirateur idéal permettant notamment d'assurer tous les modes ventilatoires en milieu hyperbare n'a pas encore été réalisé.**

....

Plusieurs auteurs ont défini, repris, modifié, adapté successivement les critères du respirateur hyperbare idéal :

- Moon [⁵⁹⁻⁶⁰⁻⁶¹] en 1986, en étudiant plus spécifiquement le respirateur Monaghan 225,
- Camporesi et Richard [¹¹] en 1987,
- Vezzani et Pizzola [⁸⁹] en 1994 dans leur rapport de la 1^{ère} Conférence Européenne de Consensus sur la Médecine Hyperbare,
- Hilliard et coll. [³²] en 1998,
- Germonpré [²⁶] en septembre 2004, au 30^{ème} Congrès annuel de l'EUBS.

Ainsi, en reprenant le travail de ces différents auteurs, le respirateur hyperbare idéal "devrait être" comme suit :

- 01- de petite dimension, avec un encombrement minimum,
- 02- pneumatique, alimenté par une source de gaz comprimé, sans composante électrique (?)
- 03- avec stabilité des paramètres ventilatoires
- 04- à niveau de pression différentielle bas
- 05- avec évacuation extérieure des gaz expirés
- 06- avec possibilité de changer aisément de gaz respiratoires
- 07- avec disponibilité de plusieurs modes ventilatoires
- 08- sans lubrifiants intérieurs inflammables **[Moon]**
- 09- sans conséquence cardiovasculaire et hémodynamique **[Germonpré]**
- 10- (trans)portable
- 11- sans compartiment étanche
- 12- avec la possibilité de réaliser une pression positive télé-expiratoire

Reprenons ces différents points :

1- Un respirateur portable et/ou de petite dimension

Un respirateur de petite dimension permettant de transporter le patient (à l'intérieur, et à l'extérieur) de la chambre hyperbare, sans rompre la ventilation.

Cette contrainte de dimension ou d'espace, est effectivement importante, si l'on considère :

- l'étroitesse habituelle des chambres hyperbares, où la dimension de chaque élément, de sa place, de son encombrement est important.
- l'idéal surtout de transporter le patient de sa chambre de réanimation avec un même respirateur qui servira également à sa ventilation pendant la séance HB.

Inversement, un respirateur portable ne sera que rarement multi-mode ventilatoire...

2- Un respirateur "pneumatique"

La source d'énergie d'un respirateur peut être électrique ou pneumatique

Une énergie totalement pneumatique est préférable; cependant une énergie électrique à basse tension est acceptable. Cette contrainte énergétique permet d'éviter l'énergie électrique dans l'enceinte du caisson du fait du risque d'incendie :

- *dans les caissons monoplaces comprimés à l'oxygène, les appareils électriques sont évidemment interdits, car comprimés en oxygène pur.*
- dans les chambres multiplaces :
 - soit la tension ne dépasse pas 12 V, voire 6 V, donc du domaine des très basses tensions TBT (cf. § Contraintes Techniques I-électriques),
 - soit la partie électrique est laissée à l'extérieur, et la partie ventilatoire ou pneumatique est seule interne au caisson.

En fait actuellement, on voit de plus en plus apparaître sur le marché ces respirateurs électro-pneumatiques, souvent qualifiés par les auteurs de "sophistiqués" :

- Servo 900 B, C, ou D (Siemens-Elema)
- Campbell (Ulco)

Ils ont déjà fait la preuve de leur fiabilité dans de nombreux centres, et notre enquête mondiale récente (cf. § Introduction, préambule) a montré que beaucoup de ces centres, qui n'en sont pas encore équipés, les demandent ardemment.

3- Une stabilité des paramètres ventilatoires

C'est le problème majeur. Il est fondamental que ces paramètres ventilatoires restent stables par rapport aux valeurs basales à la pression atmosphérique, quel que soit le niveau de compression.

La fréquence respiratoire FR et le volume courant VT en particulier, donc le volume-minute V_E , doivent rester stables par rapport au VT programmé, au cours des variations de pression [Hilliard³², Moon⁶⁰⁻⁶¹].

Ce respirateur "idéal" devrait garantir une ventilation, en condition hyperbare, identique à celle en condition normobare, avec des ajustements ventilatoires aussi limités que possible. [Germonpré²⁶]

Nous avons vu plus haut les modifications de ces différents paramètres en fonction de variations de pression.

Nous reprendrons la conclusion de Stahl et coll.^[82] : *"Si disponible, la ventilation en mode pression contrôlée (PCV) doit être préférée en situation hyperbare, grâce à la relative stabilité des paramètres ventilatoires (FR et VT). Basée sur les propriétés spécifiques du respirateur considéré, des corrections appropriées restent possibles pour permettre une utilisation sécuritaire, y compris en mode volume contrôlé (VCV)."*

4- Un niveau de pression différentielle bas pour les respirateurs pneumatiques

Tout d'abord, un problème de définition : le terme différentiel implique une différence entre 2 pressions. Ici, il s'agit de la différence entre :

- la Pression de fonctionnement du respirateur, mesurée à l'entrée du respirateur, obtenue après une ou plusieurs valves de réduction,
- et la Pression résultante de l'insufflation des voies aériennes, mesurée au niveau de la pièce en Y du tube respiratoire

$$P_{\text{diff}} = P_{\text{fonction}} - P_{\text{aérienne}}$$

Des pressions différentielles excessivement élevées ne doivent pas être nécessaires au bon fonctionnement de l'appareil.

Les auteurs anglophones utilisent eux-mêmes des termes bien différents :

1- Pour la Pression "murale"

- the source pressure [Chatburn¹⁴]
- the supply pressure
- the delivery pressure [Weaver⁹³]

2- Pour la Pression de fonctionnement ou de fonction

- the driving pressure
- the inlet pressure P_{IN} [Weaver⁹³]

3- Pour la Pression ambiante de la chambre hyperbare

- the ambient pressure,
- the chamber pressure [Weaver⁹³]
- the operating pressure [Chatburn¹⁴, Hyperlog-brochure technique]
- the working pressure

- 4- Pour les Pressions des voies aériennes, **par rapport à la Pression ambiante** :
 - the airway pressures P_{aw} , (mean, peak, etc)

On constate ainsi par exemple avec le Sechrist 500A étudié par Weaver LK.^[23], que la performance du respirateur diminue parallèlement avec la baisse de la Pression de fonction, si la différence n'est pas maintenue pendant l'augmentation de Pression ambiante.

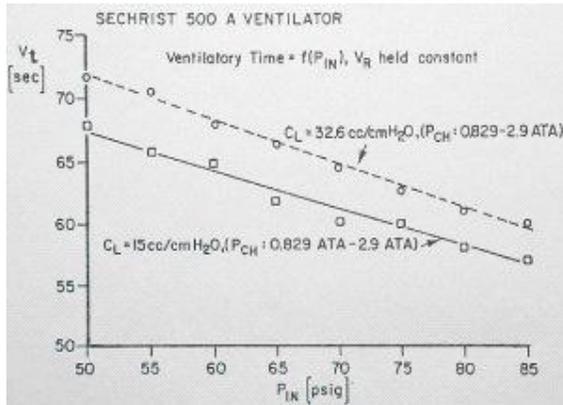


Fig. [12]
 Temps nécessaire au Sechrist 500A pour obtenir une FR= 15 c/min, en fonction de la Pression de fonction P_{IN} .

NB : P_{IN} recommandée = 70psig
 (d'après Weaver LK.²³)

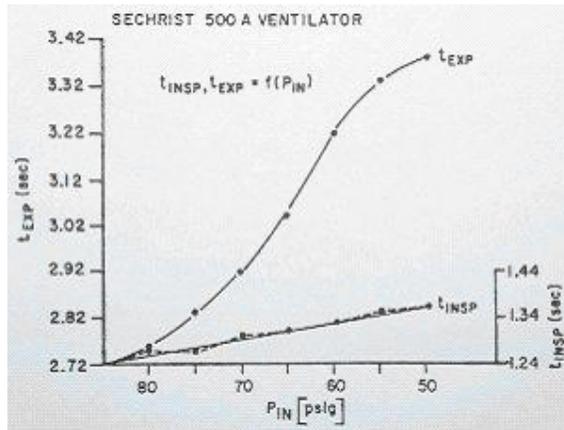


Fig. [13]
 Temps expiratoire T_E (échelle G), et temps inspiratoire T_I (échelle D), en fonction de la P. de fonction P_{IN} .

NB : P_{IN} recommandée = 70psig
 (d'après Weaver LK.²³)

5- Une évacuation extérieure des gaz expirés

Il est vital en effet de pouvoir évacuer les gaz expirés à l'extérieur de la chambre hyperbare. Cette contrainte de pollution est déterminante quant au risque incendie. L'échappement d'oxygène dans la C-HB (il est difficile de parler ici de pollution avec l' O_2 !) doit être négligeable. [Hilliard³²].

Il existe à cet effet des appareils permettant d'évacuer les gaz de la C-HB multiplace avec contrôle précis du débit : les déverseurs. Il en existe pour :

- la C-HB,
- les masques de ventilation spontanée,
- le respirateur; il devra être équipé de son propre déverseur, sans perte de charge significative.

6- La possibilité de changer aisément de gaz

C'est une contrainte pratique, qui peut être résolue par une solution technique simple : un inverseur. Il est souhaitable en effet de changer de gaz (air, oxygène, HélioX, Nitrox) sans manipulation ou interruption de la ventilation du patient.

7- La disponibilité de plusieurs modes ventilatoires

Comme il est dit plus haut, les patients proposés à l'OHB sont de plus en plus souvent des patients de réanimation ventilés par des respirateurs de plus en plus sophistiqués, dans des modes ventilatoires variés. Il est souhaitable de pouvoir poursuivre ces modes ventilatoires quand c'est possible. Ainsi, il est très utile d'avoir à sa disposition, au minimum :

- une ventilation assistée-contrôlée (VAC ou CPPV),
- une ventilation contrôlée intermittente (VACI ou IMV),
- une pression positive télé-expiratoire (PEEP).

D'autres modes comme le mode Pressure Support Ventilation (PSV) sont connus pour diminuer le travail ventilatoire et améliorer le confort subjectif du patient. Les interactions "Patient-Respirateur" peuvent être coordonnées (synchrones) ou désordonnées (asynchrones).

L'asynchronisme respirateur-patient augmente le travail respiratoire en imposant une surcharge aux muscles respiratoires. Les centres respiratoires répondent par un mécanisme de feedback au cycle de travail des muscles respiratoires. Une incoordination de ces centres respiratoires et du respirateur entraîne un asynchronisme. Lydon et coll.^[48] décrivent le cas d'une désynchronisation sévère entre un patient et son respirateur, et émettent l'hypothèse que ce phénomène a été induit par un changement de mode de ventilation, du mode "en pression contrôlée" au mode "en volume contrôlé", et du à la fois aux réglages des paramètres de respirateur et à l'inadaptation des centres respiratoires du patient à ce nouveau mode.

8- L'absence de lubrifiants inflammables

Cette contrainte technique rejoint celles liées au risque incendie, cherchant à éliminer tout combustible dans un milieu à pression partielle d'oxygène élevée.

9- L'absence d'effets délétères hémodynamiques

En particulier l'addition d'une PEEP n'est pas toujours bénéfique [Youn¹⁰⁸]. Le retour veineux peut être diminué par des pressions intra-thoraciques élevées, avec pour conséquence : tachycardie, hypotension. Ceci entraîne une augmentation du shunt Qs/Qt, avec pour conséquence, une baisse de la PtcO₂. En général en OHB, devant cette hypotension chez un patient sous PEEP, il faut d'abord diminuer progressivement le niveau de PEEP, avant de débiter ou d'augmenter un traitement par drogues inotropes, et/ou vasoconstrictrices. Ceci revient en fait à déterminer comme en réanimation la "best PEEP".

10- Un respirateur (trans)portable ?

Certains auteurs souhaitent en effet installer le patient dès le service de réanimation sous son "futur" respirateur hyperbare. Ceci permet :

- d'installer tranquillement en milieu de réanimation le nouveau mode de ventilation,
- de "coller" au mieux aux paramètres ventilatoires de son respirateur de soins intensifs,
- d'éviter un 3^{ème} respirateur de transport toujours délétère; il est remarquable de voir d'ailleurs que beaucoup de respirateurs hyperbares sont à l'origine des respirateurs destinés aux transports intra- ou inter-hospitaliers.

Il devra en outre présenter un système de connexion standard avec la bouteille d'oxygène utilisée pour le transport, puis avec l'arrivée de gaz dans la C-HB.
Mais là aussi, un respirateur de transport n'est que rarement multi-mode ventilatoire...

11- Un respirateur sans compartiment étanche

Il est évident que tout respirateur comportant une enceinte isolée ou une cavité close non équilibrable avec la pression ambiante, dans sa conception, pourrait subir des déformations, des ruptures, des pannes...

12- Un respirateur avec PEEP

Nous en avons déjà parlé aux paragraphes 7 et 9 ci-dessus.

Toutes ces caractéristiques n'ont pas été encore rassemblées sur un seul et même respirateur, et de nombreux auteurs [Vezzani⁸⁹, Germonpré²⁶] pensent que ce but sera très difficile à atteindre, compte tenu du nécessaire investissement dans ce domaine, attendu l'absence de retour sur investissement prévisible étant donné le champ limité de son application.

Pour résoudre ces difficultés, 2 possibilités s'offrent aux ingénieurs biomédicaux [Hilliard³²]:

- 1- n'utiliser que des équipements conçus pour chambre hyperbare,
- 2- modifier pour le milieu HB des équipements normalement dédiés à la réanimation.

Théoriquement, les solutions techniques pour réaliser un respirateur hyperbare prévoient :

- 1- un respirateur volumétrique, qui répondrait à tous les standards en milieu hyperbare. Il faudrait alors réaliser un moteur électrique alimenté par un courant de bas voltage, capable dans le même temps de développer une grande puissance,
- 2- un respirateur qui obéit à une logique pneumatique, et capable d'assurer le maintien de la fréquence respiratoire FR et du volume courant VT principalement, mais aussi des autres paramètres de la ventilation jusqu'à 6 bar(a) ...

En développant ces 2 caractéristiques, quelques ventilateurs ont été conçus pour fonctionner "correctement" en milieu hyperbare, mais, comme on le disait précédemment, ne permettent pas actuellement de suppléances identiques à celles dont bénéficie le malade en salle de réanimation normobare...

"Actuellement, en 2005, un appareil qui soit conforme au respirateur idéal n'a pas encore été réalisé..."

CONDUITE PRATIQUE de la VENTILATION MÉCANIQUE en CHAMBRE HYPERBARE

Plusieurs auteurs [³⁻⁴⁻¹⁶⁻¹⁷⁻³³⁻⁴⁰⁻⁴¹⁻⁶¹⁻⁹⁷] ont particulièrement étudié le traitement et la ventilation mécanique des patients de réanimation en chambre hyperbare monoplace et/ou multiplace ("*Management of seriously ill patients in the hyperbaric chamber*") :

J. Desola [¹⁷] distingue ainsi 3 catégories de difficultés :

1- Les difficultés liées au patient dans l'environnement hyperbare

Les patients de réanimation, qui entrent dans le cadre des indications acceptées de l'oxygénothérapie hyperbare, présentent souvent une insuffisance respiratoire aiguë, une instabilité hémodynamique, des troubles de la conscience. Ainsi, les moyens thérapeutiques suivants sont nécessaires : outre les abords veineux, les solutés de perfusion et dérivés sanguins, la diurèse et la sonde urinaire, le monitoring (la gazométrie artérielle, la PtcO₂). L'intubation trachéale et la ventilation artificielle font partie des éléments principaux de surveillance pendant la séance d'OHB.

2- Les problèmes liés au personnel médical et infirmier hyperbare :

J. Desola évoque les difficultés liées aux traitements hyperbares prolongés, et à ses conséquences sur la décompression du personnel accompagnant. Ceci n'est pas du ressort de cette étude.

3- Les problèmes liés aux interactions avec les autres activités hospitalières :

L'auteur regroupe ici trois autres difficultés, à ne pas négliger :

- l'hygiène (mesures pratiques d'asepsie, et désinfection) en hyperbare : il convient de respecter les mesures d'hygiène propres à chaque respirateur et définies par le constructeur. (cf. § Contraintes techniques, tableau III)
- la coordination des équipes hospitalières (en particulier entre l'unité hyperbare, le service de soins intensifs, et la chirurgie), pour programmer un planning cohérent, chez les patients nécessitant des séances répétitives. Il appartient au médecin responsable de l'unité hyperbare de gérer ce planning en fonction :
 - des patients programmés pour séances répétitives,
 - des urgences possibles,
 - des ressources humaines.
- la gestion du matériel :
 - nombre de caisson monoplace et multiplace,
 - nombre de respirateurs (en n'oubliant pas les temps nécessaires à la décontamination du matériel).

Weaver LK.^[97] et Barach P.^[3] ont étudié plus particulièrement l'oxygénothérapie hyperbare en chambre monoplace, qu'ils utilisent exclusivement. Malgré les difficultés inhérentes au caisson monoplace, la ventilation mécanique de patients de réanimation y est possible. Les difficultés ont

toutes été surmontées par des dispositifs souvent ingénieux. Plusieurs respirateurs, étudiés précédemment, ont été conçus pour ces chambres monoplaces et surtout :

- le Sechrist model 500A (cf. § Annexe 2-Sechrist 500A)
- le Omni-Vent serie D, avec moniteur de volume Tau (cf. § Annexe 2-Omni-Vent).

