

FEDERATION FRANCAISE D'ETUDES ET DE SPORTS SOUS MARINS

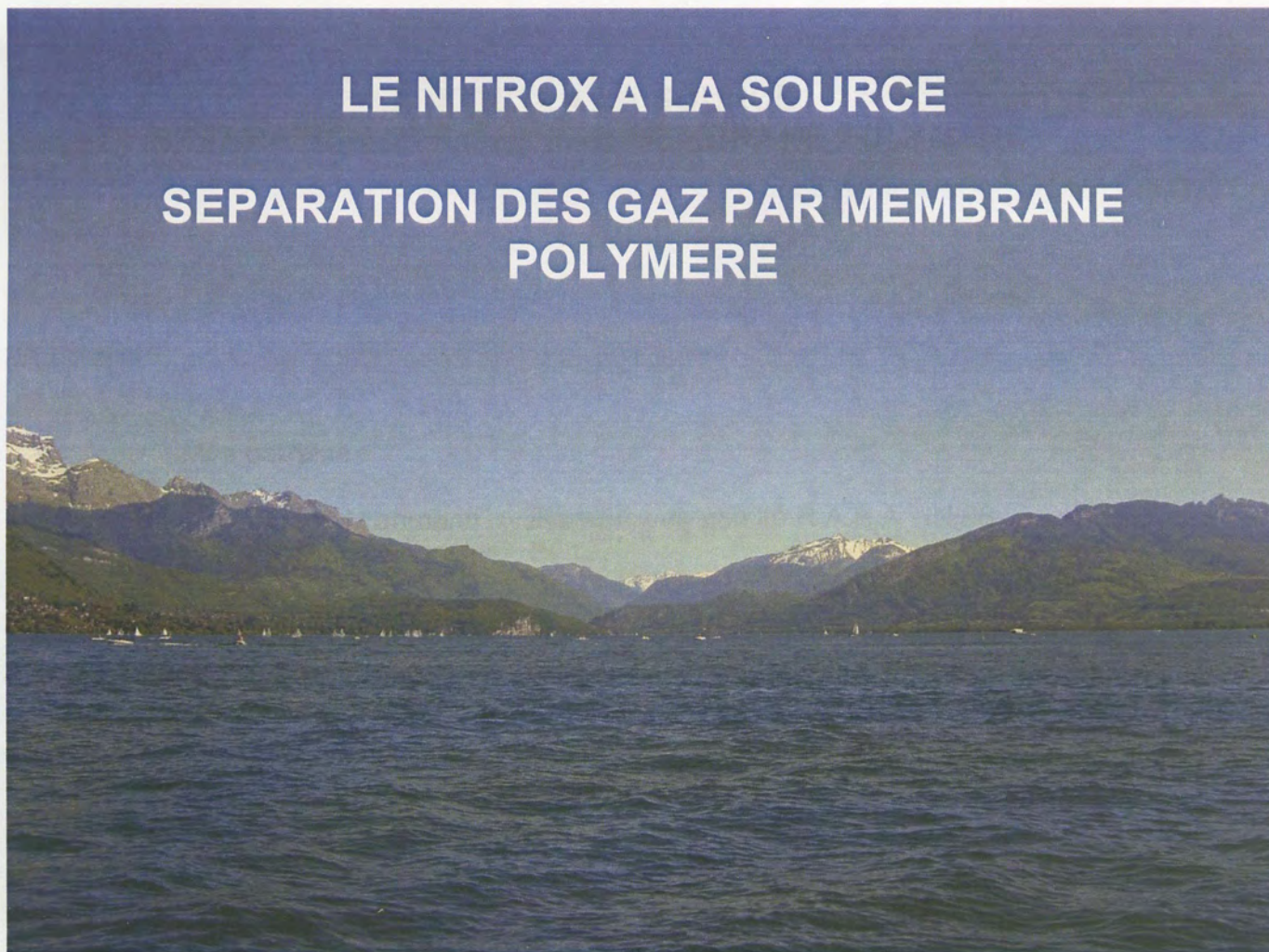
COMMISSION TECHNIQUE NATIONALE

JUILLET 2006

Philippe MARTINOD

## LE NITROX A LA SOURCE

### SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE



Philippe MARTINOD  
Juillet 2006



SOMMAIRE

FEDERATION FRANCAISE D'ETUDES ET DE SPORTS SOUS MARINS

COMMISSION TECHNIQUE NATIONALE

JUILLET 2006

Philippe MARTINOD

AVANT PROPOS

L'OXYGENE

Permeabilité de l'oxygène et le nitrox

Le nitrox, un gaz respirable

Des plongées

L'AIR EN PLONGEE

COMMENT ENRICHIR L'AIR EN OXYGENE ?

Je remercie

l'association par pression partielle

Mes parrains :

LES REACTIONS DE L'OXYGENE

Infatigable

Déterminé

SECURISER LA FABRICATION DU NITROX

LES MEMBRES LA PERMEATION GAZEUSE

Fabrication d'une fibre creuse poreuse

Conducteur

Process de fabrication

l'élaboration du modèle « membrane »

Les plongées

Précieux

Expérimenté

L'expérience

Le plongeur

Le plongeur

Le plongeur

Le plongeur

Le plongeur

PROCESSUS DE PRODUCTION D'UNE LAMPE DE NITROX

Produit par

Daniel Lehmann Président du comité R.A.B.A IN 68

Philippe Schneider IN 127

pour le soutien qu'ils m'ont apporté

Ainsi que :

Jean Luc Besqueut

Président de la CTR R.A.B.A

pour sa confiance

Georges Rollet

MN 15

pour sa disponibilité et ces précieux conseils

Marie-line Martinod

pour les relectures efficaces

Jean Michel Joly

Dominique Henri

pour leur aide éclairée



## SOMMAIRE

<b>AVANT PROPOS</b> .....	<b>5</b>
<b>L'OXYGENE</b> .....	<b>6</b>
Formation de l'atmosphère terrestre. ....	6
L'oxygène, un poison auquel la vie s'est adaptée. ....	6
Bien plus tard : L'air source de vie. ....	6
<b>L'AIR EN PLONGEE</b> .....	<b>7</b>
<b>COMMENT ENRICHIR L'AIR EN OXYGENE ?</b> .....	<b>8</b>
Fabrication à injection directe ou flux continu ....	8
Fabrication par pression partielle ....	8
<b>LES REACTIONS DE L'OXYGENE</b> .....	<b>10</b>
Inflammation.....	10
Oxydation .....	10
<b>SECURISER LA FABRICATION DU NITROX</b> .....	<b>11</b>
<b>LES MEMBRANES ET LA PERMEATION GAZEUSE</b> .....	<b>12</b>
Fabrication d'une fibre creuse perméable.....	12
Généralités .....	12
Procédé de fabrication .....	13
L'élaboration du module « membrane ».....	15
Les principes de base de la perméation gazeuse.....	18
Généralités .....	18
Principe .....	18
Comparaison .....	20
Les propriétés d'une unité d'enrichissement d'air en oxygène.....	20
La séparation centrifuge .....	21
La séparation mécanique.....	21
La filtration submicronique .....	22
Filtration de l'humidité .....	23
Tamis moléculaires ou adsorbants .....	26
<b>PROCESS DE PRODUCTION D'UNE UNITE DE NITROX</b> .....	<b>28</b>
Production d'air .....	28



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Enrichissement de l'air en oxygène.....	29
Le compresseur haute pression.....	30
<b>MACHINE SUR LE MARCHE DE LA PLONGEE EN FRANCE .....</b>	<b>33</b>
<b>QUAND CHOISIR LE GENERATEUR NITROX .....</b>	<b>35</b>
Coût de fabrication des nitrox avec de l'oxygène pur .....	35
Coût de fabrication des nitrox avec un générateur .....	36
Comparaison des coûts de production .....	38
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>41</b>

Un résumé

Ces systèmes ont fait leurs preuves et ont permis de démocratiser l'accès à l'air enrichi en oxygène. Ils offrent des moyens de gonflage plus efficaces qui associent rendement et sécurité.