Ce dernier respirateur serait néanmoins supérieur au précédent en particulier en cas de compliance basse et de nécessité d'une PEEP élevée. De même, les prélèvements artériels pour gazométrie [¹⁰⁰], les aspirations trachéales [²⁵], les pauses à l'air [⁹⁶] sont possibles en chambre hyperbare monoplace.

Moon RE et coll.[⁶⁰⁻⁶¹] ont publié plusieurs articles sur l'oxygénothérapie hyperbare en chambre multiplace. Concernant la ventilation contrôlée, ils citent d'autres respirateurs, le plus souvent modifiés pour l'hyperbarie, qui seront détaillés plus loin (cf. § Annexes 1-2).

I- L'évaluation et la préparation du patient

Cette préparation est grandement dépendante du lieu d'origine, et des modalités de transfert du patient.

Il est recommandé que les centres hyperbares multiplaces qui prennent en charge les patients de réanimation soit à proximité, et au mieux dans le service même de réanimation [Barach ³]. Cette proximité est gage de sécurité, tant pour sa préparation, que pour son transfert (le plus court possible), et sa prise en charge sans délai par le service ou l'unité hyperbare.

Ainsi, il est toujours préférable qu'un patient transféré d'un autre centre pour une urgence hyperbare passe dans le service de réanimation, pour le bilan complet de son état, et la confirmation de l'indication du traitement par oxygénothérapie hyperbare.

II- Le transfert proprement dit

Ce transfert de la chambre de réanimation vers la C-HB sera pratiqué :

- sous la surveillance d'un médecin ou d'un infirmier spécialisé, du service de réanimation, ou du service hyperbare, au mieux, avec 3 personnes [Barach ³].
- avec un respirateur de transfert :
 - idéalement le même respirateur que dans le C-HB, quand il est transportable,
 - en fait bien souvent, le ventilateur de transport est assuré par un autre respirateur de transfert. Ces branchements et débranchements de respirateurs (entre 3 respirateurs: de réanimation, de transfert, et de la chambre hyperbare), avec bien souvent des modes ventilatoires différents, sont l'occasion d'épisode de désadaptation respiratoire, avec ses retentissements cardio-respiratoires délétères (toux, hyperpression thoracique, baisse du retour veineux, et hypotension artérielle). La majoration de la sédation est alors bien souvent nécessaire (cf. § Sédation)
- avec sa réserve d'oxygène suffisante,
- et un monitoring minimal de surveillance adapté au degré de pathologie du patient :
 - mesure de la pression artérielle (sanglante ou non)
 - ECG
 - SaO₂

Inévitablement, quand un patient de soins intensifs est transporté d'un lieu à un autre, il existe une perte d'efficacité ventilatoire, qui peut-être surmontée temporairement par l'addition d'une PEEP, et l'augmentation modérée de VT et de FR. Cependant, il faut éviter la survenue d'une

hyperventilation avec PEEP intrinsèque ou auto-PEEP, qui pourrait entraîner une baisse du retour veineux, et une hypotension. Outre le moniteur portable de mesure de la pression artérielle, et de la fréquence cardiaque, un moniteur de SaO₂, et/ou de la P_{ET}CO₂ doit permettre d'alerter l'équipe de transport sur une hypoventilation, une hypoxémie [Barach³].

Pirone et coll.[⁶⁹] à l'occasion d'un incident lors de ces phases de transfert, ont analysé les causes de dysfonctionnement possibles, et concluent à la nécessité de :

- standardisation des systèmes de transport d'oxygène,
- check-list avant transport pour ces patients ventilés, avant et après séance oxygénothérapie hyperbare,
- protocole écrit soulignant le rôle de chacun des intervenants dans ce transport, et le matériel nécessaire. Barach et coll.[³] confirment et insistent sur ce dernier point.

Ratzenhofer-Komenda et coll.[⁷¹], en étudiant les causes du shunt sous oxygénothérapie hyperbare, insistent sur les modifications successives de modes ventilatoires que ces patients subissent entre les soins intensifs et la chambre hyperbare. Ces différents types de ventilation même proches les uns des autres peuvent avoir un impact sur l'admission veineuse en fonction des territoires pulmonaires recrutés et "dé-recrutés" au cours de ces changements de respirateur.

III- L'installation dans la chambre hyperbare

C'est un moment essentiel du traitement, comme l'induction d'une anesthésie, qui évite une grande partie des complications ultérieures pendant la séance.

La check-list "respiratoire" du patient avant entrée dans la chambre hyperbare, est bien entendu artificielle, et ne peut être isolée de la check-list globale... Mais pour rester "dans le sujet" nous nous limiterons donc au bilan respiratoire détaillé dans le Tableau IV.

Tableau IV : Check-list du patient en ventilation contrôlée avant entrée en chambre hyperbare

| "CHECK-LIST RESPIRATOIRE" | | |
|--|---|--|
| | Recherche, vérification | Conséquence, attitude pratique |
| Radiographie pulmonaire (RP) | Recherche de : - pneumothorax - pneumomédiastin - emphysème sous-cutané Vérification de la bonne position du drain pleural éventuel | Transfert de l'aspiration vers une valve de Heimlich anti-retour. |
| Auscultation pulmonaire | Recherche de : - "wheezing" - sibilants | Pré-traitement par béta-agonistes, si: - bronchospasme - brûlures de voies aériennes |
| "Airway" | Vérification de la bonne position de la sonde d'IOT: - auscultation symétrique - distance carène- extrémité sonde sur dernière RP | Fixation solide de cette sonde d'IOT, pour prévenir toute extubation Prévention de tout coude sur la sonde |
| Ballonnet de la sonde d'intubation trachéale | Type de sonde: - à ballonnet classique - à ballonnet "basse pression" - à ballonnet en mousse auto-expansive | Aspiration de l'air Remplacement par un même volume de soluté salé isotonique Puis vérification de l'absence de fuite autour de la sonde d'intubation trachéale |
| Circuit respiratoire | Type de patient : - enfant ou adulte - poids "maigre" - pathologie pulmonaire pré-existante : estimation de la compliance thoraco-pulmonaire - encombrement trachéo-bronchique | - Utilisation d'un circuit respiratoire à compliance basse pour les patients : <ul style="list-style-type: none"> • dont les pressions de ventilation sont élevées, • ou dont le débit respiratoire est élevé - Vérification et fixation des connexions entrée et sortie des gaz - Aspiration trachéo-bronchique, avant de commencer le traitement |
| Respirateur | Vérification du bon fonctionnement du respirateur avant branchement | - si respirateur "time-cycled" : <ul style="list-style-type: none"> • ajuster le bouton pression/ débit pour obtenir le VT souhaité • ajuster le temps inspiratoire "I" à 1s • puis le temps expiratoire "E", pour une FR de 10 à 12c/min - si respirateur "volume-cycled", préciser: <ul style="list-style-type: none"> • VT • et FR |
| Ventilation pulmonaire | Vérification de l'adaptation au respirateur après branchement Mesure des paramètres ventilatoires de base : - VT, spirométrie - gazométrie initiale - PtcO ₂ , PtcCO ₂ - P _{ET} CO ₂ | Approfondissement de la sédation, ou anesthésie générale, avec ou sans curarisants. |

MONITORAGE de la VENTILATION MÉCANIQUE en CHAMBRE HYPERBARE

"Si les systèmes de contrôle du fonctionnement du respirateur sont en cours de développement, le monitoring respiratoire reste du domaine expérimental."

Souab A.^[112]

Rogatsky et coll.^[76] recensent 30 méthodes permettant de mesurer 50 paramètres physiques et biochimiques différents en hyperbarie.

Ces différents paramètres mesurés et mesurables en OHB sont définis dans le tableau I :

| Paramètres mesurés pendant OHB | | | |
|---|---|-------------------------|--|
| Hémodynamiques | Respiratoires | Bioélectriques | Autres |
| Fréquence cardiaque (FC) | VT | ECG | Température - centrale - tissulaires |
| Débit cardiaque | PO ₂ , PCO ₂ , pH, - dans veines - et artères | EEG | Glycémie |
| Volume d'éjection systolique (VES) | PO ₂ , PCO ₂ - dans différents tissus = PtiO ₂ , - trans-cutanée = PtcO ₂ , PtcCO ₂ - ou organes = PO ₂ | Potentiels évoqués (PE) | Concentrations intra-et extra-cellulaire en ions - dans différents tissus - ou organes |
| Pressions - artérielle - intra-cardiaques | HbCO | Potentiel DC | Pression intra-crânienne (P _c) |
| Débits sanguins - dans différents tissus - ou organes | Etat redox mitochondrial (NADH, cytochromes) | | |
| Indices de contractilité | | | |
| SvO ₂ | Saturation en O ₂ du sang veineux mêlé (SvO ₂) | | |

Tableau I : Paramètres mesurables en OHB
(d'après GG. Rogatsky⁷⁶)

Les paramètres qui nous intéressent dans cet article, et en particulier pour la ventilation mécanique, sont certains paramètres de la 2^{ème} colonne "Paramètres respiratoires" (tab. I).

Nous étudierons donc successivement, par ordre d'importance, et concernant la ventilation mécanique :

- le volume courant VT et la spirométrie
- la pression trans-cutanée en gaz carbonique PtcCO₂
- la capnographie (P_{ET}CO₂)
- la pression trans-cutanée en oxygène PtcO₂
- la gazométrie artérielle.

I- Volume courant VT et spirométrie

Weaver et coll.[⁹⁷⁻⁹⁸] recommandent la mesure continue du VT, avec un spiromètre calibré pour l'hyperbarie chez les patients ventilés en chambre hyperbare. Cette surveillance permet l'ajustement des paramètres ventilatoires, pour maintenir un VT et un volume minute satisfaisant.

La spirométrie mesure donc la ventilation par minute, improprement appelée "volume-minute" V_E , facteur déterminant de la ventilation alvéolaire VA, et de la PaCO₂.

$$V_E = VT * FR$$

La mesure de cette V_E , divisée par la fréquence respiratoire FR, permet de déterminer le VT, paramètre à afficher :

- directement sur les respirateurs volumétriques,
- ou indirectement sur les respirateurs "time-cycled", en modifiant le débit inspiratoire, les temps inspiratoire T_I et expiratoire T_E.

Cette mesure est généralement effectuée sur le circuit expiratoire, mécaniquement ou électroniquement.

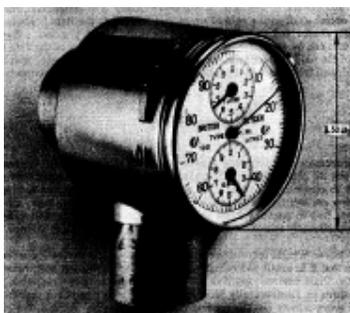
A- Spirométrie mécanique

1- spiromètre à soufflet

Certains respirateurs volumétriques sont équipés d'un soufflet dont l'amplitude varie comme le volume courant. C'est une mesure du VT délivré et expiré, qui reste néanmoins peu précise.

C'est le cas du soufflet qui équipe le Monaghan 225. Moon [⁵⁹] lui reproche de fonctionner de façon irrégulière.

2- spiromètre de Wright (British Oxygen Co.) et dérivés



A la pression atmosphérique, ce spiromètre a tendance à sous-estimer dans les valeurs basses, et à sur-estimer dans les valeurs hautes de volume courant; de plus la densité ou la viscosité des gaz peut modifier son fonctionnement [Whittle ¹⁰⁶].

En milieu hyperbare, dans une étude du respirateur PneuPac variant HB (cf. Annexe 2-PneuPac), et comparé avec le volume courant VT affiché d'un poumon test [Spittal ⁸³], les valeurs mesurées avaient une bonne corrélation entre elles, et restaient cliniquement acceptables (Tab. II).

| | PneuPAC control module rate (b.p.m.) | | | | | | |
|-------------|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------|------|
| | 31 | 24 | 20 | 17 | 14 | b | r |
| 1 atm abs | | | | | | | |
| LVPT (ml) | 350 (7.1) | 470 (18.1) | 590 (16.3) | 700 (22.3) | 850 (25.1) | 1.02 | 0.99 |
| WR (ml) | 330 (12.9) | 460 (10.1) | 590 (14.1) | 680 (26.2) | 930 (29.4) | | |
| 1.5 atm abs | | | | | | | |
| LVPT (ml) | 280 (10.1) | 400 (17.2) | 530 (12.3) | 640 (17.1) | 810 (23.3) | 1.05 | 0.99 |
| WR (ml) | 270 (6.7) | 400 (12.5) | 530 (10.4) | 640 (24.0) | 920 (37.0) | | |
| 2 atm abs | | | | | | | |
| LVPT (ml) | 250 (12.7) | 400 (9.6) | 530 (12.6) | 600 (10.3) | 830 (27.1) | 1.00 | 1.00 |
| WR (ml) | 240 (11.4) | 370 (16.3) | 490 (14.3) | 590 (15.2) | 880 (19.6) | | |
| 2.5 atm abs | | | | | | | |
| LVPT (ml) | 230 (10.1) | 320 (9.6) | 400 (14.4) | 480 (12.4) | 690 (18.1) | 0.99 | 1.0 |
| WR (ml) | 230 (9.4) | 320 (7.2) | 400 (10.7) | 440 (14.7) | 700 (20.4) | | |

Tableau II : Volume courant moyen comparé entre un poumon test (LVPT) et le spiromètre Wright (avec le respirateur PneuPac HB)

Pour des VT plus élevés, la surestimation n'est plus que de 3%. L'erreur augmente néanmoins jusqu'à 6% à 4 bar [Gibson²⁷, MacKay⁵⁰].

Il reste cependant fonctionnel jusqu'à 3 ATA [Kindwall³⁹]; au-delà, une correction appropriée en fonction de la pression ambiante et de la densité des gaz est nécessaire [Holcomb³³].

Plusieurs spiromètres dérivés du spiromètre de Wright ont été construits (fig. 1,2,3,4).



Fig. [1]



Fig. [2]

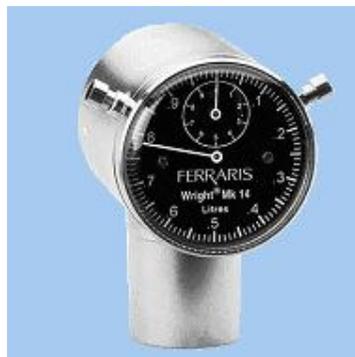


Fig. [3]



Fig. [4]

3- spiromètre Ohmeda RM 121 (**Datex-Ohmeda, Tewksbury, MA, E.U.**)
 Il est utilisé par Robert et coll.[⁷⁴] pour étudier le respirateur Oxylog Dräger.
 Aucun commentaire n'est fait sur la fiabilité de l'appareil (fig. 5).



Fig. [5] Spiromètre Ohmeda RM 121

5- spiromètre d'anesthésie Dräger (**Dräger, Lubeck, Allemagne**)
 Cet appareil est utilisé systématiquement par Germonpré et coll.[²⁶] dans leur chambre hyperbare avec le Bird Avian.
 Gibson et coll.[²⁷] ont comparé ce spiromètre avec le spiromètre de Wright en condition hyperbare. Le spiromètre Dräger est légèrement plus fiable.

6- spiromètre Boeringher #8800 (**Boeringher, Wynewood, PA, E.U.**)
 Il est utilisé par Weaver et coll.[¹⁰⁰] dans sa 2^{ème} étude du Sechrist 500A; il sous-estimait le VT au maximum de 6,1% à 2,5 ATA. Connaissant cette faible sous-estimation, ce spiromètre pouvait être considéré comme fiable.

| CHAMBER PRESSURE (ATA) | % ERROR |
|------------------------|---------|
| 0.85* | - 1.5 |
| 1.5 | + 2.4 |
| 2.0 | + 2.8 |
| 2.5 | + 6.1 |
| 2.9** | + 6.0 |

Fig.[6] Spiromètre Boeringher
 Erreur moyenne en fonction
 de la pression ambiante

TABLE I Calibration error of a Boehringher Spirometer over a range of hyperbaric pressures.
 The (+) symbol means that the Boehringher spirometer underestimates the actual tidal volume.
 * (Salt Lake City, Utah is at an altitude of 1341 m above sea level)
 ** (This is the chamber pressure limit at 1341 m)

B- Spirométrie électronique

1- moniteurs de volume Ohmeda (**Datex-Ohmeda, Tewksbury, MA, E.U.**)
 Youn et coll.[¹¹⁰] critique le respirateur Penlon Oxford, car il ne possède pas de moniteur de volumes, de fréquence respiratoire, ni d'alarme d'apnée ou de déconnexion. Ils ont eu l'idée de lui adapter le moniteur de volume Ohmeda, moniteur d'exploration pulmonaire de soins intensifs, à énergie électrique par batterie scellée, qui :

- permet de mesurer de façon précise VT, FR, VE, VEMS, Pic de débit expiratoire, et
- présente des alarmes de débits expirés (haute et basse).

Testé successivement dans une chambre hyperbare de recherche, puis dans une chambre hyperbare thérapeutique jusqu'à 6 bar(a), puis avec un poumon test, ce moniteur :

- mesure de façon adéquate les volumes et débits expiratoires,
- présente une alarme de déconnexion fonctionnelle,
- possède une autonomie (batterie) supérieures à 6 heures.

Ils proposent ainsi que ce moniteur respiratoire soit associé à l'utilisation du respirateur Penlon Oxford en chambre hyperbare.