Le système à membrane semi perméable met en œuvre la perméation gazeuse, nouvelle voie de production de nitrox en partant de l'air ambiant.

Cette nouveauté amène beaucoup de questions souvent liées aux coûts. Particulièrement, se pose en dernier, son coût d'exploitation.

L'expérimentation que l'on ne réalise pour intégrer des membranes semi perméables dans les machines pour meilleur de nitrox, m'a conduit à effectuer beaucoup de recherches pour comprendre et suivre le principe de la perméation gazeuse. Si le procédé de production d'azote par adsorption existe dans le domaine industriel, il n'est pas pour autant transposable à cet usage. L'apparente simplicité qui permettrait de dire qu'il suffit d'envoyer de l'air brulé grâce à un mécanisme polymère pour générer du nitrox ne doit pas nous faire oublier que ce nitrox est destiné à des plongeurs et qu'il doit répondre à une « qualité respirable ».

C'est en partant de cette réflexion que mon mémoire s'écrit, dans une démarche de progrès. La première partie, ce que sont les membranes semi perméables, la perméation gazeuse et d'explorer les différents moyens techniques utilisés par les constructeurs. La seconde partie, est plus ou moins un bilan sur les structures plongées pour comparer les coûts de production de gaz avec un générateur de nitrox ou avec l'air et l'oxygène pur.



## L'OXYGENE

### Formation de l'atmosphère terrestre.

Notre planète, comme les autres, avait autrefois un noyau incandescent sur lequel flottaient les substances plus légères, qui formaient ainsi une croûte solide. Au début, il n'y avait rien sur cette croûte, et la terre ne possédait pas d'atmosphère.

À mesure que la terre se refroidissait, d'énormes quantités de méthane, d'ammoniac, de vapeur d'eau et de gaz carbonique furent expulsés du centre de la terre vers l'extérieur. Cela constitua la première atmosphère de la terre. Cette atmosphère, agissant comme une serre, permit de réduire la perte de chaleur de la terre vers l'espace et notre planète demeura ainsi assez chaude pour que puisse naître la vie. Sa température se situait probablement entre 15 et 30 °C.

Ensuite, il y a environ 4,5 milliards d'années, la vapeur d'eau s'est condensée pour former les océans. Le gaz carbonique se combina à des minéraux et fut absorbé par les océans, et il fut utilisé par les premiers êtres vivants. L'azote est resté dans l'atmosphère parce que cet élément réagit peu avec les autres. Il y a 3 milliards d'années, l'atmosphère contenait encore peu d'oxygène. Des réactions chimiques compliquées entre le méthane, l'ammoniac, l'eau et le rayonnement solaire donnèrent naissance à une couche d'ozone. Celle-ci joue un rôle important dans l'évolution de la vie sur terre, car elle empêche une grande partie des rayons solaires ultraviolets, qui sont nuisibles à la vie, de se rendre jusqu'au sol.

Les premières plantes apparurent il y a 2 milliards d'années et transformèrent une grande partie du gaz carbonique en oxygène.

### L'oxygène, un poison auquel la vie s'est adaptée.

L'évolution du taux d'oxygène dans l'air est liée à celle de la vie en général. Son accroissement progressif est le fait, des organismes multicellulaires et des plantes. Son accumulation a permis à la vie de se développer hors de l'eau. Ce processus se poursuit toujours et l'atmosphère d'aujourd'hui contient environ 78 % d'azote et 21 % d'oxygène.

L'oxygène ayant un pouvoir énergétique important, il est un poison pour les bactéries anaérobies (n'utilisant pas l'oxygène pour vivre). Le monde du vivant a répondu à ce problème, non sans avoir subi, à cause de l'accumulation de l'oxygène, une extinction massive. Comment ? Par l'invention de la respiration (cellulaire dans un premier temps, physiologique par la suite). Un équilibre efficace s'est constitué entre les besoins en oxygène, sa combinaison avec d'autres éléments, sa production, et sa dangerosité.

### Bien plus tard : L'air source de vie.

Les plus anciennes traces écrites ou dessinées des incursions de l'homme sous l'eau datent de l'Antiquité. L'idée relève du génie car elle permet de mettre en évidence l'existence de l'air indispensable à la survie.



## COMMENT L'AIR EN PLONGEE OXYGENE ?

La genèse de l'intrusion de l'homme sous l'eau évolua au XIX<sup>ème</sup> siècle avec le premier équipement « pieds lourds ».

La plongée moderne naît véritablement au XX<sup>ème</sup> siècle avec l'invention du scaphandre autonome.

Le milieu subaquatique nous offre un domaine d'exploration fabuleux en trois dimensions mais son accès n'est pas libre.

Nous sommes limités, sous l'eau, par ce que les physiiciens appellent la quatrième dimension : Le temps.

Notre séjour sous marin reste trop court, même dans les meilleures conditions. L'évolution de la plongée a été en grande partie accélérée par notre lutte contre le temps : les bouteilles contiennent de plus en plus d'air, les combinaisons isothermiques nous permettent de rester confortablement dans l'eau froide plus longtemps qu'auparavant.

Mais ce sont les contraintes physiologiques et physiques qui sont responsables des limites les plus draconiennes liées au temps et à la profondeur : le phénomène de saturation-désaturation et les accidents de décompression dûs à l'azote.

Pour se prémunir contre les accidents de décompression, le dernier outil utilisé par la plongée loisir est le Nitrox, mélange d'azote et d'oxygène.

Avec le Nitrox, on augmente la proportion d'oxygène, ce qui fait baisser celle de l'azote et par conséquent le risque d'accident pour un profil de plongée identique à l'air.

Loin du simple phénomène de mode, l'utilisation du Nitrox est en passe de devenir une technique répandue un peu partout dans le monde. Les plongeurs, de plus en plus souvent confrontés à cette technique, en découvrent les avantages et commencent à y porter un réel intérêt.