Le modèle 5420 de type turbine de Datex-Ohmeda a une précision très correcte : pour des volumes courants VT de 0.25 à 2 l, et pour des pressions de 1 à 6 bar(a), l'erreur moyenne est de ± 0.022 l [Moon⁶¹].



2- spiromètre électronique du Servo 900D (Siemens-Elema, Suède)

Ce spiromètre a été comparé sur le Servo 900D avec un spiromètre mécanique calibré en atmosphère hyperbare. Il a été reconnu comme très fiable [Bouachour⁷], et permet donc de suivre en pression les variations de ventilation minute, et de modifier les paramètres de ventilation au cours de la séance.

II- Pression trans-cutanée en Gaz carbonique (PtcCO₂)

Estanyol et coll.[²²] montrent que la PtcCO₂ reflète la PaCO₂, et donc l'adéquation de la ventilation en condition hyperbare.

$$PtcCO_2 = PaCO_2$$

Comme pour la mesure de la PtcO₂, plusieurs arbres décisionnels ont été établis concernant la PtcCO₂, et permettant, entre autres, d'adapter au mieux la ventilation pulmonaire du patient sous ventilation mécanique.

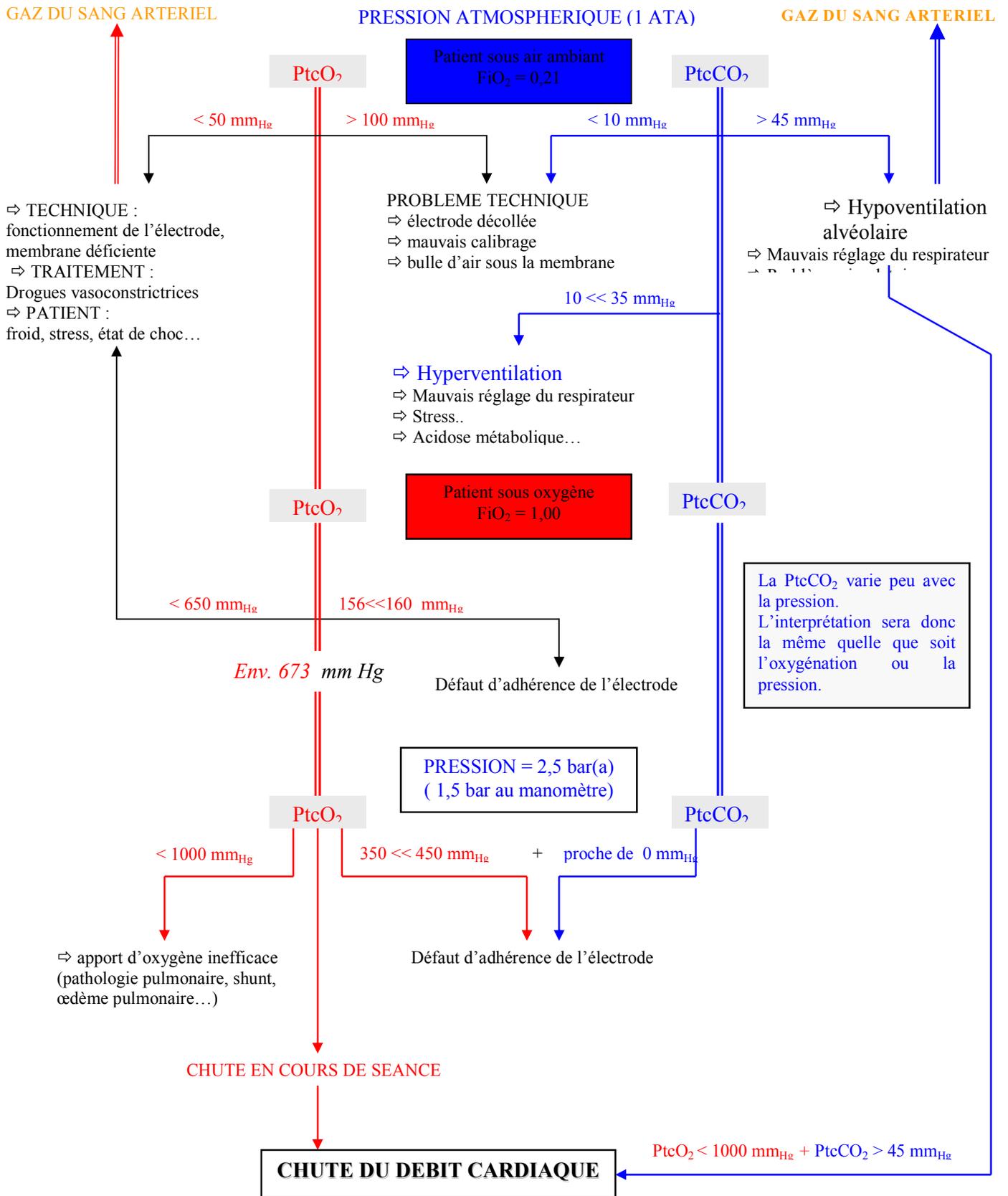
Wattel et coll.[⁹³⁻⁹⁴] confirment l'utilité de la surveillance de la PtcCO₂ chez les patients ventilés. Mais l'interprétation des chiffres de PtcCO₂ nécessite de disposer de 2 autres paramètres au minimum :

- la mesure simultanée de la PtcO₂
- la pression artérielle.

Il devient alors possible de dissocier ce qui revient au facteur circulatoire et au facteur ventilatoire respectivement, et permet d'entreprendre une attitude thérapeutique raisonnée :

- aspirations trachéo-bronchiques,
- modifications des réglages du respirateur,
- approfondissement de la sédation,
- remplissage vasculaire,
- utilisation de drogues tonocardiaques et/ou vasoconstrictrices.

Là encore, la chambre hyperbare n'est que le prolongement ou une extension du service de réanimation...



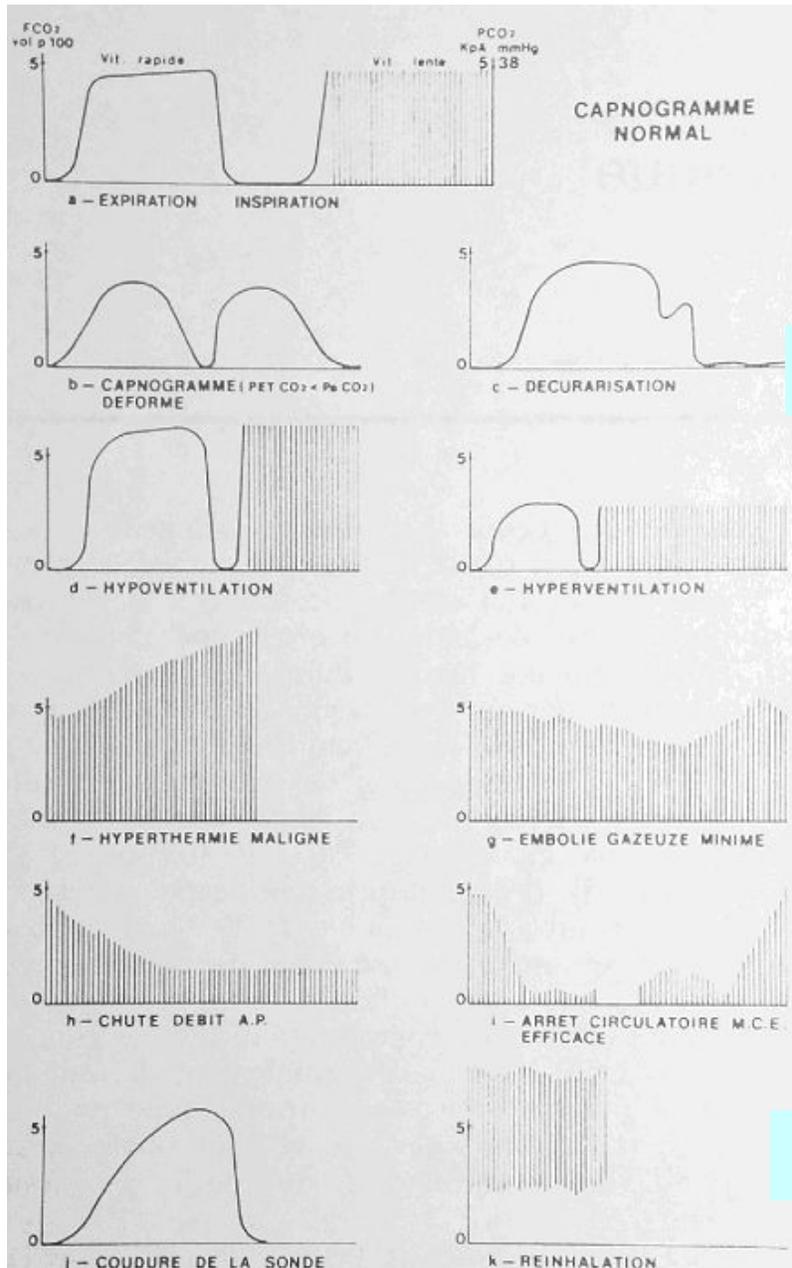
Arbre décisionnel en fonction des PtcO₂, et PtcCO₂ en OHB (d'après Caron O.¹³)

III- Capnographie ($P_{ET}CO_2$)

Une autre mesure non invasive de la ventilation est représentée par la capnométrie, ou mieux la capnographie. Elle peut être utilisée en chambre hyperbare multiplace [Mielke ⁵⁷].

Utilisée en anesthésie depuis environ 15 ans, la concentration en CO_2 dans les gaz expirés est mesurée par absorption du rayonnement infra-rouge, et visualisée de façon continue par une courbe de capnographie, et exprimée soit en Concentration (vol.%), soit en Pression partielle (en $mmHg$). Mesurée en fin d'expiration, elle s'exprime habituellement par la $P_{ET}CO_2$.

La courbe de capnographie ne renseigne pas seulement sur l'activité métabolique, circulatoire, et ventilatoire du patient mais aussi sur la présence intra-trachéale de la sonde d'intubation, la survenue d'un débranchement, le fonctionnement du système anesthésique. (fig. 7, 8)



Capnography vs. Capnometry

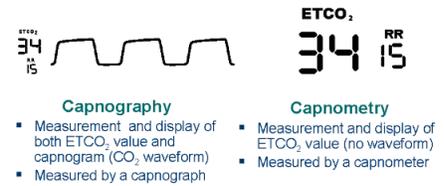


Fig. [7] Capnogramme normal et capnométrie

Fig. [8]: Capnogrammes caractéristiques

Cette technique peut être adaptée à l'hyperbarie **avec la réserve suivante** : la compression (à **2.8 bar(a)**) entraîne une diminution significative de cette $P_{ET}CO_2$ [Mielke ⁵⁷].

A- $P_{ET}CO_2$ versus $PaCO_2$

Eskelson et coll.^[21] ont mesuré la fiabilité de la mesure de cette $P_{ET}CO_2$ en chambre hyperbare monoplace, chez des sujets en ventilation spontanée, et chez des sujets sous ventilation contrôlée, avec mesure simultanée de la PaO_2 . Les résultats sont les suivants :

- très bonne corrélation entre $P_{ET}CO_2$ et $PaCO_2$ à ± 1 mmHg, à la pression atmosphérique,
- $P_{ET}CO_2$ diminue de 5 à 12 mmHg en condition hyperbare jusqu'à 2.4 bar(a), par rapport à la $PaCO_2$.

Arterial-End Tidal CO_2 Gradient



■ In healthy lungs the normal a-ADCO₂ gradient is 2-5 mmHg



■ In diseased lungs, the gradient will increase due to ventilation/perfusion mismatch

Fig. [9] Gradient artériolo-alvéolaire en CO_2

Les auteurs concluent : "La $P_{ET}CO_2$ peut être utilisée pour suivre la $PaCO_2$ des patients ventilés (et peut servir de moniteur d'apnée chez les patients sous sédation en VS)".

De même HJ. Mummery^[62] a comparé la $P_{ET}CO_2$ et la $PaCO_2$, en plongée simulée lors du repos et de l'exercice jusqu'à 2,8 ATA.

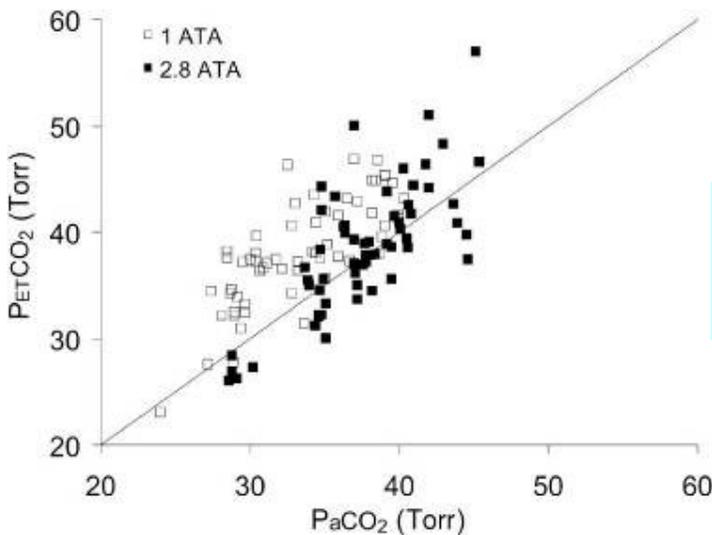


Fig. [10] $P_{ET}CO_2$ versus $PaCO_2$ en plongée simulée à 1 ATA et 2,8 ATA

□ à 1 ATA
■ à 2,8 ATA

(d'après HJ. Mummery⁶²)

B- $P_{ET}CO_2$ versus $P_{tc}CO_2$

En appliquant le facteur de correction suivant, selon la loi de Boyle-Mariotte, à la $P_{ET}CO_2$ mesurée, Estanyol et coll.^[22] remarquent qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre la $P_{tc}CO_2$ et la $P_{ET}CO_2$

$$P_{ET}CO_{2\text{corr.}} = P_{CH} / P_B * P_{ET}CO_{2\text{mes.}}$$

Ils concluent : "Les Pressions partielles de CO_2 mesurées par capnographie et monitoring transcutané ne sont pas significativement différentes quand les valeurs de $P_{ET}CO_2$ sont corrigées en fonction de la pression ambiante de travail".

IV- Pression tissulaire en Oxygène ($P_{ti}O_2$)

La mesure de la PO_2 peut se faire directement dans les tissus en utilisant une électrode polarographique implantable. C'est la méthode référence ("the gold standard"), mais c'est une méthode invasive.

La méthode la plus fiable dans l'expérience de J. Desola [17], de confirmer (une fuite dans le masque de respiration chez le patient conscient et) l'insuffisance de la ventilation mécanique est l'implantation d'une électrode infra-claviculaire de Clark (zone de référence) pour mesure de l'oxygénation tissulaire.

IV- Pression trans-cutanée en Oxygène ($P_{tc}O_2$)

La $P_{tc}O_2$ n'est qu'un reflet très indirect de la ventilation mécanique en hyperbarie [90]. **En effet, la $P_{tc}O_2$ peut être modifiée par de multiples facteurs :**

- 1- les inégalités des rapports ventilation-perfusion chez le patient en décubitus dorsal, intubé, ventilé, voire curarisé.
- 2- l'hémodynamique du système macro-circulatoire
- 3- l'état micro-circulatoire, avec en particulier l'absence du nettoyage de la peau sous l'électrode, l'épaisseur de la couche cornée, la possibilité d'un œdème dermique.

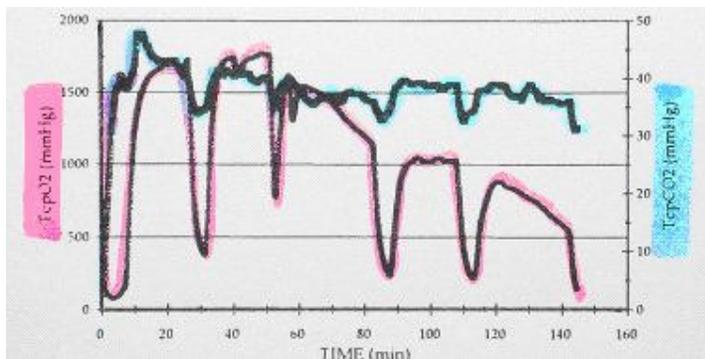


Fig. [11] Evolution de $P_{tc}O_2$ et de la $P_{tc}CO_2$ pendant une séance d'OHb (table USNavy 5).

- la $P_{tc}CO_2$ diminue peu avec la P. ambiante,
- la $P_{tc}O_2$ varie avec la pression ambiante et les pauses à l'air.

(d'après Estroval[22])

V- Gazométrie artérielle : PaO_2 , $PaCO_2$, pH

A- Pour le pH, la $PaCO_2$, les bicarbonates HCO_3^-

Les valeurs sont semblables à 1 ATA comme en hyperbarie thérapeutique. Ces paramètres peuvent être mesurés de façon fiable par un analyseur de gaz sanguin sur des échantillons collectés dans la chambre hyperbare et transférés à l'extérieur par un sas.

B- Quant à la PaO_2 , elle pose le problème de la validité de sa mesure après décompression. Faut-il la mesurer en hyperbarie donc à l'intérieur d'une chambre hyperbare, ou après décompression à l'extérieur, dans quel délai, et sous quelles conditions?

Weaver et coll.[¹⁰¹⁻¹⁰²⁻¹⁰³] ont particulièrement étudié de 1990 à 1994 cette mesure en C-HB monoplace. Ils ont rapporté une méthode de mesure de la PaO₂ sur des échantillons décompressés, avec mesure immédiate (avec analyseur à proximité), avec un protocole de calibrage. Les valeurs de PaO₂ peuvent être déterminées à partir du principe d'un quotient artériolo-alvéolaire constant (P_aO₂/P_AO₂ ratio) comme décrit par Gilbert et coll.[²⁸]. Ces derniers ont démontré que pour des F_IO₂ de 0.21 à 1.0, le quotient (artériolo-alvéolaire) de la PaO₂ mesurée rapporté à la P_AO₂ calculée, était relativement constant. Ce principe associé à la mesure de la PaO₂ à la pression atmosphérique, peut être étendu à la prédiction de la P_aO₂ en hyperbarie. (fig. 12)

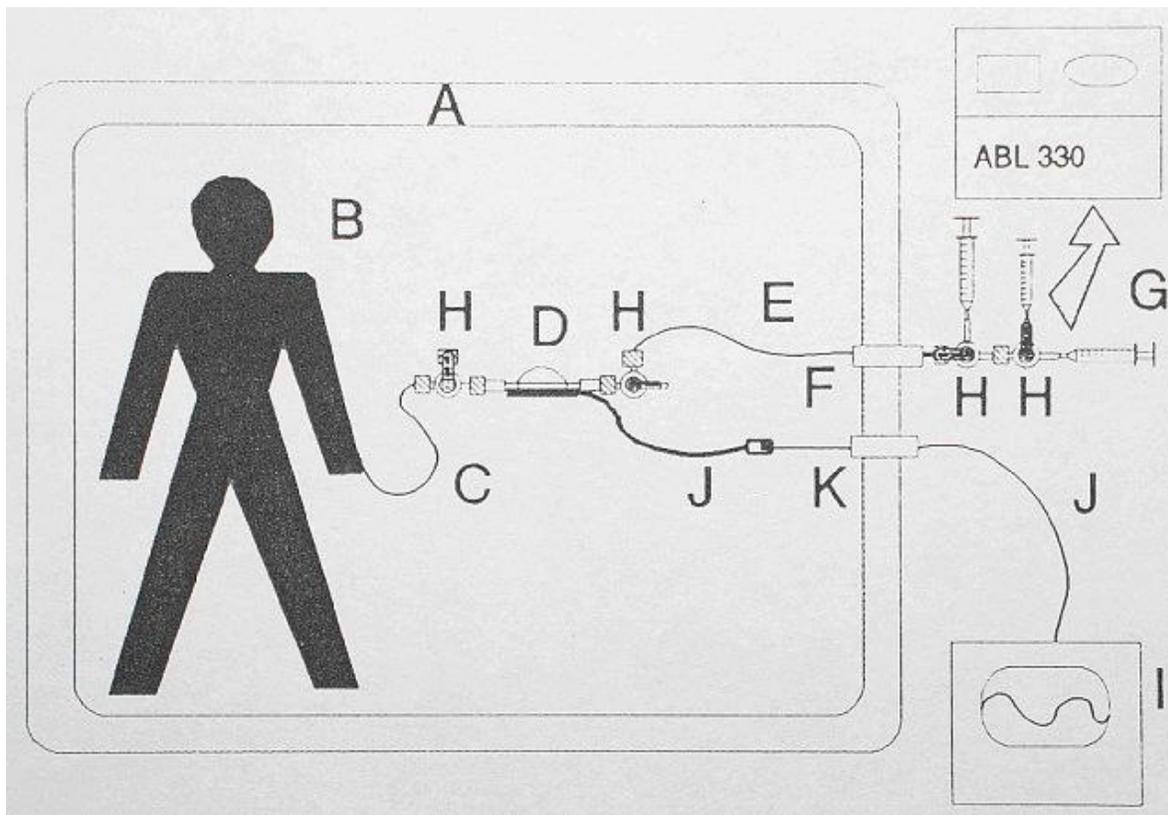


Fig. [12] : Prélèvement et mesure des Gaz du sang artériel en chambre hyperbare monoplace.

A- Chambre hyperbare monoplace
 B- Patient
 C- Tête de pression
 D- Transducteur
 E- Catheter fin

G- Seringues de purge et de prélèvement
 H- 2 Robinets 3 voies en série
 I- Moniteur de pression artérielle
 J- Cable électrique
 K- Tape électrique

Van Bredda et coll.[⁸⁹] observent dans un abstract récent (2004) que la décompression n'altère pas significativement les valeurs de PaO₂ mesurée par le Radiometer Pacific Pty Ltd. ABL77. Conservé à une température de 0°C, la PaO₂ des échantillons ne chute pas significativement avant 4h. Ainsi, une PaO₂ basse ne doit pas être considérée comme un artefact de mesure du laboratoire, mais doit être considérée comme vraie et nécessite de prendre les mesures thérapeutiques correctrices adaptées.

Pour Moon et coll.[⁶¹], si le sang prélevé à l'intérieur est décompressé à un 1 ATA, l'échantillon en sursaturation ambiante va se décompresser rapidement avec une chute très

rapide de la PaO₂. Une mesure fiable de la PaO₂ nécessite donc un analyseur calibré et opérant à la pression ambiante de la chambre hyperbare. Un tel instrument nécessite une expertise technique très spécialisée et ne peut être employé de façon courante en pratique clinique.

Ces mêmes auteurs [61] ont décrit une méthode de prédiction de la PaO₂ en hyperbarie à partir de la PaO₂ atmosphérique, et basée sur l'équation de l'air alvéolaire. Cette équation du gaz alvéolaire est un élément essentiel de la compréhension de la physiologie respiratoire; elle permet de calculer la P_AO₂ :

$$P_{A}O_2 = [(P_B - P_{H_2O}) * F_{I}O_2] - P_{A}CO_2 * [F_{I}O_2 + (1 - F_{I}O_2)/R]$$

où :

P_B = P. ambiante

P_{H₂O} = P. saturée en vapeur d'eau

P_ACO₂ = P_aCO₂

F_IO₂ = fraction inspirée en O₂

R = V_{O₂}/V_{CO₂} = quotient respiratoire (=0.8)

Le quotient artériolo-alvéolaire Q(a/A) peut être calculé à partir d'une mesure des gaz du sang artériel à pression atmosphérique. En hyperbarie, ce quotient peut être considéré comme constant, car l'hémoglobine est complètement saturée en O₂.

La P_aO₂ prévisible de Moon peut alors être calculée à partir de l'équation suivante :

$$P_{a}O_2 \text{ (prévisible)} = Q(a/A) * [(760 * P_{ATA} * F_{I}O_2) - P_{H_2O}) - P_{a}CO_2]$$

où :

P_{ATA} = P. ambiante absolue (en atm.)

P_{H₂O} = P. saturée en vapeur d'eau (= 47mmHg)

P_aCO₂ estimée ou mesurée

F_IO₂ = Fraction inspirée en O₂

En fait cette équation n'est valable que chez les patients indemnes de pathologies pulmonaires, et dont le Q(a/A) est supérieur à 0.75. Weaver et coll.[102] ont montré à l'inverse que chez 24 patients ventilés avec pathologie pulmonaire (Q(a/A) < 0.75), cette PaO₂ est plus élevée que la PaO₂ prévisible de l'équation de Moon, mais plus basse que la PaO₂ de patients à poumons normaux. (fig.13)

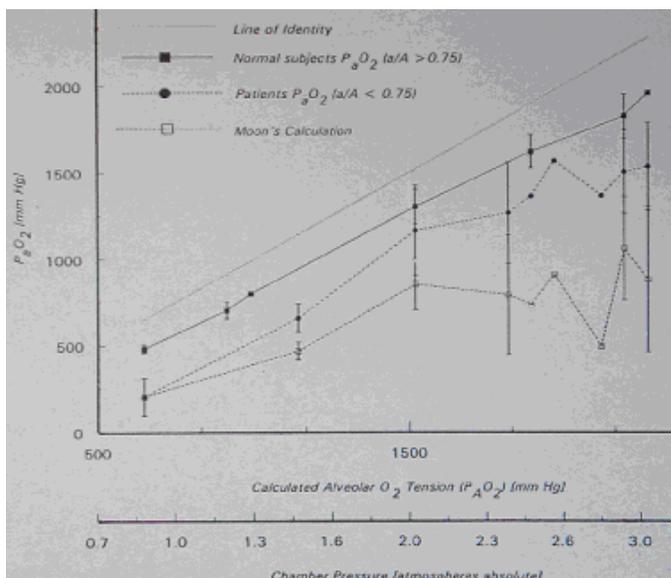
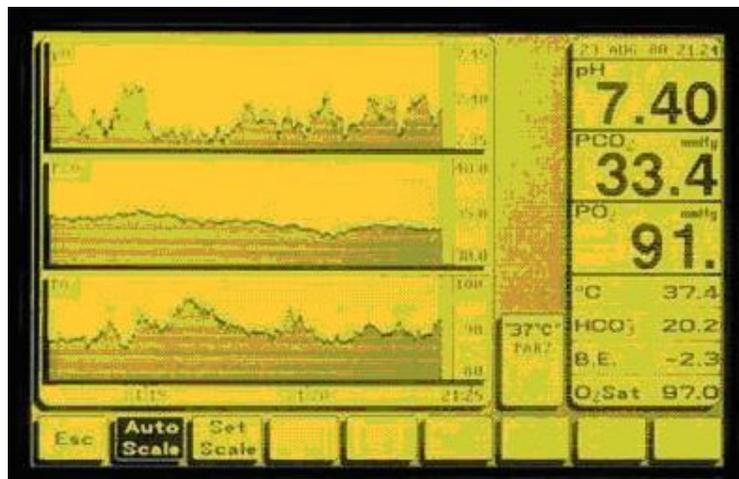


Fig. [13] PaO₂ contre PO₂ calculée selon l'équation de Moon,

- sujets sans pathologie pulmonaire
- patients avec atteinte pulmonaire [Q(a/A) < 0.75]
- PaO₂ prévisible selon équation de Moon

Le futur est peut-être à la mesure continue des gaz du sang artériel... Un seul appareil actuellement disponible sur le marché permet la mesure en continu, in-vivo, des gaz du sang artériel et de la température : le Paratrend 7+ (Diametrics Medical Inc., St Paul, MN, USA). Cet appareil de monitoring autorise un calibrage automatique du capteur. La cellule, simple, compacte (0,5mm) multi-paramètres, combine :

- une technologie électro-chimique (électrode de Clark pour l'appareil de 1^{ère} génération), ou par fluorescence optique (pour l'appareil de 2^{ème} génération) pour la mesure de la PO₂,
- une technologie par fibre optique pour la mesure du pH et de la PCO₂ (Clutton-Brock, 1994*; Hoffman, 1996*). Des modifications de la concentration en ions H⁺ produisent des changements de couleur du rouge phénol, détectés par ces éléments. Le capteur de CO₂ comporte une barrière semi-perméable aux ions, excluant le mouvement des ions H⁺, mais permettant le transfert des ions CO₂, ce qui modifie le pH local, et produit un changement de couleur du rouge phénol.
- un thermocouple pour la température, permettant la correction en temps réel des valeurs ci-dessus.



L'utilisation et l'expérimentation en C-HB de cet appareil, à notre connaissance, n'ont pas encore été publiées...

COMPLICATIONS de la VENTILATION MÉCANIQUE en CHAMBRE HYPERBARE

Une série pédiatrique [Keenan ³⁶] énonce les complications suivantes durant le transport et la séance d'oxygénothérapie hyperbare chez des enfants ventilés (tab. I):

| Complications | n = 32 | % |
|---|--------|----|
| Hypotension | 20 | 62 |
| Bronchospasme | 11 | 34 |
| Hypoxémie | 2 | 6 |
| Hémotympan | 4 | 12 |
| Extubation, ou déplacement de la sonde d'intubation | 1 | 3 |
| Convulsions | 1 | 3 |

Tableau I : Complications chez enfants ventilés pour OHB (d'après Keenan HT.³⁶)

On envisagera successivement :

I- La désadaptation du respirateur

Elle est fréquente lors des changements de respirateurs, en particulier à l'installation dans le caisson, mais peut survenir en cours de séance, avec respiration irrégulière, augmentation brutale des pressions d'insufflation, volumes courants anarchiques.

En fait, cette désadaptation du respirateur est souvent le premier signe, qui doit faire rechercher toutes les complications suivantes, avant d'augmenter la sédation.

II- L'extubation

L'extubation est en général évidente, avec fuite aérienne laryngée, et baisse paradoxale des pressions d'insufflation. Dans la série pédiatrique de Keenan [³⁶], cette extubation (3%) survient surtout pendant le transport du patient entre la chambre de réanimation et le caisson hyperbare.

L'équivalent est la fuite du ballonnet de la sonde trachéale. Plusieurs attitudes s'opposent :

- nombreux sont ceux qui remplacent l'air du ballonnet par un soluté salé physiologique avant de commencer la séance d'OHB. En général, l'étanchéité doit être vérifiée avant la compression. Si le ballonnet est percé, il faut bien entendu changer la sonde d'intubation. Il faut donc prévoir le matériel nécessaire de ré-intubation à l'intérieur de la chambre hyperbare ou transférable rapidement par un sas.
- certains gardent l'air du ballonnet trachéal, mais bien sur, il doit être surveillé attentivement pendant la compression et la décompression. Des moyens spécifiques de surveillance existent. La pression du ballonnet peut être surveillée par un baromètre anaéroïde; de l'air peut être ajouté ou retiré selon la pression mesurée (fig.1). Le respirateur français RCH Lama est équipé d'un système de pressurisation automatique du ballonnet, qui fournit une pression constante quelle que soit la pression ambiante. Cette

pressurisation se règle sur la plaque arrière en fonction de la sonde utilisée, au moyen d'une vis (augmentation de la pression en tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre).

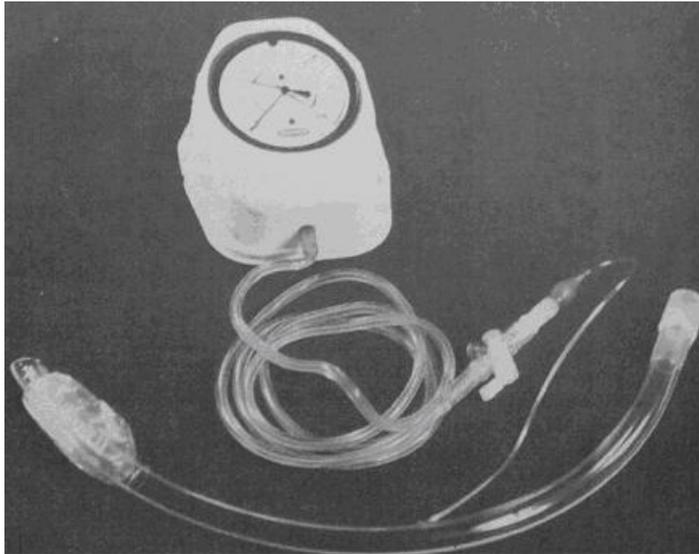


Fig. 1
Sonde d'intubation trachéale avec ballonnet, et

- une 3^{ème} technique existe : l'utilisation d'une sonde trachéale avec ballonnet à basse pression en mousse. Le ballonnet est aspiré avant insertion de la sonde, puis la seringue est ôtée; l'expansion du ballonnet s'effectue alors passivement (fig.3).

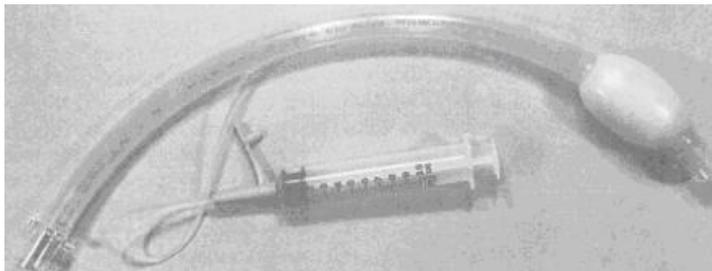


Fig. 2
Sonde d'intubation trachéale avec ballonnet à basse pression en mousse.

III- Un déplacement en aval de la sonde d'intubation

Cette complication peut se rencontrer :

- en particulier chez le jeune enfant, avec ventilation uni-pulmonaire; outre la désadaptation du respirateur, on observe l'augmentation des pressions d'insufflation, et une ventilation unilatérale.
- mais aussi chez l'adulte : Weaver et coll. dans un "Case Report" de 1994 [103] expliquent le cas d'un adulte ventilé mécaniquement, et traité en chambre hyperbare monoplace à 2.5 ATA en O₂ pur, avec PEEP à 5cmH₂O, chez lequel, malgré l'absence de complications clinique évidente, la mesure de la PaO₂ systématique a montré une PaO₂ beaucoup plus basse (=315mmHg) que les valeurs prévisibles (hypoxémie relative). Le contrôle gazométrique confirmant l'hypoxémie, le patient a été extrait de la chambre hyperbare après décompression urgente. L'examen clinique et radiologique a permis d'éliminer une embolie pulmonaire, et un pneumothorax, mais a révélé une intubation sélective, avec atelectasie segmentaire. A cette occasion, les auteurs expliquent la physiopathologie du shunt vrai et de l'effet shunt (cf. § IV), envisage les diverses étiologies, et conclue à l'utilité de la gazométrie artérielle chez les patients ventilés artificiellement.