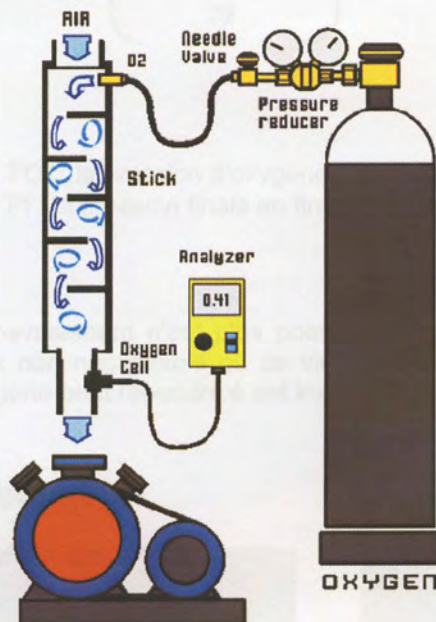


## COMMENT ENRICHIR L'AIR EN OXYGENE ?

Deux méthodes de fabrication couramment utilisées dans les structures plongées sont :

- le mélange par flux continu ou par injection directe.
- le mélange par pression partielle,

**Fabrication à injection directe ou flux continu :**



Cette méthode consiste à injecter l'oxygène pur directement à l'aspiration du compresseur. Une analyse en continu, en sortie du mélangeur, permet d'ajuster en temps réel l'injection de l'oxygène pour corriger d'éventuels écarts de concentration. L'utilisation de ce système est limitée à la fabrication de nitrox ne dépassant pas 40% d'oxygène.

Ce système est avantageux car il permet à moindre coût de démarrer une activité nitrox :

En utilisant le matériel standard, bloc et détendeur.

En mettant en œuvre un appareil de mélange simple offrant la possibilité de consommer la quasi-totalité de la bouteille d'oxygène.

Cette simplicité qui est un atout pour le bâton mélangeur est aussi un inconvénient car elle impose une attention toute particulière du technicien mélange qui doit maintenir la concentration d'oxygène en dessous des 40% pour ne pas risquer une auto-inflammation.

**Fabrication par pression partielle :**

C'est la méthode la plus employée pour réaliser des mélanges nitrox de décompression aux concentrations d'oxygène supérieures à 40%.

Le mélange est réalisé par transvasement d'oxygène pur vers un bloc de plongée « qualité oxygène » par l'intermédiaire d'une lyre de transfert.



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Pour la réalisation d'un nitrox à partir d'oxygène pur et d'air, il faudra déterminer dans un premier temps la pression d'oxygène pur à transvaser dans le bloc pour y ajouter ensuite l'air pour obtenir la pression finale de 200b.

La pression d'oxygène à introduire dans la bouteille est alors donnée par :

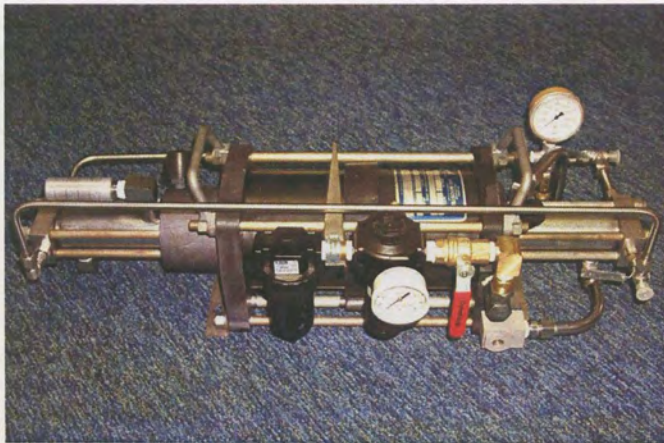
$$PO_2 = \left( \frac{\%O_2 - 21}{79} \right) \times Pf$$

On notera :

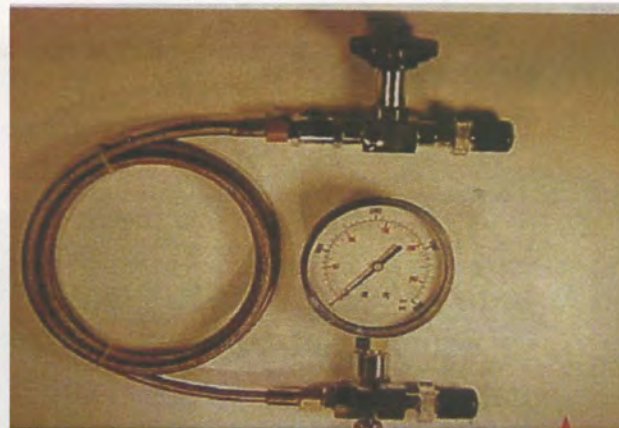
- $PO_2$  : la pression d'oxygène à transférer
- $Pf$  : la pression finale en fin de chargement

A l'équilibre des pressions, le transvasement n'est plus possible, ce qui oblige de rendre la bouteille d'oxygène avec un volume de gaz non négligeable ou de vider les blocs de plongée pour continuer le transfert. Seul le surpresseur d'oxygène peut répondre à cet inconvénient, mais son coût d'acquisition reste très élevé.

Surpresseur oxygène



Lyre de transfert



Ce principe de fabrication des mélanges demande beaucoup d'attention (précision des pressions partielles air, oxygène) et de temps (vitesse de remplissage 5 b /min).

En plus, l'air ajouté devra être exempt de toute particule pouvant s'enflammer en présence d'oxygène pur (traces d'huile, particules, etc. ...).

L'air « qualité respirable » d'une station conventionnelle, ne peut pas être utilisé pour un mélange sur de l'oxygène pur. Une surfiltration sera nécessaire pour maintenir une teneur en hydrocarbure à  $0.1\text{mg/m}^3$  au lieu de  $0.5\text{mg/m}^3$  préconisée par la norme européenne de l'air respirable NF N 12021.



## LES REACTIONS DE L'OXYGENE

### SECURISER LA FABRICATION DU NITROX

Les caractéristiques de l'oxygène pur imposent pour le gonflage au nitrox de suivre des règles plus rigoureuses que celles régissant les gonflages à l'air comprimé.

#### Inflammation

L'oxygène n'est pas inflammable. C'est plutôt un oxydant et un comburant très énergique qui se combine avec d'autres corps produisant de la chaleur. Tout corps brûlera en présence d'oxygène pur s'il est chauffé à une température suffisante. C'est la température d'auto-inflammation qui permet de classer les produits en fonction de leur compatibilité avec l'oxygène.

Les graisses et les huiles qui ont une température d'auto-inflammation basse, représentent un danger important en présence d'oxygène et provoquent un incendie très violent à effet immédiat.

Toutes les mesures de précaution visent à empêcher l'entrée en contact de l'oxygène avec tout ce qui est hydrocarbures, graisses, huiles... même en quantités infimes.

#### Oxydation

L'oxygène est corrosif et le contact du matériel avec des mélanges à haute concentration d'oxygène peut entraîner sa rapide détérioration par oxydation. Plus la concentration en oxygène est élevée, plus il y a d'oxydation.

Le vieillissement d'un flexible, d'un joint ou la corrosion d'un métal expose l'utilisateur à un risque dans le temps.



Incendie d'une station de transfert d'oxygène



## LES MEMBRANES ET LA PERMEATION GAZEUSE

### SECURISER LA FABRICATION DU NITROX

Deux types de membranes peuvent être utilisées pour la séparation des gaz. Les unes sont poreuses et séparent les gaz sur la base de leur masse molaire selon un mécanisme de diffusion dans des micropores. Les autres de séparation obtenus sont généralement trop petites pour permettre un flux de gaz.

Il apparaît clairement que le moyen de production le plus sécurisé pour produire l'air enrichi en oxygène consiste à utiliser les performances de la perméation gazeuse au travers de la mise en œuvre de faisceaux de fibres creuses dites membranes semi perméables.

Les systèmes proposés sont simples et sûrs puisqu'ils ne nécessitent à aucun moment le recours à l'oxygène pur. Il élimine ainsi les risques de manipulation d'un gaz extrêmement inflammable et de lourds réservoirs difficilement déplaçables. Ils n'imposent pas de matériel spécifique « oxygène »

La nouvelle source de gaz est l'air ambiant que le système par perméation gazeuse va, judicieusement, transformer en un gaz à la composition optimisée.

- Fabrication d'une fibre creuse semi-perméable

- Fabrication de modules « membranes »

- Les principes du faisceau de membrane gazeuse

- Les propriétés d'une unité d'enrichissement

- Les applications pour la production de Nitrox



### Fabrication d'un module « membrane gazeuse »

Les membranes semi-perméables sont les plus diverses. La séparation de l'hydrogène dans le gaz de raffinage, la récupération du méthane de biogaz, la séparation oxygène azote de l'air, etc. C'est un usage universel surtout pour réaliser des séparations fines, car elles ont les performances des membranes.

Les deux propriétés d'une membrane sont :

Qualités :

Une membrane artificielle à perméabilité sélective est une structure mince dotée de la suite de systèmes chimiques ou physiques appropriés de composés organiques ou inorganiques associés ou dissolus, issus de synthèse ou naturel.

La structure peut être continue ou discontinue, l'absence de matériau constitutif au point



## LES MEMBRANES ET LA PERMEATION GAZEUSE

Deux types de membranes peuvent être utilisés pour la séparation des gaz. Les unes sont poreuses et séparent les gaz sur la base de leur masse moléculaire selon un mécanisme de diffusion dans des micropores. Les facteurs de séparation obtenus sont généralement trop faibles pour présenter un intérêt industriel.

Les autres, appelées membranes non poreuses, mettent en oeuvre un mécanisme de dissolution-diffusion des gaz dans une fine couche de polymère dénuée de toute porosité.

C'est de ces dernières que nous allons parler. Commencé en 1979, le développement de ce type de membranes a conduit aux premières applications industrielles avec l'introduction par Monsanto des séparateurs PRISM pour la récupération d'hydrogène à partir de différents gaz de raffinerie et de pétrochimie.

La perméation gazeuse est en train de conquérir sa place parmi les techniques de production de nitrox. Pour mieux comprendre ce principe, nous aborderons successivement les points suivants :

- Fabrication d'une fibre creuse perméable
- l'élaboration du module « membrane »
- les principes de base de la perméation gazeuse»
- Les propriétés d'une unité d'enrichissement d'air
- les applications pour la production de nitrox.

### Fabrication d'une fibre creuse perméable

Les membranes semi-perméables sont utilisées par les industries les plus diverses : la séparation de l'hydrogène dans le gaz de raffinerie, la purification des gaz naturels, la récupération du méthane du biogaz, la séparation oxygène azote de l'air etc....

Cet usage universel, surtout pour réaliser des séparations fines, nécessite que soient connues les performances des membranes.

Les deux propriétés d'une membrane sont :

- sa perméabilité
- sa sélectivité

#### Généralités :

Une membrane artificielle à perméabilité sélective est une structure mince obtenue à la suite de traitements chimiques ou physiques appropriés de composés organiques ou inorganiques associés ou combinés, issus de synthèse ou naturel.

La structure peut être continue ou discontinue, l'absence de matériau constitue un pore.



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

La membrane peut être poreuse :

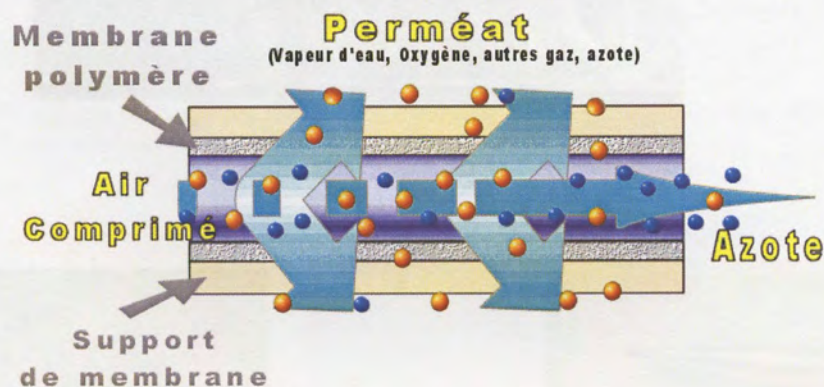
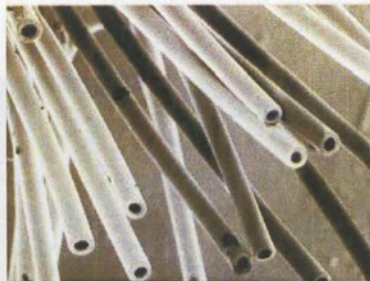
- micropores 1,5 à 1,6  $\mu$
- mésopores 2 à 50  $\mu$
- macropores > 50  $\mu$

Ou non poreuse, membrane dense pour la perméation gazeuse. Elle est constituée sous forme d'un fil creux dont la paroi constitue la membrane.

Pour obtenir une perméabilité sélective élevée, il est nécessaire que la barrière soit la plus mince possible d'où une certaine fragilité. A l'heure actuelle, pour pallier à cet inconvénient, la structure mince est consolidée en la réalisant :

En même temps qu'un support à pores plus gros,

Sur un support poreux de même nature ou de nature différente.



### Procédé de fabrication :

Les fibres creuses sont obtenues par un mélange judicieux incluant des polymères (polyamides, polycarbonates ...) sous diverses formes ainsi que différents additifs et solvants. Le mélange devient une substance que l'on fait passer par extrusion au travers d'une filière annulaire de 120 microns de diamètre. L'orifice à l'intérieur de la fibre est réalisé par injection microscopique d'un solvant pour réaliser un trou de 80 microns.



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

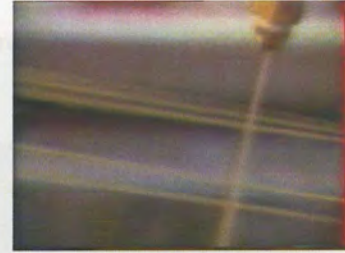
On procède dès la formation de la fibre creuse à une coagulation interne ou externe, soit en injectant dans la fibre un liquide de coagulation soit en passant la fibre obtenue dans un bain de coagulation. Le liquide de coagulation peut être par exemple de l'eau, avec éventuellement, en faible proportion, des solvants.