IV- Une hypoxémie relative

On parle :

- d'*hypoxie* lorsque la quantité d'oxygène délivrée aux tissus est insuffisante par rapport aux besoins cellulaires. Celle-ci peut s'accompagner d'une hypoxémie ou non.
- d'*hypoxémie* lorsque la quantité d'oxygène transportée dans le sang est diminuée. Cela se traduit biologiquement par une baisse de la PaO₂.
- d'*hypoxémie relative* en OHB quand on constate une augmentation moindre de la PaO₂ par rapport à la PaO₂ prévisible, ou bien chute progressive de la PtcO₂ et maintien d'une PtcCO₂ constante.

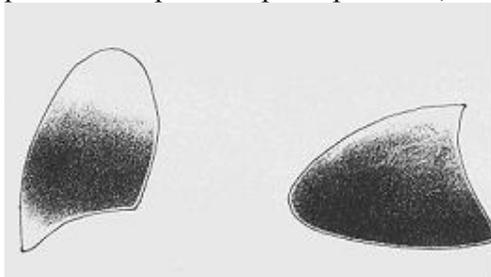
LK. Weaver [29] énumère les étiologies possibles d'une hypoxémie pendant OHB. Plus souvent hypoxémie relative qu'hypoxémie vraie, le mécanisme physio-pathologique est cependant loin d'être toujours évident :

1- La toxicité pulmonaire de l'oxygène, avec hypoxie secondaire, ne semble pas en cause pour des administrations intermittentes, relativement courtes, même répétées, comme pratiquées habituellement en chambre hyperbare.

2- Le shunt vrai Q_S (**circulation bronchique, veines de Thébésius**) est une cause importante d'hypoxémie; il est chez le sujet normal de 3 à 5% du débit cardiaque Q_C. Les autres étiologies sont essentiellement les shunts intracardiaques dont le foramen ovale perméable.

La ventilation contrôlée sous anesthésie occupe une place à part : du fait de l'existence de zones atelectasiées dans les zones déclives, ce shunt vrai est augmenté, mais reste en général inférieur à 10%. C'est un phénomène bien connu et très débattu en anesthésie concernant la pré-oxygénation pour dénitrogénéation à l'induction d'une anesthésie. Des zones pulmonaires se collabent complètement pendant l'administration de fortes "doses d'oxygène", même pendant de courtes périodes. Cette manœuvre augmente les micro-atelectasies après l'induction, et augmente le shunt. Elles sont facilement réversibles par de simples manœuvres de recrutement alvéolaire : pression trachéale >30 cm_{H2O} pendant 15 s, et adjonction d'une PEEP à 5-10 cm_{H2O} pendant l'entretien d'une anesthésie générale avec F_IO₂ élevée. Ce shunt vrai n'est pas augmenté chez le bronchopathe chronique. Mais chez l'obèse et la parturiente ou dans certaines positions (décubitus ventral ou latéral), ce shunt peut dépasser 20%.

3- L'effet shunt **correspond à des inégalités de distribution des rapports Ventilation/Perfusion V_A/Q_C**. En position assise et en ventilation spontanée, les bases sont mieux ventilées que les sommets, et la perfusion est en relation avec la gravité; les 2 gradients allant dans le même sens, la distribution des V_A/Q_C est relativement homogène. Sous anesthésie, en ventilation contrôlée, la distribution de la ventilation est homogène, mais celle de la perfusion suit toujours la gravité; il en résulte une majoration de l'hétérogénéité de la distribution des rapports V_A/Q_C. Ces inégalités sont la cause principale d'hypoxémie pendant la période peri-opératoire, sous anesthésie générale en ventilation contrôlée.



Ces 2 derniers facteurs peuvent donc se conjuguer pour favoriser une hypoxémie relative en OHB. Pour Germonpré et coll.^[26], ce phénomène se rencontre de façon prédominante chez l'enfant ou le nourrisson. Ils utilisent pour cette raison, une PEEP d'environ 5cm_{H2O} :

- de façon systématique, chez les enfants
- de façon raisonnée chez l'adulte quand ce phénomène est suspecté.

Ratzenhofer-Komenda et coll.^[24] confirme en 2003 cette augmentation du shunt et/ou de l'effet shunt chez des patients ventilés en hyperbarie à 2.2 ATA. Bien plus, ces auteurs ont remarqué que ce shunt persiste après la séance et serait la cause de l'hypoxémie secondaire déjà observée chez ces patients ventilés [fig. 3]. Weaver avait déjà remarqué que certains patients, et en particulier ceux présentant un état septique, nécessitaient des F_IO₂ plus élevées après la séance d'OHB. La tendance à la baisse du shunt, 2 heures après la séance, suggère néanmoins sa réversibilité.

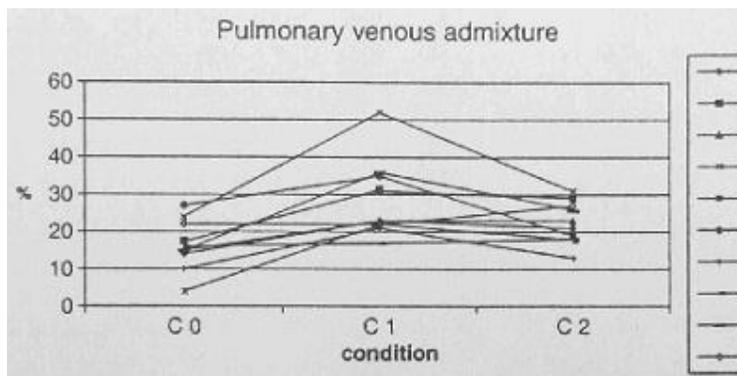


Fig. [3] Admission veineuse avant et après Oxygénothérapie hyperbare

V- Une hypercapnie

C'est le problème majeur chez les patients ventilés en C-HB. Nous avons vu que l'hypercapnie augmente l'apparition des symptômes de toxicité de l'oxygène, et donc le risques de convulsions hyperoxiques.

Le phénomène initial est l'hypoventilation alvéolaire. La spirométrie, avec un appareil calibré, est le premier élément de surveillance. Il en existe d'autres (cf.§ "Monitoring"). Dans le doute, une gazométrie artérielle doit être demandée, et une augmentation du débit ventilatoire doit être effectuée avant de connaître les résultats de cette gazométrie.

Plusieurs causes peuvent expliquer l'hypercapnie en oxygénothérapie hyperbare :

1- La baisse du volume courant VT, à la compression

Elle survient, nous l'avons vu plus haut (cf.§ "Problèmes techniques") avec tous les respirateurs pneumatiques "time-cycled".

Elle peut exister aussi avec les respirateurs et "pressure-cycled" dès que les résistances aériennes augmentent.

Elle est possible enfin avec les respirateurs "volume-cycled", quand les limites paramétrables de correction du respirateur sont atteintes.

2- L'insuffisance du débit inspiratoire V_I lors de la compression.

Germonpré et coll.^[26] ont noté ce phénomène avec le Bird Avian. Ce n'est pas du à une réduction de la pression de fonction, qui en général est suffisante (entre 5 et 10 bar), mais comme on l'a déjà évoqué, à l'augmentation de la densité du gaz à la sortie du respirateur

vers le circuit inspiratoire. Même en ajustant le volume courant VT sur le respirateur pour maintenir un volume minute V_E suffisant, cet effet physique entraîne une prolongation de la phase inspiratoire T_I , la modification du rapport I/E, et les effets délétères sur la ventilation.

Ainsi chez les enfants, surtout les nourrissons et nouveau-nés, dont la fréquence respiratoire de base est plus élevée, ce rapport peut devenir inacceptable et arriver à un point où ce respirateur se met en alarme et demeure avec un rapport I/E égal à 1/1. Il devient alors nécessaire d'augmenter le débit inspiratoire sur le respirateur, ce qui, chez l'adulte (de 50 à 60l/min) n'augmente peu ou pas les pressions d'insufflation, mais devient proportionnellement important chez le jeune enfant (de 12 à 16 l/min)

3- L'augmentation de l'espace mort ventilatoire

Bien que les circuits respiratoires utilisés chez les petits enfants et les nourrissons soient d'un petit volume par rapport à ceux utilisés chez l'adulte, le volume d'espace mort peut être souvent sous-estimé.

D'où l'intérêt majeur de bien connaître "son respirateur", d'en connaître ses limites, ses dysfonctionnements possibles, de les prévoir, et d'adapter les paramètres ventilatoires en conséquence.

VI- Un bronchospasme

Cette complication semble particulièrement fréquente en pédiatrie: jusqu'à 34 % dans la série de Keenan et coll.[³⁶]. Un wheezing persiste bien après la fin de la séance hyperbare.

Le diagnostic est évoqué devant l'existence d'un "wheezing", l'augmentation du pic de pression d'insufflation malgré une pression ambiante stable. Le wheezing n'est pas un signe clinique facile à ausculter dans l'ambiance bruyante d'une chambre hyperbare, et peut nécessiter l'arrêt temporaire de la ventilation-aération de la chambre.

Il survient surtout chez des sujets prédisposés : asthme préexistant, mais aussi sans facteurs favorisants évidents...

Le traitement fait appel aux médicaments bêta-agonistes

- albuterol en aérosol,
- voire terbutaline par voie intraveineuse, dans les formes sévères

VII- L'hypotension

Ce signe est d'autant plus troublant que généralement on observe une légère hypertension artérielle, qui conduit même parfois à diminuer les tonicardiaques et vasoconstricteurs. La survenue de cette hypotension est :

- souvent indépendante des phases de compression ou décompression
- le plus souvent secondaire à la pathologie sous-jacente :
 - ☐ sepsis
 - ☐ dépression myocardique de l'intoxication au CO
 - ☐ atteinte neurologique centrale de l'intoxication au CO
- à traiter par :
 - ☐ remplissage vasculaire
 - ☐ et/ou drogues vaso-actives et/ou inotropes positives

Mais parfois cette hypotension peut être secondaire à la ventilation mécanique : si l'addition d'une PEEP est parfois rendue nécessaire (cf.§ "Complications" IV-hypoxie), elle n'est pas toujours bénéfique. Chez les patients dont les pressions de remplissage du ventricule droit (POD, P_{TDVD}) sont basses,

par exemple en cas de sepsis, le retour veineux vers les cavités droites peut être diminué si les pressions intra-thoraciques sont trop élevées. On observe alors les signes cliniques suivants :

- **tachycardie**
- **hypotension**

Le bilan hémodynamique se justifierait, mais est techniquement difficile dans le contexte de la chambre hyperbare, même multiplace... Une réduction progressive de la PEEP doit être envisagée, avant toute augmentation du remplissage ou administration des drogues vaso-actives.

VIII- Un œdème pulmonaire

Weaver et coll.^[98] dans un "Selected Report" de 2001, rapporte 3 cas d'œdème pulmonaire sous OHB (chez des patients non ventilés) et en analyse la physiopathologie :

1- Des augmentations de la pression capillaire pulmonaire PCP ont été décrites chez des patients NYHA III et IV respirant de fortes concentrations d'oxygène normobare. De la même façon, l'augmentation des résistances vasculaires systémiques RVS, et la réduction du débit cardiaque sous OHB peuvent contribuer chez des patients présentant une altération de la contractilité VG (diminution de la FE_{VG}) à l'aggravation de cette fonction.

2- La toxicité des Radicaux Libres de l'Oxygène (RLO) pourrait atteindre le myocarde, en particulier à 2 niveaux cellulaires :

- au niveau du transport intracellulaire du calcium,
- au niveau de l'Endothelium Derived Relaxing Factor (EDRF) ou Oxyde nitrique (NO)

3- L'inadéquation entre le débit du VD (Q_{VD}) et le débit du VG (Q_{VG}), avec $Q_{VD} > Q_{VG}$, sous l'effet des modifications du système sympathique en OHB : l'augmentation du tonus sympathique entraîne une augmentation des RVS, et de la post-charge, et une baisse de la compliance VG, facteurs d'augmentation de la PCP, et d'œdème pulmonaire.

4- La position en décubitus dorsal est connue pour majorer la PCP, et peut être un facteur favorisant supplémentaire dans les chambres monoplaces, et pour les patients ventilés en chambre multiplace.

Les auteurs concluent que, bien qu'il soit impossible de déterminer chez qui, et quand, l'œdème pulmonaire peut survenir, le rapport risque/bénéfice de l'OHB doit être apprécié chez l'insuffisant cardiaque stade NYHA III et IV.

IX- Le pneumothorax sous pression ou suffoquant

C'est une autre complication majeure de la ventilation contrôlée en hyperbarie. Il met le pronostic vital en jeu quand le pneumothorax devient sous tension. Comme le bronchospasme, il est de diagnostic difficile dans l'enceinte bruyante d'un caisson hyperbare :

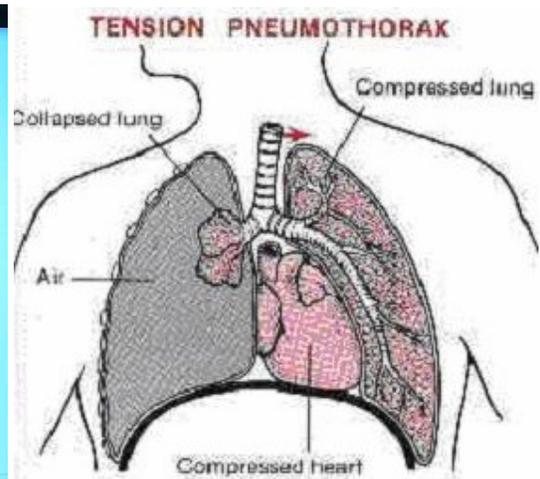
- désadaptation du respirateur
- déviation trachéale
- asymétrie de ventilation
- déviation des bruits du cœur
- distension veineuse cervicale
- cyanose
- hypotension voire collapsus circulatoire brutal,
- hypoxémie relative.

Les facteurs prédisposants au pneumothorax sont [Holcomb³³]:

- la ventilation mécanique,
- les broncho-pneumopathies chroniques obstructives,
- le traumatisme thoracique (dans le cadre d'un polytraumatisme par exemple)

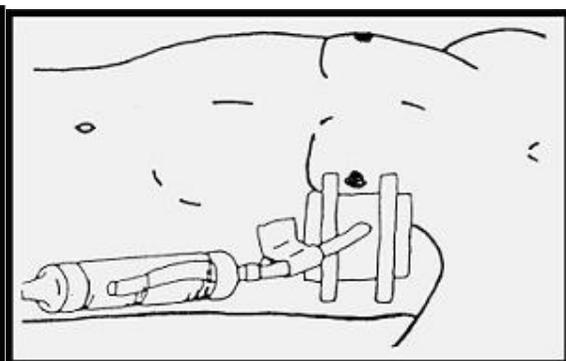
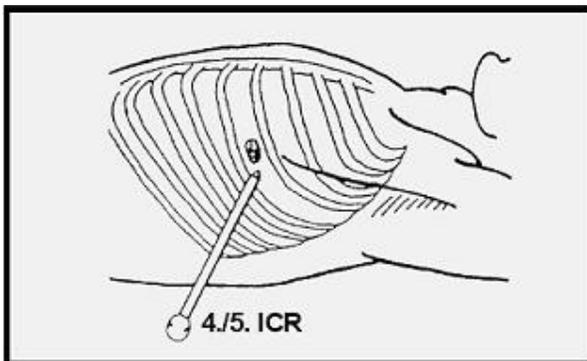
- une pneumopathie infectieuse nécrosante,
- un antécédent de pneumothorax.

Enfin et surtout, pour des raisons physiques évidentes, il survient le plus souvent à la décompression.



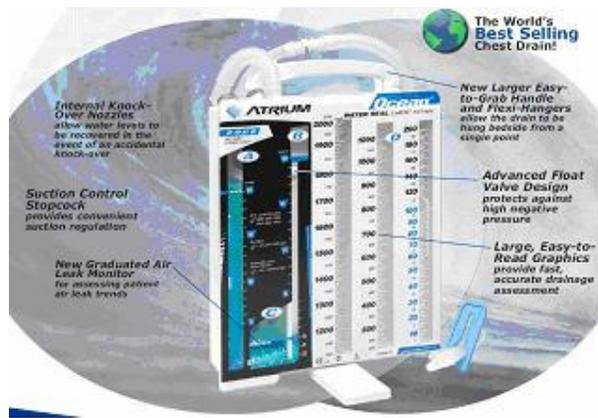
Une forte suspicion est suffisante pour intervenir :

- demande de recompression urgente (si le pneumothorax survient pendant la décompression)
- et surtout, insertion en urgence d'un gros cathéter (14G) :
 - *par voie antérieure au niveau du 2^e espace intercostal sur la ligne mamelonnaire verticale* : c'est la technique la plus simple, mais la mise en place peut être gênée par le volume du muscle grand pectoral.
 - *par voie axillaire au niveau des 4^e ou 5^e espaces intercostaux sur la ligne axillaire moyenne* entre le bord postérieur du grand pectoral et le bord antérieur du grand dorsal.



Ce drain peut alors être raccordé à :

- une valve uni-directionnelle de Heimlich, ou
- un système de drainage avec scellé-sous-eau type Pleur-Evac (TeleFlex-Rusch-Pilling) ou Ocean Atrium (Atrium Med. Corp., Hudson, NH, E.U.), qui fonctionne parfaitement en atmosphère hyperbare [Holcomb³³, Moon⁶¹]



X- Un hémotympan

Cette complication classique de l'OHB, liée à l'impossibilité d'équilibration de l'oreille moyenne, n'a rien de spécifique et n'est pas en rapport avec la ventilation mécanique. Mais chez tous les sujets sous anesthésie générale (donc sous ventilation mécanique) ou sédation approfondie, en particulier les enfants, et dans les indications d'oxygénothérapie hyperbare répétées ou à pression absolue élevée, certains proposent une myringotomie préventive (ou aérateur trans-tympanique)

Le principe d'une recommandation générale de myringotomie n'est pas encore établi.