Filière annulaire

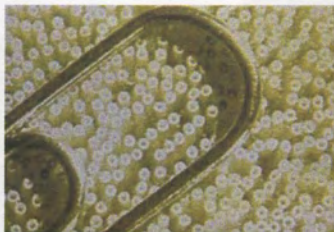
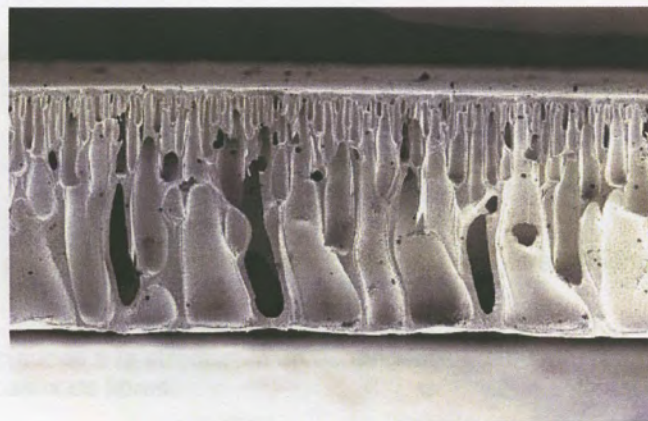


Coagulation du polymère



Les fibres creuses sont composées :

- D'une couche poreuse, constituée d'alvéoles en communication entre elles dont les dimensions moyennes sont comprises entre 0,5 et 20 microns. Ces alvéoles n'ont pas de forme géométrique bien définie et c'est pour cela que le terme diamètre de pores n'est pas utilisé. Le volume des alvéoles représente entre 30 et 70 %.
- D'une couche dense ou active dont l'épaisseur est comprise entre 0,1 et 1 micron, cette dernière étant sur la paroi externe ou sur la paroi interne des fibres creuses.





## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Une fois la fibre réalisée, elle est lovée dans un fût pour subir une succession d'opérations :

Lavage pour nettoyage des solvants résiduels

Séchage

Regroupement des fibres en deux fois douze paires pour réaliser un fil qui est mis sous forme de bobine.

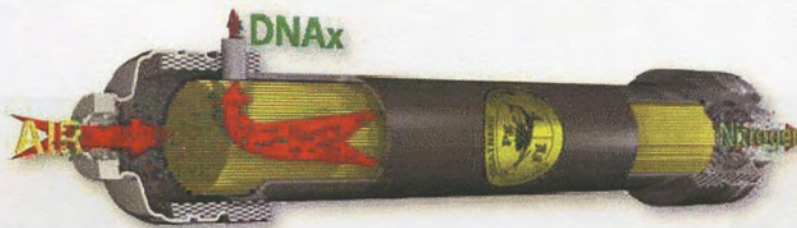


Les fibres sont prêtes pour réaliser des modules « membranes ».

### L'élaboration du module « membrane »

Les membranes de polymère sous forme de fibres doivent être assemblées dans des modules ou perméateurs.

Un module de fibres creuses a la structure d'un échangeur de tubulaire. La principale difficulté consiste en la réalisation des faisceaux de fibres.



Pour ce faire, il est utilisé une machine qui ressemble à un métier à tisser. Des milliers de brins sont assemblés en parallèle sous forme de rouleau cylindrique. Chaque unité cylindrique d'un mètre de long contient 400km de fibres.



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Les extrémités sont scellées à l'aide de colle époxy polyuréthane. Afin de permettre à l'air comprimé de circuler de part et d'autre à l'intérieur de la fibre creuse, les extrémités sont ouvertes par tranchage.

Un usinage de précision permet d'assurer que chaque fibre ait une coupe correcte. C'est cet usinage (délicat) qui permet de dégager les minuscules ouvertures de chaque fibre.



Réalisation d'un faisceau de fibres



Encollage des extrémités



Tronçonnage des extrémités

Usinage des faces pour que chaque extrémité de fibre soit bien ouverte



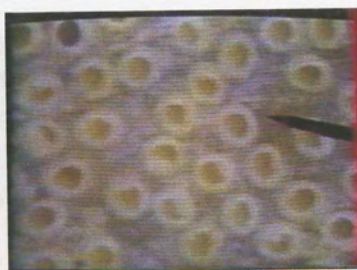
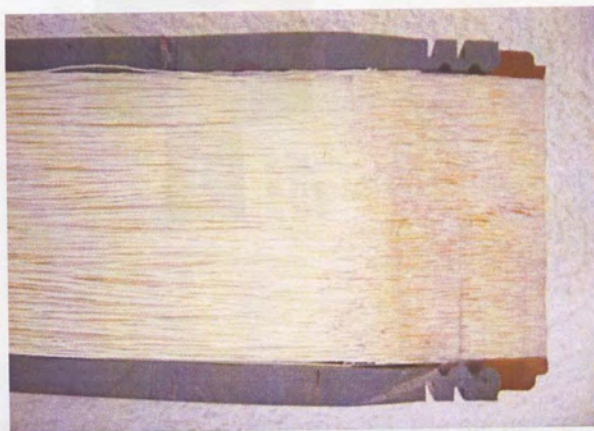


## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Pour assurer un contact intime entre l'air et la couche active de la membrane, avec la perte de charge la plus faible possible pour limiter la dépense énergétique. Le module de membrane est placé dans une enveloppe cylindrique en acier inoxydable, aluminium ou P.V.C pouvant travailler entre la température ambiante et 60°C sous des pressions allant jusqu'à 15 bars.



Module membrane en coupe

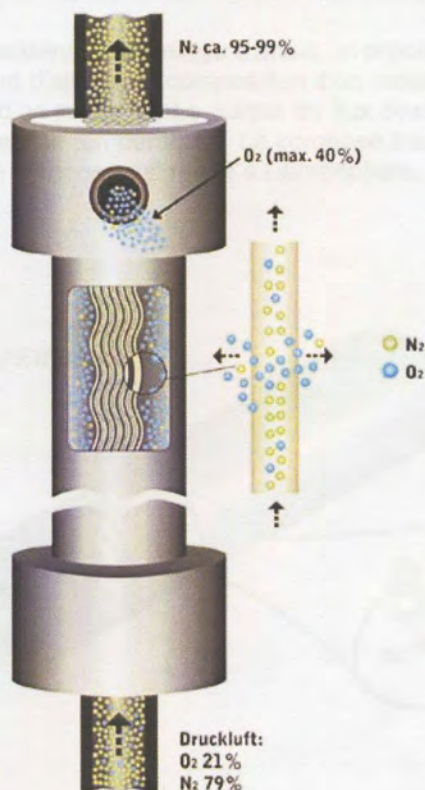


Vue extrémités fibre au microscope électronique

Dans chaque module de membrane, près de 400 000 sections de fibres sont contrôlées au microscope électronique pour s'assurer qu'elles soient toutes complètement ouvertes. Chaque module est contrôlé individuellement et qualifié en sélectivité et productivité.



## Les principes de base de la perméation gazeuse



### Généralités :

Une membrane à perméabilité sélective est une barrière matérielle qui permet l'arrêt ou le passage sélectif d'un gaz sous l'action d'une force agissante entre les deux volumes qu'elle sépare. La perméabilité de la membrane, caractérisée par le flux transmembranaire, est directement relié à l'intensité de cette force.

Le phénomène de perméation résulte du déséquilibre entre l'amont et l'aval de la membrane, et fait essentiellement intervenir un mécanisme qui comporte trois étapes :

- dissolution des molécules de gaz à la surface de la membrane côté haute pression (solubilité),
- diffusion des molécules à travers le polymère jusqu'à la face opposée,
- désorption des molécules côté basse pression.

La perméation gazeuse a pour atout principal la simplicité d'un procédé « sec » à température modérée, permettant un traitement continu après une étape de compression ou en profitant d'une pression disponible.

### Principe :

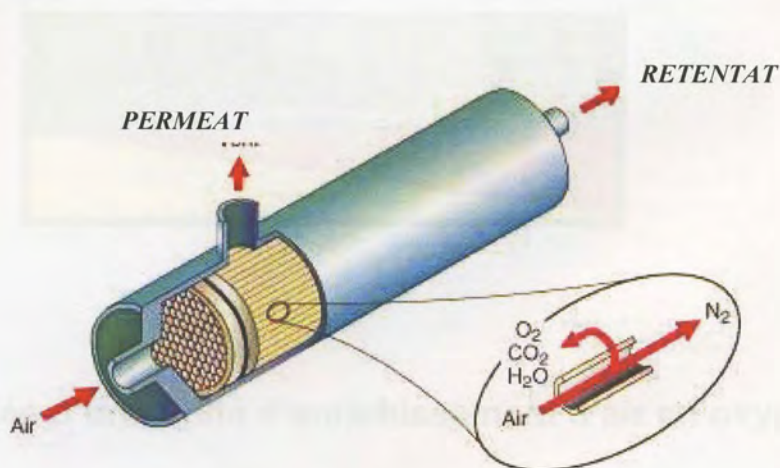
C'est la couche mince qui contrôle le passage sélectif des molécules de gaz. La perméabilité d'une même molécule dans divers polymères peut varier de 1 à  $10^6$  tout comme la perméabilité de diverses molécules dans un même polymère. L'oxygène, l'eau, le dioxyde de carbone diffusent plus rapidement que l'azote à travers les membranes (l'oxygène va 2 à 8 fois plus vite que l'azote, l'eau va 100 fois plus vite que l'oxygène).



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Le mélange gazeux contenant un ou plusieurs composés est appelé la charge. Sous l'effet d'une différence de pression entre l'amont et l'aval de la membrane, le gaz "rapide" traverse la paroi membrane plus facilement que le gaz "lent", le mélange de gaz est ainsi séparé en deux flux.

La perméation gazeuse doit être considérée, davantage comme un procédé de fractionnement, que comme un procédé de séparation, permettant d'ajuster la composition d'un mélange, d'épurer un gaz mais non de séparer totalement les constituants d'un mélange. La pureté du flux désiré peut être ajustée en changeant les conditions opératoires (débit, pression température). Le composé traversant la membrane est appelé le perméat. Le gaz support appauvri en composé est rejeté à l'atmosphère, il est appelé le retentat.



Ce transfert de gaz à travers le polymère résulte d'un mécanisme de dissolution-diffusion, le gaz se dissout d'abord dans la phase polymère avant d'être transporté par un processus de diffusion.

Le coefficient de perméabilité est égal au produit des coefficients de solubilité et de diffusion.

- le coefficient de solubilité est d'autant plus élevé que la molécule peut se condenser facilement (une molécule se condense d'autant plus facilement dans un polymère qu'elle est grosse)
- le coefficient de diffusion d'une molécule pour un polymère donné est d'autant plus élevé que la molécule est petite. (mesure de mobilité d'une molécule sous l'influence de son propre gradient de concentration dans un matériau donné)

Diamètre cinétique de quelques gaz		
Gaz		Diamètre (pm)
Helium	He	260
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	330
Argon	Ar	340
Oxygène	O <sub>2</sub>	346
Azote	N <sub>2</sub>	364

SOURCE : Technique de l'ingénieur

D'une manière générale, les perméabilités des gaz dans les matériaux polymères ne sont pas constantes et varient avec la pression et fortement avec la température.

La perméabilité de la membrane s'exprime en « BARRER »



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

### Comparaison :

La production de nitrox en partant de l'air ambiant définit la perméabilité de l'oxygène au sein d'une membrane. On peut aisément comparer la perméabilité d'un gaz composé « Gc » à celle de l'oxygène « Go<sup>2</sup> ». Le rapport  $Gc/Go^2$  définit la sélectivité de la membrane. Cela permet d'apprécier le nombre de molécules du gaz composé pouvant traverser la membrane pendant le passage d'une molécule d'oxygène et ainsi procéder à une classification par vitesse de transfert des gaz.

Classification des gaz en fonction de leur aptitude à la perméation



### Les propriétés d'une unité d'enrichissement d'air en oxygène

Si la perméation gazeuse trouve sa place technique et économique dans le domaine de la plongée nitrox, c'est en raison de progrès accomplis dans l'ensemble des éléments constitutifs d'une « solution membrane », grâce à la mise en œuvre de ces modules, dans des systèmes d'enrichissement d'air intégrant les fonctions nécessaires à la protection des fibres contre le risque d'un vieillissement prématuré ou d'une pollution accidentelle.

Les matériaux polymères de perméation gazeuse, comme tous les matériaux actifs pour la séparation des gaz, sont relativement fragiles et susceptibles d'être désactivé (partiellement ou complètement de manière irréversible) par des impuretés de nature différente. La désactivation des membranes polymères peut être provoquée par simple colmatage, par occupation permanente des volumes libres ou même par destruction des matériaux.

De manière générale, les membranes de perméation gazeuse doivent être équipées de dispositif de protection tels que des filtres, des systèmes de séparation par condensation ou des unités d'épuration par adsorption. Une attention particulière doit être prêtée aux conditions opératoires afin d'éviter la condensation des vapeurs au sein des membranes.

Les polluants sont :

- les particules solides qui peuvent obstruer les orifices des fibres.
- La présence à l'état liquide, ou vapeur d'eau, et de lubrifiant qui détruit la perméabilité de la membrane.
- Les concentrations des gaz indésirables à la pratique de la plongée.

Chaque fabricant protège le module membrane et produit une qualité de nitrox avec des dispositifs de filtration de plus en plus modernes qui progressivement filtrent en profondeur les polluants du type :

- Huile et eau à l'état liquide par séparation centrifuge,
- Particules solides par filtration mécanique,
- Huile et eau à l'état de microgouttelettes par filtration submicronique,
- Huile et eau à l'état vapeur par réfrigération ou adsorption,
- Le monoxyde et le dioxyde de carbone par adsorption.