XI- Une sédation insuffisante

C'est la dernière étiologie à évoquer avant de majorer cette sédation. C'est un diagnostic d'exclusion des complications précédemment citées.

Une étude rétrospective des complications dans le service de réanimation médicale de l'hôpital de Garches sur 2002-2003 a permis le recensement de tous les accidents et incidents chez les patients ventilés mécaniquement en C-HB (tab. II et III). L'insuffisance de sédation est la complication la plus fréquente (tab. IV).

| NOMBRE d'INCIDENT et ACCIDENT | | Tableau [II] | |
|---|----------|--------------|--|
| | 2002 | 2003 | |
| Nombre de séances | 255 | 189 | |
| Nombre de séances avec VM | 66 | 64 | |
| Incident - | 244 | 180 | |
| Incident + | 11 | 16* | |
| Incident + chez patients avec VM | 8 | 4 | |

| TYPE d'INCIDENTS | | Tableau [III] | |
|-------------------------------------|----------|---------------|--|
| | 2002 | 2003 | |
| Agitation | 4 | 3 | |
| Désadaptation du respirateur | 4 | 1 | |
| Emphysème | 1 | 0 | |
| Hypotension | 0 | 1 | |
| Otalgies | 1 | 7 | |
| Autres (?) | 1 | 4 | |
| Total | 11 | 16* | |

* certains patients "cumulent" plusieurs incidents

Chez ces patients nous avons analysé les dossiers pour spécifier l'indication du traitement OHB, le type d'incident ou accident, l'attitude thérapeutique (tab. IV) :

| ANALYSE DES INCIDENTS (13) | | | | | | | Tableau [IV] |
|--|-----------------|---|-----------|---------------------------------|---|--|--------------|
| chez les PATIENTS avec VENTILATION MECANIQUE | | | | | | | |
| | | Indication OHB | Agitation | Désadaptation du respirateur | Autres signes | Attitude thérapeutique | |
| 06-04-02 | Fre. P. | Infections anaérobies Tissus mous | | + | | midazolam + fentanyl + | |
| 17-09-02 | Dak. S. | EGA | + | + | HTA | propofol + atracurium + nicardipine + | |
| 12-09-02 | Buq. R. | EGA | | + | | midazolam + pancuronium + | |
| 01-10-02 | Oue. A. | Infections anaérobies Tissus mous (cervicale) | + | | | midazolam + fentanyl + | |
| 02-10-02 | Oue. A. | Infections anaérobies Tissus mous (cervicale) | + | | | midazolam + fentanyl + | |
| 08-11-02 | Ant. JJ. | Infections anaérobies Tissus mous (périnéale) | | + | hypoventilation (ballonnet dégonflé) | soluté physiologique dans le ballonnet | |
| 30-11-02 | Mon. G. | Infections anaérobies Tissus mous (périnéale) | + | | | midazolam + fentanyl + | |
| 01-12-02 | Mon. G. | Infections anaérobies Tissus mous (périnéale) | + | | | midazolam + fentanyl + | |
| 11-04-03 | Pie. J. | EGA | | + | | ? | |
| 18-11-03 | Sou. G. | Infections anaérobies Tissus mous (membres) | + | + | + hypoTA/ NAd voie v. obstruée | arrêt séance OHB | |
| 03 | X | | + | | | ? | |

Les complications rencontrées dans cette étude rétrospective sont donc bénignes :

- 2 "problèmes techniques" : un ballonnet dégonflé, et un cathéter bouché,
- dans 8 cas, sans autres causes retrouvées, l'agitation et/ou la désadaptation du respirateur est secondaire à une insuffisance de sédation. La majoration de cette sédation (midazolam, fentanyl) "appuyée" dans 2 cas par une curarisation a permis de continuer la séance sans autre problème.

D'où l'intérêt d'étudier la sédation en réanimation et en atmosphère hyperbare. Ce sera l'objet du chapitre suivant.

SÉDATION

pour VENTILATION MÉCANIQUE

en CHAMBRE HYPERBARE

"La présence d'un patient agité dans l'espace restreint du caisson hyperbare représente une expérience angoissante réelle, en particulier parce que l'obligation de décompression du personnel interdit la dépressurisation. Cette situation a évolué vers un plus grand usage d'anesthésie et d'analgésie intraveineuse, surtout pour les patients nécessitant une ventilation à pression positive à l'intérieur du caisson."

[LeDez KM.⁴³]

I- Mode d'administration des médicaments en chambre hyperbare

L'oxygénothérapie hyperbare entraîne une vasoconstriction dans les tissus normaux, qui peut donc modifier de façon notable l'absorption des médicaments injectés par voie intra-musculaire (IM) ou sous-cutanée (SC). Emerson et coll.^[20] ont étudié l'absorption du midazolam par voie IM en hyperbarie. Chez 65% des sujets, les pics plasmatiques surviennent plus tôt en pression : 33 min à 2.8 ATA, et 41 min à 1 ATA.

L'absorption digestive n'est pas modifiée.

Kindwall E.^[38] recommande donc logiquement la voie intraveineuse.

II- Particularités de quelques médicaments utilisés en hyperbarie

De nombreuses études ont été pratiquées sur la pharmacodynamie des drogues en hyperbarie, mais beaucoup sont anciennes, et les résultats sont disparates pour beaucoup d'entre elles. L'hyperbarie entraîne chez les animaux anesthésiés, des modifications comportementales caractéristiques de l'état d'éveil. Ce phénomène appelé "Pressure reversal of anesthesia" [Kendig³⁷] ou "Opposing effects of high pressure and inert gases" [Miller⁵⁸] a même été utilisé pour exposer, expliquer et tester les théories sur les mécanismes de l'anesthésie générale, dans l'hypothèse où le rapport inverse pression-anesthésie représente un antagonisme physico-chimique de l'effet anesthésique. En effet, l'oxygénothérapie hyperbare favorise les convulsions, et entraînerait une augmentation des besoins anesthésiques. Mais pression et agents anesthésiques dépriment tous les deux la transmission synaptique excitatrice. Plusieurs auteurs [Kendig³⁷, Kramer⁴²] ont ainsi testé chez l'animal, en hyperbarie, plusieurs agents anesthésiques intraveineux ou volatils (pentobarbital, halothane, méthoxyflurane) pour résoudre ce paradoxe. Aucun antagonisme significatif entre la pression et chacun des agents anesthésiques étudiés n'a été observé, en terme de facilitation, potentialisation ou inhibition de la transmission synaptique. Un effet additif, plutôt qu'un antagonisme serait à la base de cet "effet inverse de la pression" sur la dépression anesthésique au niveau de la synapse. L'antagonisme fonctionnel apparent semble être ainsi indirect, et regroupe probablement des sites d'action multiples à la fois pour la pression et pour les agents anesthésiques. Alors que l'on connaît encore mal le mode d'action précis de nombreux agents anesthésiques volatils ou intraveineux, le problème semble complexe et loin d'être résolu...

Cliniquement et pratiquement, on peut cependant retenir que :

A- Les morphiniques intraveineux, étant des dépresseurs respiratoires, ils aggravent l'hypercapnie, favorisent une vasodilatation cérébrale, augmentent le transport d'O₂ vers le cerveau, et favorisent les convulsions hyperoxiques en hyperbarie. Ils sont donc contre-indiqués en ventilation spontanée.

En ventilation mécanique, chez des patients de réanimation, ces effets délétères ne se posent pas, et ces drogues narcotiques sont même recommandées pour la sédation, l'analgésie, et l'adaptation au respirateur (cf.§ III-B "Utilisation des morphiniques").

B- Les anesthésiques généraux volatils posent trois problèmes :

1-Les vaporisateurs (ou évaporateurs) spécifiques à chaque gaz halogéné sont-ils fiables ?

Weiss et coll.^[105], dès 1967, avaient d'abord mesuré ces concentrations en chambre hyperbare, avec les premiers vaporisateurs à halothane : les pourcentages ou fractions inspirées étaient légèrement plus basse que les valeurs affichées.

Baker et coll.^[2] en 1978, ont testé l'enflurane en condition hyperbare jusqu'à des concentrations de 5%, en oxygène "pur" ou en mélange protoxyde d'azote – oxygène : le mélange n'est pas explosif jusqu'à des pressions absolues de 3 ATA ! Plus récemment, Satterfield et coll.^[77], en 1989 ont testé le vaporisateur d'isoflurane jusqu'à 4 ATA :

- la composition du gaz frais d'entraînement ou son débit ne modifient pas la concentration de vapeur à la sortie du vaporisateur,
- la fraction de vapeur halogénée augmente linéairement avec la concentration affichée, entre 0 et 2%,
- ces fractions sont très légèrement plus faibles ($\pm 20\%$) que les valeurs affichées (fig. 1)

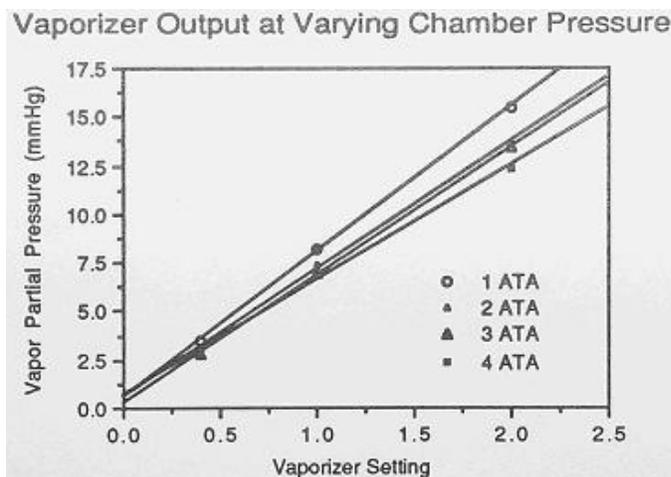


Fig. [1] Isoflurane en atmosphère hyperbare.
Variation de la Pression partielle de vapeur du gaz halogéné en fonction de l'affichage sur le vaporisateur, et à des pressions ambiantes de 1 à 4 ATA.
(d'après Satterfield⁷⁷)

Les auteurs concluent: "L'isoflurane peut être administré dans des conditions cliniques acceptables en atmosphère hyperbare avec son vaporisateur spécifique."

Qu'en est-il des autres gaz halogénés, et de leur vaporisateur spécifique ...? Le desflurane ne peut être utilisé, puisqu'il nécessite un vaporisateur avec une cuve chauffée par une résistance électrique...

2- Quelle concentration ou quelle fraction administrer en hyperbarie ?

a- A pression atmosphérique, les pharmacologues et les médecins anesthésistes utilisent la notion de Concentration Alvéolaire Minimale (MAC) pour exprimer la puissance d'action de ces anesthésiques généraux volatiles halogénés. Elle dépend, entre autres, de la fraction ou du pourcentage inspiré de l'halogéné (F_{IHal}), de la pression partielle du gaz administré dans le circuit respiratoire, donc de sa concentration dans le gaz alvéolaire du patient.

b- Avec l'augmentation de pression ambiante, cette concentration doit être réduite en proportion de la pression ambiante d'utilisation. En pratique, le pourcentage effectivement administré est le pourcentage affiché, multiplié par le nombre d'atmosphères de pression à laquelle on l'utilise. Donc pour obtenir une MAC équivalente, on devra faire la correction suivante :

$$MAC_{Hal \text{ à Patm.}} = MAC_{Hal \text{ à Pabs.}}$$

$$P_{Hal \text{ à Patm.}} = P_{Hal \text{ à Pabs.}}$$

$$F_{IHal \text{ à Patm.}} * 1\text{bar}(a) = F_{IHal} * X\text{bar}(a)$$

$$F_{IHal \text{ (à afficher)}} = F_{IHal \text{ à Patm.}} * 1\text{bar}(a) / X\text{bar}(a)$$

3- Le risque de pollution de la chambre hyperbare

Enfin, la plus grande attention doit être apportée à une évacuation des gaz expirés, pour ne pas contaminer l'atmosphère de la chambre hyperbare, et le personnel... d'où la nécessité :

- d'un déverseur spécifique au respirateur **pour l'évacuation extérieure des gaz expirés du circuit patient,**
- **et d'une ventilation efficace de la chambre hyperbare.**
- d'un contrôle continu de la concentration d'oxygène **dans l'enceinte de la C-HB**

Ces trois difficultés pratiques ont fait que "l'anesthésie volatile" est tombée en désuétude en milieu hyperbare, par opposition à l'utilisation plus aisée des hypnotiques intraveineux.

C- Les hypnotiques intraveineux ne posent pas les mêmes problèmes pharmacocinétiques et ne semblent pas subir de grandes modifications en hyperbarie. Ces drogues exposent toutes au risque de dépression respiratoire, et doivent être maniées par un médecin anesthésiste ou un médecin réanimateur :

- la kétamine a été très employée, car préservant une ventilation pulmonaire aux faibles doses. La marge thérapeutique est cependant étroite.
- les barbituriques intraveineux, entraînent tous une dépression respiratoire, qu'ils soient employés comme anti-convulsivants ou pour l'induction d'une anesthésie.
- les benzodiazépines (diazepam, clonazepam, midazolam), utilisés comme anxiolytique ou tranquillisant, anti-convulsivant, ou anesthésique général sont aussi dépresseurs respiratoires.

III- Les drogues utilisées pour la sédation en réanimation

Elles ne changent pas de celles habituellement utilisées en réanimation (⁵⁶). Les différents produits seront administrés par voie intraveineuse continue, dont les avantages sur les doses totales administrées et sur la qualité de la sédation ont été soulignés.

Tableau [I]

Utilisation des agents en fonction de l'indication et du terrain

| Indication | Halogénés | Barbituriques | Propofol | Etomidate | Ketamine | γ OH- butyrate de Na | Morphiniques | Benzodia- zépines | Curares |
|-----------------------|-----------|---------------|----------|-----------|----------|-----------------------------------|--------------|----------------------|---------|
| Vent. artificielle | - | - | + | - | - | ± | + | + | + |
| Trauma crânien | - | + | + | ± | - | + | + | + | + |
| Etat de choc | - | - | ± | + | + | + | + | ± | + |
| Asthme grave | + | - | + | - | + | + | ± | + | + |
| Tétanos | + | - | + | - | - | - | + | + | + |
| Sujet âgé | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Porphyrie | - | - | - | - | | + | - | ± | ± |
| Myasthénie | ± | + | + | ± | ± | + | + | - | - |
| Grossesse | + | + | + | + | + | + | + | + | + |

A- La sédation en OHB (tab. II)

Les benzodiazépines apportent l'anxiolyse, le sommeil, et l'amnésie nécessaires aux patients de réanimation, et présentent une bonne tolérance hémodynamique :

- le diazépam, molécule de référence de cette classe, est actuellement moins utilisé du fait de sa mauvaise tolérance veineuse, et du risque d'accumulation.
- le flunitrazépam, présent une longue demi-vie, avec risque d'accumulation et de réveil retardé.
- le midazolam, a l'avantage d'une bonne tolérance veineuse, et d'une demi-vie plus courte.

Parmi les anesthésiques généraux volatils,

- l'halothane a été employé dans l'état de mal asthmatique, mais ses effets secondaires myocardiques et hépatiques lui ont fait préférer :
- l'isoflurane moins toxique, a été utilisé dans l'état de mal asthmatique et au cours de tétanos sévères.

On a vu plus haut les difficultés d'emploi de ces produits en atmosphère hyperbare...

Tableau [II]

Utilisation des agents de sédation chez les patients de réanimation

| Produits | Voie d'administration | Avantages | Inconvénients | en OHB |
|----------------------------|-----------------------|---|---|--|
| Propofol | IV | agent de sédation et d'AG action rapide courte durée anti-convulsivant + | hypotension prix | - intéressant en administration IV continue, - permet l'adaptation rapide du niveau d'anesthésie souhaité, et l'adaptation au respirateur - très employé, en association avec un morphinique |
| Barbituriques | IV | action rapide peu coûteux anti-convulsivant ++ | faible marge thérapeutique accumulation dépression CV | anti-épileptique d'appoint chez patient ventilé en cas de crise hyperoxique |
| Etomidate | IV | action rapide courte durée relative stabilité CV anti-convulsivant abaisse la P ₁₀ | irritation veineuse insuffisance surrénalienne | de moins en moins utilisé... devrait être contre-indiqué ! |
| Kétamine | M, IV | action rapide courte durée analgésie+ peu dépressur respiratoire broncho-dilatateur + | psychodysleptique action Σ hypersécrétion bronchique | peu utilisé |
| γ OH-butyrate de Na | IV | stabilité CV | épileptogène | contre-indiqué |
| Midazolam | IV | action rapide durée assez courte (demi-vie= 2-3 h) anxiolytique amnésie | accumulation si sédation prolongée syndrome de sevrage | très employé, en association avec un morphinique |
| Morphiniques | IV | analgésie +++ sédation | syndrome de sevrage ? dépression respiratoire | très utile chez le patient ventilé pour : - l'analgésie - la sédation - l'adaptation au respirateur |
| Halogénés | inhalatoire | action rapide courte durée broncho-dilatateur anti-convulsivant (sauf l'enflurane) | dépression CV pollution atmosphérique coût (isoflurane) | nécessite : - un monitoring adapté avec mesure de fraction inspirée - une ventilation adaptée de la chambre hyperbare du fait des risques de pollution majeure |
| Antidépresseurs | IV | action anti-dépressive | action retardée troubles CV | peu employés |

B- L'analgésie en OHB (tab. III)

Lorsque la ventilation artificielle devient nécessaire au traitement du patient, la sédation devra comporter une analgésie. Elle permet le confort psychique et physique pendant et en dehors des soins et explorations diverses, et l'adaptation à la ventilation artificielle.

L'analgésie est nécessaire car la plupart des malades sont soumis à des stimuli nociceptifs répétés :

- douleur post-opératoire,
- douleur liée aux sondes diverses et variées : intubation, sonde urinaire, drains thoraciques ou abdominaux,
- douleur post-traumatique,
- douleur liée aux différentes explorations
- nursing

Elle est aussi nécessaire à l'adaptation au respirateur.

La douleur est avec l'angoisse l'un des souvenirs les plus intolérables des patients de réanimation. Elle doit bien entendu être poursuivie pendant les séances d'OHB. Les analgésiques utilisés sont habituellement des morphiniques :

| Tableau [III] Utilisation des morphiniques pour la sédation et l'analgésie des patients ventilés, ou non ventilés | | | | | |
|--|------------------------|-----------------------|---|---|--|
| Morphinique | Posologie | | Avantages | Inconvénients | Notes |
| | en VC | en VS | | | |
| Morphine | 2 - 10mg/h pour 70kg | 05-2 mg/h pour 70kg | Retentissement hémodynamique modéré (sauf en cas d'hypovolémie) | Diminuer la posologie en cas de : - Insuffisance rénale - Insuffisance hépatique - Etat de choc Variabilité de l'effet Histamino-libération | Très employée aux E.U. |
| Fentanyl | 0.10-5 mg/h pour 70kg | 1-1.5 µg/kg/h | Délai d'action court Beaucoup plus puissant que la morphine | | Produit de choix quel que soit le terrain |
| Alfentanyl | 1 - 8 mg/h pour 70kg | pas d'emploi en VS | | Diminuer la posologie en cas de : - Insuffisance hépatique Accumulation marquée en cas d'utilisation prolongée Grande variabilité inter-individuelle | Non recommandable en utilisation prolongée |
| Sufentanyl | 0.02 mg/h pour 70kg | pas d'emploi en VS | 5 à 10 fois plus puissant que le fentanyl Délai d'action court Elimination plus rapide Variation interindividuelle modérée | | Produit de choix quel que soit le terrain, de plus en plus employé pour la sédation prolongée, index thérapeutique le plus élevé de tous les morphiniques. |
| Phénopéridine | 0.5 - 2 mg/h pour 70kg | pas d'emploi en VS | | Diminuer la posologie en cas de : - Insuffisance hépatique Tolérance hémodynamique moins bonne que le fentanyl | Aucun avantage par rapport au fentanyl |
| Péthidine | pas d'emploi en VC | 15-50 mg/h pour 70 kg | | Cl en cas de : - Insuffisance rénale Histamino-libération Effets CV | En désuétude... |

En association avec les morphiniques, deux types de produits peuvent donc être préconisés pour la sédation et la ventilation contrôlée en chambre hyperbare :

- les benzodiazépines, **midazolam essentiellement**
- les hypnotiques intraveineux: **le propofol est utilisé par tous les centres interrogés dans notre étude (en cours).**

C- Les curares (tab. IV)

Leur emploi peut devenir nécessaire pour obtenir un relâchement musculaire complet, afin de parvenir à une parfaite adaptation à la ventilation mécanique, en particulier pour les indications de l'OHB avec syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA). Ces drogues n'ont aucune propriété analgésique, sédative ou amnésiante. Leur emploi ne se conçoit pas sans l'utilisation simultanée d'un anxiolytique, d'un anesthésique général, et/ou d'un analgésique. Seuls les curares non-dépolarisants sont utilisables en réanimation.

Tableau [IV]

Utilisation des curares en réanimation et en OHB

| Curare | Posologie | | Avantages | Inconvénients |
|---------------|-----------------|---------------------|--|--|
| | charge (bolus) | entretien | | |
| Pancuronium | 0.1 mg/kg | 0.05 mg/kg/h | | - durée d'action longue - élimination rénale : risque de curarisation prolongée en cas d'insuffisance rénale - tachycardie, et hypertension modérée |
| Vécuronium | 0.1mg/kg | 0.02 - 0.1 mg/kg/h | - durée d'action courte - élimination rénale de 30-50 % - absence d'effet hémodynamique | |
| Atracurium | 0.5 - 0.6 mg/kg | 0.4 - 0.8 mg/kg/h | - durée d'action courte, - dégradé selon le processus d'Hofmann (hydrolyse par les cholinestérases plasmatiques non spécifiques), et indépendant du foie et des reins, - peu de risque d'accumulation | - risque d'histamino-libération possible mais rare |
| Cisatracurium | 0.15 mg/kg | 0.06 - 0.12 mg/kg/h | - durée d'action intermédiaire, - dégradé selon le processus d'Hofmann (hydrolyse par les cholinestérases plasmatiques non spécifiques), et indépendant du foie et des reins, - peu de risque d'accumulation | - risque d'histamino-libération possible mais rare |
| Rocuronium | 0.5 - 0.6 mg/kg | 0.3 - 0.6 mg/kg/h | - durée d'action intermédiaire, - métabolisme hépatique - élimination urinaire | - risque de curarisation prolongée en cas d'insuffisance hépatique et/ou rénale |

IV- Le contrôle de la sédation

Il est essentiellement clinique, basé sur :

- l'adaptation au respirateur,
- la tolérance hémodynamique.

Nochetto et coll.^[63] recommandent, dans un abstract récent, l'utilisation de l'index bi-spectral (BIS) chez les patients ventilés en chambre hyperbare. Cette mesure d'une dérivation EEG frontale simple s'exprime de 0 (sommeil profond) à 100 (éveil total). En principe, un BIS entre 40 et 60 est nécessaire pour la ventilation adéquate d'un patient ventilé. L'état clinique et le niveau de BIS permettent d'adapter au mieux la posologie de cette sédation.

En résumé, la sédation en chambre hyperbare chez un patient ventilé artificiellement doit obéir actuellement à quelques règles générales :

- Continuer le ou les mêmes agents utilisés dans les services de réanimation si possible, en prévoyant la quantité suffisante en fonction de la durée prévue de la séance.
- Perfusion intra-veineuse continue d'un agent à élimination rapide.
- Adaptation de la posologie au niveau de sédation souhaitée et surtout de l'adaptation au respirateur, ce qui est au mieux réalisé par des perfuseurs électriques à débit continu. Des "seringues électriques" ont été spécialement conçues pour une utilisation hyperbare.

CONCLUSION

Dans son principe de base, l'oxygénothérapie hyperbare est simple. Toutefois sa mise en pratique présente des difficultés, à cause de contraintes techniques importantes. La ventilation mécanique de par ses multiples aspects n'y échappe pas. Pour mettre en place des solutions techniques satisfaisantes, médecins, techniciens, organismes de contrôle, et éventuellement prestataires de services sont souvent amenés à travailler ensemble. Dans ce cas, l'ingénieur biomédical peut jouer le rôle d'interface entre ces acteurs. Certains centres hyperbares européens utilisent couramment des appareils de réanimation lourde; leur expérience s'avère souvent riche d'enseignement. C'est pourquoi, les échanges d'informations et de personnel entre les centres doivent être développés. Tandis que l'on parle de normes européennes, d'estampille "CE", il convient de s'entendre afin de faciliter l'utilisation simultanée de l'oxygénothérapie hyperbare et de la réanimation (comme c'est déjà le cas en Allemagne et en Italie).

Les médecins souhaitent pouvoir disposer en chambre hyperbare des mêmes possibilités de soins que dans un service de réanimation classique. Cependant, l'environnement hyperbare est contraignant. Peu de respirateurs conviennent à l'utilisation en chambre hyperbare. Pour certains, il faut consentir quelques modifications.

Une connaissance étendue de la physique du respirateur utilisé, aussi bien que de la physiologie des mécanismes qui influencent la consommation, le transport sanguin et la délivrance tissulaire de d'oxygène, est nécessaire pour assurer un traitement optimal aux patients de soins intensifs en chambre hyperbare.

Bien que la recherche du respirateur idéal pour chambre hyperbare soit une noble cause, et que les paramètres de la ventilation soient les moins possibles modifiés pendant les phases de compression et de décompression, ce n'est pas le seul élément de garantie de soin optimal pour le patient. Autrement dit, il n'est pas suffisant de se "reposer" sur un bon respirateur; l'expérience de la ventilation des patients difficiles et des respirateurs est nécessaire.

Quant à sa surveillance dans l'enceinte hyperbare, elle est d'autant plus importante que les paramètres ventilatoires de son respirateur sont modifiés par l'hyperbarie, et donc essentiellement axée sur la prévention de l'hypoventilation alvéolaire et de son corollaire, l'hypercapnie. La clinique peut être trompeuse, surtout chez un patient sous sédation ou "endormi". Les mesures de P_{tcO_2} et P_{tcCO_2} ont aussi leur limites et doivent être interprétées dans les cas difficiles ou limites, avec une gazométrie artérielle, pour conduire la suite du traitement.

RÉFÉRENCES

Références bibliographiques

- [1] Annane D, Troche G, Delisle F, Devauchelle P, Paraire F, Raphael JC, Gajdos P : **Effects of mechanical ventilation with normobaric oxygen therapy on the rate of removal from cerebral arteries**, *Crit. Care Med.*, 1994, 22 :851-857
- [2] Baker AB, Unsworth IP : **No ignition risk with hyperbaric enflurane**, *Anaesth. Intens. Care*, mai 1978, 6(2) :157-159.
- [3] Barach P : **Management of the critically ill patient in the hyperbaric chamber**, *Intern. Anesthesiol. Clinics*, Winter 2000, 38(1) :153-166,
- [4] Barriot P, Chave S, Pitti R : **Oxygénothérapie hyperbare (Principes et indications)**, in *Encycl. Med. Chir. Anesthésie-Réanimation*, (Paris), 1995, 36-940-A-10, 1-10
- [5] Blanch PB, Desautels DA, Gallagher TJ : **Mechanical ventilator function under hyperbaric conditions**, *Undersea Biomed.Res.*, 1989, 16 (Suppl): 17, A10
- [6] Blanch PB, Desautels DA, Gallagher TJ : **Deviation of function of mechanical ventilator function during hyperbaric conditions**, *Resp.Care*, 1991, 36 :803-814
- [7] Bouachour G, Bresard D, Gouello JP, Alquier P : **Adaptation et utilisation en atmosphère hyperbare du respirateur Siemens Servo 900D**, *MedSubHyp*, 1994(4) :29-30
- [8] Bouachour G, Lemasson Y, Varcha N, Dubourg F, Harry P, Alquier P : **Evaluation du respirateur pour chambre hyperbare RCH Lama**, *MedSubHyp*, 1989 (8) :178
- [9] Breen PH, Isserles SA, Westley J, Roizen MF, Taitelman UZ : **Combined Carbon monoxide and Cyanide poisoning: a place for treatment ?**, *Anesth. Analgesia*, apr.1995, 80(4) :671-677
- [10] Calzia E, Stahl W, Radermacher P : **Work of breathing imposed by different ventilators under hyperbaric conditions**, *Critical Care*, 1998, 2(Suppl 1) :106
- [11] Camporesi EM, Richard EM : **Management of critically ill patients in the hyperbaric environment**, *Med. Sub. Hyp.*, 1987, 6 :80-83
- [12] Caron O, Dufeu N, Guillamon JL, Renard F : **Utilisation et maintenance du RCH Lama**, in *Protocole de l'Unité Hyperbare du CMC de la Porte de Pantin*, 2002
- [13] Caron O, Linke J, Dufeu N, Guillamon JL, Renard F : **Surveillance d'un patient pendant la séance d'OHB par mesures des PtcO₂ et PtcCO₂**, in *Protocole de l'Unité Hyperbare du CMC de la Porte de Pantin*, 2002
- [14] Chatburn RL : **How ventilators work**, in *Fundamentals of mechanical ventilation, a short course in the theory and application of mechanical ventilation*, by Mandu Press Ltd., Cleveland (Ohio, EU.), 1st Ed. 2003 :12-51
- [15] Churchill S, Weaver LK, Haberstock D : **Performance of the Omni-Vent mechanical ventilator for use with the monoplace hyperbaric chamber**, *Undersea Hyperb. Med.*, 1998, 25(suppl) :24
- [16] Damien D, Creste R, DeLastelle P, Seguin P, Mathieu D, Wattel F : **Installations hyperbares**, in *Traité de Médecine Hyperbare*, Wattel F, Mathieu D. Eds, Ellipses Edition Marketing SA. (Paris) 2002, ch.50 :521-533
- [17] Desola J : **Management of seriously ill patients in the hyperbaric chamber**, *Proceedings 2nd Europ. Conf. Hyperb. Med.*, Basel (Suisse), 1988 :323-328
- [18] Desautels DA, Blanch PB : **Effect of varying pressure on compressible volume of mechanical ventilator**, *Undersea Biomed Res* 1989, 16 (Suppl): 17, A11
- [19] Degauque C, Lamy M, Stas M : **Use of the Logic 03 for controlled ventilation in hyperbaric oxygen therapy**, *Acta Anaesthesiol Belg.*, 1977, 28(4) :251-9.
- [20] Emerson G, Hackett P. : **Hyperbaric oxygen does not delay the absorption of intramuscular midazolam**, *South Pacific Underwater Medicine Society J.*, oct-dec. 1998, 28 (3) :122-125
- [21] Eskelson MI, Weaver LK, Greenway L. : **End-tidal CO₂ monitoring within the monoplace hyperbaric chamber**, *Undersea Biomed. Research*, 1989, 16(Suppl), A13
- [22] Estanyol N, Inoriza JM, Robert M, Manubens ME : **Correlation of simultaneous CO₂ (TcPO₂) and end-tidal CO₂ (ETCO₂) in humans during hyperbaric exposures**, *Proceedings 12th Intern. Congress on Hyperb. Med.*, Milan (Italie), sept.1996 :289-294
- [23] FENZY S.A.S : **Ventilateur hyperbare type RCH-Lama**, manuel d'utilisation et maintenance, fev.2002
- [24] Gallagher TJ, Smith RA, Bell GC : **Evaluation of the IMV Bird and the modified Mark 2 Bird in a hyperbaric environment**, *Respir. Care*, may 1977, 22(5) :501-4.
- [25] Gallagher TJ, Smith RA, Bell GC : **Evaluation of mechanical ventilators in a hyperbaric environment**, *Aviat. Space Environ. Med.*, feb.1978, 49(2):375-6
- [26] Germonpré P : **Indications de l'OHB, Brûlures**, in *Traité de Médecine Hyperbare*, Wattel F, Mathieu D. Eds, Ellipses Editions Marketing SA. (Paris), 2002 :337-349