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

### La séparation centrifuge :

L'air après refroidissement condense :

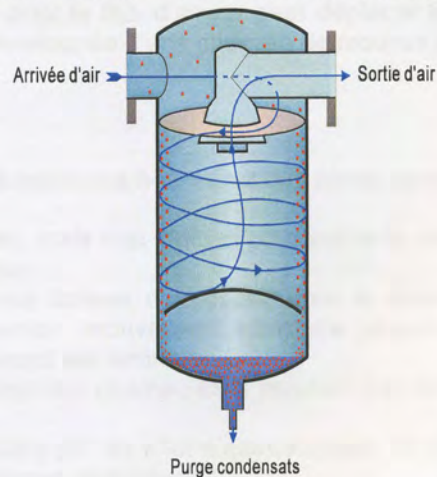
- de l'eau contenue dans l'air,
- de l'huile expulsée par le compresseur.

Cette condensation se réalise par formation d'un brouillard, formé de fines gouttelettes en suspension dans l'air.

Le séparateur capte ces liquides par inertie :

- en utilisant leur différence de densité par rapport à l'air qui les entraîne,
- en provoquant de brusque changement de direction et de vitesse de circulation du flux d'air, projetant les gouttelettes sur une paroi où elles s'écoulent.

Principe : Des canaux créent un effet de tourbillon appelé <effet cyclone>, qui accélère la vitesse du passage de l'air. La force du choc sur les parois du séparateur détache du flux d'air des gouttelettes d'huile, d'eau, de grosses particules solides et celles-ci coulent ainsi au fond du séparateur.



### La séparation mécanique :

Une barrière mécanique est créée par un élément poreux. Le flux d'air le traversant, les particules solides heurtent l'élément filtrant et sont collectées dans les pores.

Seuil de filtration : de 50 à 1 micron.

Les particules prises dans les éléments filtrants bloquent les pores et entraînent un colmatage du filtre. Afin d'éviter un colmatage trop rapide, il est utilisé pour cette technique des éléments de grandes surfaces.

La matière des éléments filtrant peut être :

- Du polyéthylène pur moléculaire, ces granulés sont chauffés jusqu'à fusion, pour former une structure en labyrinthe,
- De la poudre d'acier inox ou d'alliage de cuivre, agglomérée sous haute pression et à haute température, afin de donner une rigidité suffisante à l'élément poreux, et le grade de filtration souhaité (opération de frittage).





### La filtration submicronique :

La coalescence, ou regroupement des particules liquides en gouttes, est la principale méthode pour éliminer la contamination de l'air par l'eau et l'huile.

Le processus de filtration est purement mécanique : il est basé sur le contrôle du passage de l'air, sa vitesse d'écoulement à travers une couche fibreuse d'une porosité prédéterminée formée de brins microscopiques et présentant une charge électrostatique constante.

Le matériau utilisé doit présenter des caractéristiques précises :

- Grande résistance, ne risquant pas de se désagréger et de contaminer l'air,
- Insensible aux agents chimiques et autres substances agressives contenues dans l'air comprimé,
- Hydrofuge (qui s'oppose au passage de l'eau),
- Non toxique.

Les fibres de verre au borosilicate, d'un diamètre moyen de 0,5 micron, répondent à ces conditions.

Le réseau des fibres de borosilicate laisse entre elles des pores de plus en plus fins dans le sens du parcours de l'air. Cet ensemble de fibres est contenu et maintenu par deux grilles, une interne et une externe, en acier inoxydable ; ainsi le flux d'air ne peut déplacer les fibres, même sous l'effet de chocs pulsatoires. La cartouche est enveloppée d'une chemise de mousse synthétique.

### Principe de filtration

Les particules de dimensions supérieures à la trame des fibres, sont arrêtées par l'impact direct contre les fibres.

Celles de dimensions inférieures, mais trop lourdes pour suivre le cheminement inter fibres complexe, sont retenues par effet électrostatique.

Les microparticules solides sous formes d'aérosols, dont le diamètre est inférieur à 0,1 micron, sont animées du mouvement Brownien, mouvement vibratoire perpendiculaire à la direction principale du mouvement, alors que l'écoulement est laminaire.

Ceci augmente considérablement leur chemin, elles finissent par rentrer en collision et adhérer entre elles et les microfibrilles.

L'action de filtration est complétée par un effet électrostatique, dû au frottement de l'air sur les fibres, qui attirent les microparticules à charges opposées.

L'agglutination des plus infimes particules, permet de former de plus grosses gouttelettes, qui, repoussées vers l'extérieur de la cartouche, s'écoulent par gravité sur la partie inférieure du filtre, au travers de son manchon de mousse synthétique.

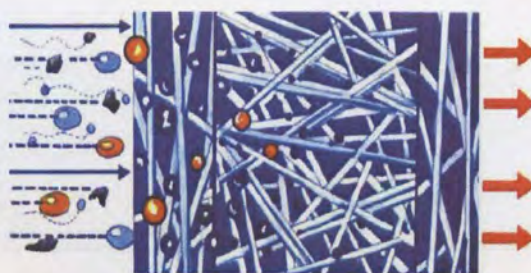
Ainsi, la force de pesanteur des gouttelettes d'aérosols en périphérie de la cartouche coalescente, est supérieure à la vitesse du flux d'air.

La surface filtrante est prédéterminée de manière à ce qu'aucune gouttelette d'aérosol ne puisse être emportée par le courant d'air.

L'évacuation des aérosols collectés est réalisée par une purge.

- Degré d'efficacité 99,9999 % pour les particules jusqu'à 0,01 micron.

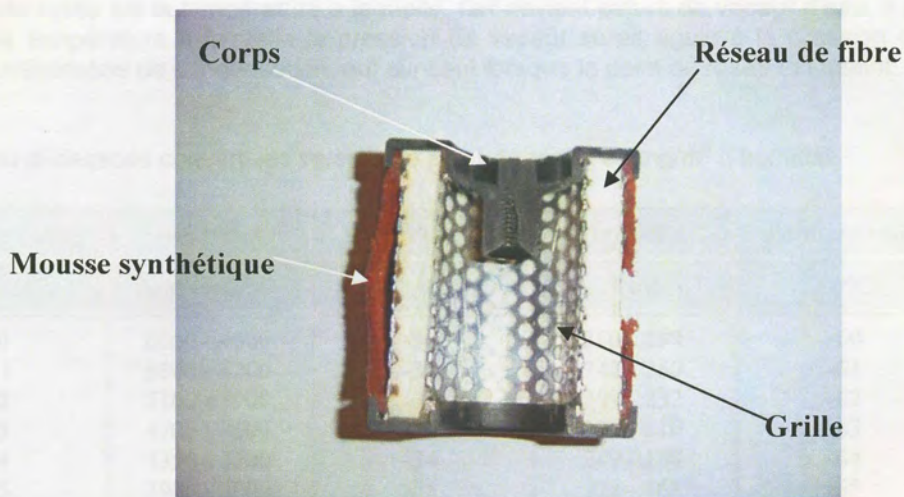
- Aérosols : (Larousse) Suspension de particules très fines, solides ou le plus souvent liquides, dans un gaz.