- [27] Gibson AJ, Davis FM, Wilkinson AR : **Assessment of the PneuPac hyperbaric Ventilator**, *South Pacific Underwater Medicine Society J.*, oct-dec.1989, 19 (4) :172-176
- [28] Gilbert R, Keighley JF : **The arterial-alveolar oxygen tension ratio, an index of gas exchange applicable to varying oxygen concentrations**, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 1974, 109 :142-145
- [29] Greenway L, Weaver LK, Elliott C : **Performance of the Sechrist 500A hyperbaric ventilator as monoplace chamber pressure increases**, *Undersea Biomed. Research*, 1987, 14(Suppl) :20-21
- [30] Hampson NB : **Pulse oximetry in severe carbon monoxide poisoning**, *Chest*, oct.1998, 114 : 1036-41.
- [31] Hart GB, Stauss MB, Lennon PA, Whitcraft DD : **Treatment of smoke inhalation by hyperbaric oxygen**, *J. Emerg. Med.* 1985, 3 :211-215
- [32] Hilliard K, Nouveau J, Talec R : **Sécurité et équipement biomédicaux en milieu hyperbare**, *RBM-News*, avr.1998, 20 (2) :31-36
- [33] Holcomb JR, Matos-Navarro AY, Goldmann RW : **Critical care in the hyperbaric chamber**, in *Problem Wounds, The role of Oxygen*, Davis JC, Hunt TK. Eds., by Elsevier Science Publishing Co. (New-York, EU.), 1988, ch.9 :187-209
- [34] Hrcncir E : **Flow resistance of airways under hyperbaric conditions**, *Physiol Res.*, 1996, 45 (2): 153 – 8.
- [35] Irwin RS, Demers RR : **Mechanical ventilation**, in *Intensive Care Medicine*, Rippe JM, Irwin RS, Alpert JS et Dalen JE. Eds., by Little, Brown and Co.(Boston, Toronto) :462-74.
- [36] Keenan HT, Bratton SL, Norkool DM, Brogan TV, Hampson NB : **Delivery of hyperbaric oxygen therapy to critically ill, mechanically ventilated children**, *Journal of Critical Care*, March 1998, (13), Issue 1 :7-12
- [37] Kendig JJ, Grossman Y, MacIver MB : **Pressure reversal of anesthesia**, *Br. J. Anesthesia*, 1988, 60 :806-816
- [38] Kindwall EP : **The use of drugs under pressure**, in *Hyperbaric Medicine Practice*, Kindwall EP et Wheelan HT. Eds, Best Publishing Co., Flagstaff (Arizona, E.U.), 2nd edition-revised 2004, ch.12 :323-338
- [39] Kindwall EP, Goldman RW : **Hyperbaric Medicine Procedures**, 6th ed., Milwaukee, St-Luke's Hospital, 1984, :39
- [40] Kluger M : **Implications of hyperbaric medicine for anaesthesia and intensive care, Part 1**, *South Pacific Underwater Medicine Society J.*, mar.1997, 27 (1) :2-11
- [41] Kluger M : **Implications of hyperbaric medicine for anaesthesia and intensive care Part 2**, *South Pacific Underwater Medicine Society J.*, jun.1997, 27 (2) :62-73
- [42] Kramer WG, Welch DW, Fife WP, Chaikin BN, Medlock C, Gross DR : **Pharmacokinetics of pentobarbital under hyperbaric and hyperbaric hyperoxic conditions in the dog**, *Aviat. Space Environ Med.*, nov.1983, 54(11) :1005-8.
- [43] LeDez KM : **Anesthesiology and hyperbaric medicine/Anesthésiologie et médecine hyperbare (Editorial)**, *Can. J. Anesthesia*, 2002, 49 :1-4
- [44] Le Masson Y, Le Péchon JC, Barratt M, Murphy L : **Ventilator for space station Freedom, XVIIIth Meeting of EUBS, and Joint Meeting on Diving and Hyperbaric Medicine, 3rd Swiss Symposium**, Basel (Suisse), sept. 1992 :78-82
- [45] Le Péchon JC : **Hygiène, sécurité, prévention en milieu hyperbare. Actes de la 1^{ère} Conférence Européenne de Consensus sur la Médecine Hyperbare**, Wattel F, Mathieu D. Eds., Lille, France, 1994.
- [46] Le Péchon JC : **Travail en médecine hyperbare: hygiène, sécurité, prévention**, in *Polycopié du Diplôme d'Université de Médecine Hyperbare*, Paris V, jan.2003
- [47] Lewis RP, Szafranski J, Bradford RH, Smith HS, Crabbe GG : **The use of the Penlon Nuffield 200 in a monoplace hyperbaric oxygen chamber**, *Anaesthesia*, sept.1991, 46(9) :767-70.
- [48] Lydon AM, Doyle M, Donnelly MB : **Ventilator-patient dyssynchrony induced by change in ventilation mode**, *Anaesth Intensive Care*, jun.2001, 29(3) :273-5
- [49] MacAuliffe PF, Mozingo DW : **Inhalation injury and ventilator management**, *Prob. Gen. Surgery.*, mar.2003, 20(1) :97-105
- [50] MacKay R, Bennett M, **Evaluation of the Campbell (Ulco) EV 500 ventilator under hyperbaric conditions**, *South Pacific Underwater Medicine Society Journal*, jun.2002, 32 (2) :62-70
- [51] MacLennan N, Heimbach DM, Cullen BF : **Anesthesia for major thermal injury**, *Anesthesiology*, sept.1998, 89(3) :749-770,
- [52] Madden MR, Finkelstein JL, Goddwin CW : **Respiratory care of the burn patient**, *Clin. Plastic Surg.*, jan.1986, 13(1) :29-38
- [53] Manubens M, Estañol N, Robert M : **Medicina Hiperbárica en Anestesiología**, *Rev. Per. Anest.*, 1997, 10: 1: 26-33
- [54] Manubens E, Robert M, Inoriza JM, Estanyol N : **Comparison of the two Dräger volumetric respirators under hyperbaric conditions**, *Proceedings of the 12th Intern. Congress Hyperb. Med.*, Milan (Italy), sept.1996 :362-369
- [55] Marini JJ : **Ventilation mécanique contrôlée**, in *Ventilation mécanique*, Brochard L, Mancebo J. Eds, by Arnette (Paris), 1994 :21-49
- [56] Martin C, Potié F, Vialet R, Denis JP : **Sédation en réanimation, indications et techniques**, *Presse Med.*, 1996, 25(31) :1479-1490
- [57] Mielke LL, Hargasser SR, Breinbauer B : **Capnometry during hyperbaric oxygen therapy**, *Undersea Hyperb. Med.*, 1988, 3 :215-225

- [58] Miller JN : **Anaesthesia at depth**, *Proceedings of the joint SPUMS and the Republic of Singapore*, 1981, 11(Suppl) :70-73
- [59] Moon RE, Bergquist LV, Conklin B, Miller JN : **Monaghan 225 ventilator use under hyperbaric conditions**, *Chest*, jun.1986, 89 :846-51
- [60] Moon RE : **Use of ventilators in the hyperbaric environment**, *Anesthesia and Intensive Care in Italy, Acta Anaesthesiologica Italica*, 1991, 42(suppl.2) :211-212
- [61] Moon RE, Hart BB : **Operational use and patient monitoring in a multiplace hyperbaric chamber**, *Resp. Care Clin. North Am.*, mar.1999, 5(1) :21-49.
- [62] Mummery HJ, Stolp BW, DelDear G, Doar PO, Natoli MJ, Boso AE, Archibald JD, Hobbs GW, El-Moalem HE, Moon RE : **Effects of age and exercise on physiological dead space during simulated dives at 2.8 ATA.**, *J. Appl. Physiol.*, 2003, 94: 507-517
- [63] Nochetto M, Schmitz G, Medina A, Elizondo K, Suarez A, Gomez D, Uribe R, Sanchez EC : **Sedation control with the bispectral index in ventilated critical care patients treated in a monoplace hyperbaric chamber**, *Undersea Hyperb. Med., UHMS annual scientific meeting*, 2004, 31(3), A184
- [64] Ontiveiros S, Mosteller J : **Utilizing Monihan ventilator during pressurization and depressurization**, *Undersea Hyperb.Med.*, 1995, 10(3), J8467
- [65] Oppenheim-Eden A., Cohen Y, Weismann C, Pizov R : **Effect of helium on ventilator performance : study of five ventilators**, *Chest*, 2001, 120, 2 :582-588
- [66] Park GR, Manara AR, Bodenham AR, Moss CJ : **The PneuPac ventilator with new patient valve and air compressors**, *Anaesthesia*, 1989(44) :419-424
- [67] Pelaia P, Sposato M, Volturo P Antonelli N, Vitullo V : **Experimental evaluation of mechanical ventilators under hyperbaric conditions**, in *2nd Swiss Symposium on Hyperbaric Medicine*, Basel, Suisse, jul.1990 :41-42
- [68] Pelaia P, Volturo P, Rocco M, Mille, Malpieri R, Spinelli V : **La ventilazione meccanica in ambiente iperbarico: valutazioni sperimentali del Draeger Hyperlog**, *Minerva Anesthesiol.*, oct.1990, 56(10) :1371
- [69] Pirone C, Goble S : **Root cause analysis in the investigation of a post-hyperbaric incident**, *Undersea Hyperb. Med., UHMS annual scientific meeting*, 2004, 31(3), A310
- [70] Raleigh GW : **Air breaks in the Sechrist model 2500-B monoplace hyperbaric chamber**, *Crit. Care Med.*, 1989, 17 :453-4.
- [71] Ratzenhofer-Komenda B, Offner A, Quehenberger F, Klemen H, Berger J, Fadai JH, Spornbauer P, Prause G, Smolle-Juttner FM : **Hemodynamic and oxygenation profiles in the early period after hyperbaric oxygen therapy : an observational study of intensive care patients**, *Acta Anaesthesiol. Scand.*, 2003, 47 :554-558
- [72] Ray CS, Green B and Cianci P : **Hyperbaric oxygen therapy in burn patients with adult respiratory distress syndrome**, *Undersea Biomed Res*, 1989, 16 (Suppl) A139 : 81
- [73] Ricard-Hibon A, Lagneau F, Marty J : **Respirateurs et modalités de ventilation**, in *Médecine d'urgence 1998, 40^{ème} Congrès national d'Anesthésie-Réanimation*, 1998, Eds., by Elsevier (Paris)
- [74] Robert M, Manubens E, Inoriza J, Estanyol N : **A survey of the volumetric Dräger Oxylog ventilator under hyperbaric conditions**, *Proceedings 12th Intern. Congress Hyperb. Med.*, Milan, Italy, sep.1996 :370-373
- [75] Ross JA, Manson HJ : **Behaviour of three resuscitators under hyperbaric conditions**, *Aviat. Space Environ Med.*, jan.1977, 48(1) :26-28
- [76] Rogatsky GG, Shiffrin EG, Mayevsky A : **Physiologic and biochemical monitoring during hyperbaric oxygenation : a review**, *Undersea Hyper. Med.*, 1999, 26(2) :111-122
- [77] Satterfield JM, Russell GB : **Anaesthetic vaporizer performance under hyperbaric conditions**, *Undersea Biomed Res.*, oct-dec.1989, 19 (4)(suppl.): A43
- [78] Saywood AM, Howard R, Goad RF, Scott C : **Function of the Oxford Ventilator at high pressure**, *Anaesthesia*, jul.1982, 37(7) :740-4.
- [79] Sechrist Industries : **Malfunction leads to recall of hyperbaric ventilator**, *Biomed. Safety & Standards*, jan.2003, 33(1) :4,
- [80] Shank ES, Muth CM : **Decompression illness, Iatrogenic gas embolism, and Carbon monoxide poisoning: The role of HBO therapy**, *Intern. Anesthesiol. Clin.*, Winter 2000, 38(1) : 111-38
- [81] Sheridan RL : **Burns**, *Critical Care Medicine. Crit. Care Considerations Ped. Trauma*, nov. 2002, 30 (11)(suppl.) :S500-S514
- [82] Spence AA, Smith G : **Problems associated with the use of anesthetic and related equipment in a hyperbaric environment**, *Intern. Anesthesiol. Clin.*, Fall 1974, 12(3) :165-79
- [83] Spittal MJ, Hunter SJ, Jones L : **The pneuPAC hyperbaric variant HB: a ventilator suitable for use within a one-man hyperbaric chamber**, *Br. J. Anaesth.*, oct.1991, 67(4) :488-91.
- [84] Stahl W, Radermacher P, Calzia E : **Functioning of ICU ventilators under hyperbaric conditions, comparison of volume- and pressure-controlled modes**, *Intens. Care Med.*, apr.2000, 26(4) :442-8
- [85] Sugg BR, Prys-Roberts C : **The Penlon Oxford ventilator, a new ventilator for adult and pediatric use**, *Anaesthesia*, 1976(31) :1234-1244
- [86] Thomas G, Brimacombe J : **Function of the Dräger Oxylog ventilator at high altitude**, *Anaesth.Intens.Care*, jun.1994, 22(3) :276-80.
- [87] Trushin AI : **Use of apparatus for anesthetization and artificial respiration in pressure chambers**, *Biomed Eng (NY)*, mar.1974 7(3) :141-4

- [88] Van Baren R, Heij HA, Van Vugt JM, Peper JA, Van Kleij AJ, Klopper PJ : **Hyperbaric oxygen and high-frequency oscillator ventilation in experimental diaphragmatic hernia**, *Undersea Hyperb. Med.*, sep.1995, 22 (3) :315-6
- [89] Van Bredda HMK, Bennett MH, Somford MP, Stoutenbeek BM : **Estimation of blood oxygen tension following sample decompression reflects true blood oxygen tension**, *UHMS annual scientific meeting, Undersea Hyperb. Med.*, 2004, 31(3), A191
- [90] Van der Kleij AJ, Kooyman R, Bakker DJ : **Clinical value of transcutaneous PO₂ assessment during hyperbaric oxygen therapy**. *Adv. Exp. Med. Biol.* 1997,411:113-20
- [91] Vasquez VR, Fiol JJ, Pedroso WH, Perez DP, Milan NR : **Evaluacion del ventilador Ambumatic en condiciones hiperbaricas**, *Rev. Cub. Med. Int. Emerg.*, 2003, 2(4) :22-28
- [92] Vezzani G, Pizzola A : **Characteristics of an ideal ventilator for use in hyperbaric environment**, *Rapport de la 1^{ère} Conférence Européenne de Consensus sur la Médecine Hyperbare*, Lille, France, 1994
- [93] Wattel F, Mathieu D, Bocquillon N, Linke JC : **Pratique de l'oxygénothérapie hyperbare : prise en charge des patients**, in *Traité de Médecine Hyperbare*, Wattel F, Mathieu D. Eds, Ellipses Edition Marketing SA (Paris), 2002, 3^{ème} partie: Réalisation de l'OHB :544-561
- [94] Wattel F, Mathieu D, Linke JC, Bocquillon N, Delerue P : **Exploration en médecine hyperbare: techniques utilisées pour la sélection et la surveillance des patients traités par OHB**, in *Traité de Médecine Hyperbare*, Wattel F, Mathieu D. Eds, Ellipses Edition Marketing SA(Paris) 2002, 3^{ème} partie: Réalisation de l'OHB :562-588
- [95] Wahlen BM, Thierbach AR : **Near-hanging**, *Eur. J. Emerg. Med.*, dec.2002, 9(4) :348-350
- [96] Weaver LK : **A functional suction apparatus within the monoplace hyperbaric ventilator**. *J. Hyperbaric Med.*, 1988, 3 (3) :179-86
- [97] Weaver LK : **Air breaks with the Sechrist 500A monoplace hyperbaric ventilator**. *J. Hyperbaric Med.*, 1988, 3 (3) :179-86
- [98] Weaver LK : **Operational use and patient care in the monoplace hyperbaric chamber**, *Resp. Care Clin. North Am.*, mar.1999, 5 (1) :51-92
- [99] Weaver LK, Churchill S : **Pulmonary edema associated with hyperbaric oxygen therapy**, *Chest*, oct.2001, 120 :1407-1409
- [100] Weaver LK, Greenway L, Elliott CG : **Performance of the Sechrist 500A hyperbaric ventilator in a monoplace hyperbaric chamber**, *J. Hyperbaric Med.*, 1988, 3 :215-225
- [101] Weaver LK, Howe S : **Normobaric measurements of arterial oxygen tension in subjects exposed to hyperbaric oxygen**, *Chest*, Oct.1992, 102 :1175-1181
- [102] Weaver LK, Howe S : **Arterial oxygen tension of patients with abnormal lungs treated with hyperbaric oxygen is greater than predicted**, *Chest*, Oct.1994, 106 :1134-39
- [103] Weaver LK, Howe S, Berlin S : **Normobaric measurement of O₂ tension of blood and saline tonometered under hyperbaric O₂ conditions**, *J. Hyperb. Med.*, 1990, 5(1) :29-38
- [104] Weaver LK, Larson-Lohr V : **Hypoxemia during hyperbaric oxygen therapy**, *Chest*, apr.1994, 105 :1270-1271
- [105] Weis KH, Schreiber P : **Concentration measurements on the Fluotec and Halothane-vapor vaporizers in the hyperbaric chamber**, *Anaesthetist*, dec.1967, 16(12) :357-9
- [106] Whittle J, Butler CS, Muller R : **Functional characteristics of the Wright spirometer and the Dräger volumeter under hyperbaric conditions**, *South Pacific Underwater Medicine Society J.*, mar.1999, 2(1) :12-14
- [107] Youn BA, Houseknecht R : **The Penlon Oxford Ventilator, a second look**, *Undersea Biomed Res.*, jun.1989, 16 (Suppl) A90 :57
- [108] Youn BA, Houseknecht R : **Modified Emerson CPAP, T-piece circuit for use in the multiplace hyperbaric chamber**, *J Hyperbaric Med.* 1991, 6 :101
- [109] Youn BA, Houseknecht R, DeAntonio A : **Review of positive-end expiratory pressure and its application in the hyperbaric environment**, *J. Hyperbaric Med.*, 1991, 6 :87
- [110] Youn BA, Myers RAM : **Volume monitor for mechanical ventilation in the hyperbaric chamber**, *Crit. Care Med.*, may 1989, 17(5) :453-454

References Web

- [111] Souab A : **Les risques en chambre hyperbare**, *Aresub*
<http://perso.wanadoo.fr/aresub/medecinehyperbare/souab/risques.htm>
- [112] Souab A : **Règles de sécurité d'un service d'hyperbarie**, *Aresub*
<http://perso.wanadoo.fr/aresub/medecinehyperbare/souab/secu.htm>
- [113] Grandnicolas N : **Place de l'oxygénothérapie hyperbare dans les pendants manquées**, *Aresub*
<http://perso.wanadoo.fr/aresub/medecinehyperbare/pendaison/physiopatho.htm>

Sites Web de constructeurs de respirateurs

Ambu Inc. (AmbuMatic)

www.ambuUSA.com

Sechrist Industries (Sechrist 500A)

<http://www.sechristind.com>

Allied Healthcare Products Inc. (Omni-Vent)

<http://www.alliedhpi.com/>

Dräger Medical Inc. (Oxylog, MicroVent, Evita 4)

<http://www.draegermedical.com>

Siemens Medical Systems (Servo 900)

<http://www.siemens.vents.com>

Bird Products Corporation (Mark series)

<http://www.viasyshealth.com/Bird/default.htm>

Ulco Medical (Campbell EV500)

<http://www.ulco.com.au/ulco/index.html>

Siare (Iper 60VF)

<http://www.siare.it/ENGBas.html>

PneuPac Ltd. (PneuPac variant HB)

<http://www.pneupac.co.uk>

ETC Biomedical Systems (BaraVent)

http://www.etcbiomedical.com/hbo_prod.htm

EKU Elektronik GmbH (MAV3-B)

<http://www.eku-elektronik.de>