Trame de borosilicate



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

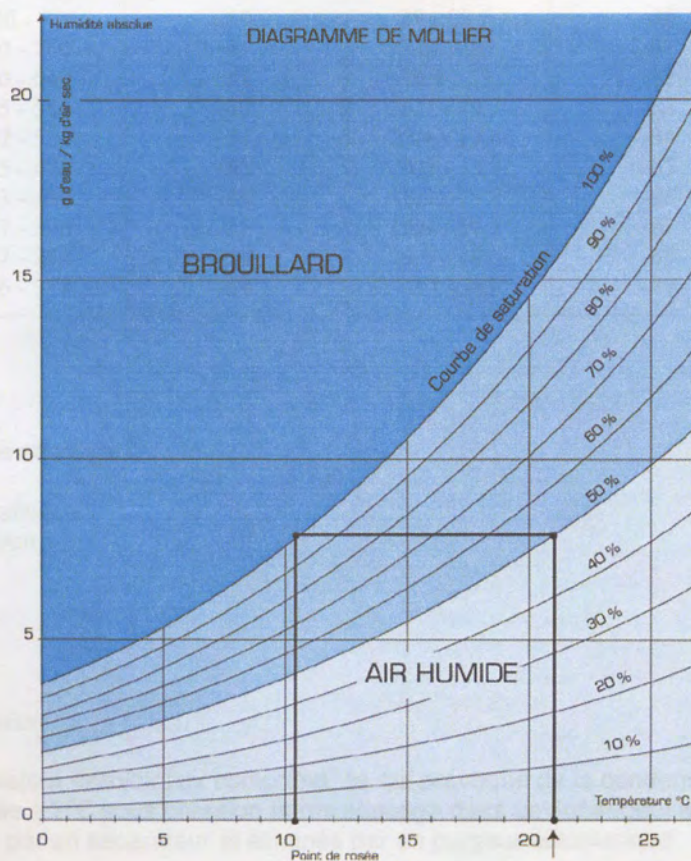


Cartouche de filtre à séparation par coalescence

### Filtration de l'humidité :

La compression de l'air aboutit à une augmentation de la concentration de vapeur d'eau qu'il contient. Cette vapeur se condense et devient liquide lorsque l'air comprimé est refroidi. Le «point de rosée» correspond à la saturation de l'air en eau, pour une température et une pression donnée. Une diminution de la température provoque la condensation de la vapeur.

Le diagramme de MOLLIER permet de déterminer la température de point de rosée en fonction de la concentration d'humidité.





## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Le point de rosée est la température à laquelle, l'air devient saturé de vapeur d'eau. Il peut aussi être défini comme la température à laquelle la pression de vapeur serait égale à la pression de vapeur saturante. C'est le phénomène de condensation, qui survient lorsque le point de rosée est atteint.

Le tableau ci-dessous converti les valeurs de point de rosée en  $\text{mg/m}^3$  d'humidité.

Point de rosée	Humidité	Point de rosée	Humidité	Point de rosée	Humidité
T (°C)	ppm - $\text{mg/m}^3$	T (°C)	ppm - $\text{mg/m}^3$	T (°C)	ppm - $\text{mg/m}^3$
-0	6000 - 4600	-30	380 - 288	-60	10,6 - 8
-1	5500 - 4200	-31	342 - 260	-61	9,2 - 7
-2	5100 - 3900	-32	309 - 232	-62	8 - 6,15
-3	4700 - 3600	-33	276 - 210	-63	6,98 - 5,31
-4	4350 - 3300	-34	249 - 188	-64	6,08 - 4,61
-5	3980 - 3000	-35	222 - 168	-65	5,28 - 4,02
-6	3650 - 2780	-36	200 - 151	-66	4,58 - 3,48
-7	3380 - 2550	-37	179 - 135	-67	3,96 - 3
-8	3080 - 2300	-38	162 - 122	-68	3,40 - 2,60
-9	2840 - 2140	-39	144 - 109	-69	2,94 - 2,24
-10	2590 - 1950	-40	128 - 97	-70	2,53 - 1,93
-11	2360 - 1790	-41	114 - 86	-71	2,17 - 1,65
-12	2160 - 1640	-42	102 - 77	-72	1,87 - 1,42
-13	1980 - 1500	-43	90 - 68,5	-73	1,61 - 1,23
-14	1800 - 1360	-44	80 - 61	-74	1,37 - 1,04
-15	1650 - 1250	-45	71,9 - 54,1	-75	1,17 - 0,89
-16	1500 - 1140	-46	63,5 - 48	-76	1,01 - 0,765
-17	1360 - 1040	-47	56,2 - 42,5	-77	0,86 - 0,659
-18	1250 - 940	-48	49,9 - 37,8	-78	0,73 - 0,558
-19	1140 - 860	-49	44 - 33,3	-79	0,618 - 0,466
-20	1030 - 790	-50	39 - 29,5	-80	0,522 - 0,399
-21	940 - 710	-51	34,2 - 26	-81	0,498 - 0,340
-22	860 - 640	-52	30,4 - 23	-82	0,378 - 0,288
-23	765 - 580	-53	26,7 - 20,3	-83	0,315 - 0,240
-24	697 - 527	-54	23,4 - 17,8	-84	0,262 - 0,189
-25	625 - 478	-55	20,6 - 15,7	-85	0,221 - 0,168
-26	553 - 430	-56	18,2 - 13,8	-86	0,186 - 0,141
-27	517 - 390	-57	15,9 - 11,1	-87	0,156 - 0,118
-28	467 - 352	-58	13,9 - 10,6	-88	0,130 - 0,099
-29	426 - 318	-59	12,1 - 9,2	-89	0,110 - 0,083

Il existe deux principes de séchage :

- le sécheur par réfrigération,
- le sécheur par adsorption.

Le séchage par réfrigération :

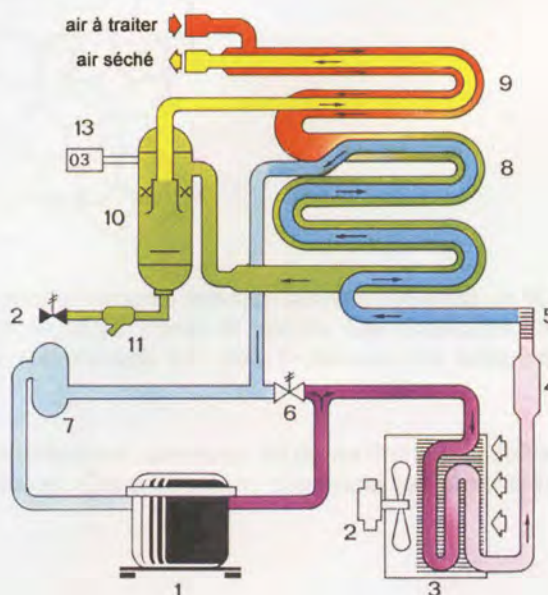
Ce type de filtration consiste à refroidir l'air comprimé, ce qui provoque de la condensation. Il permet d'obtenir un point de rosée à 2°C sous pression après passage dans un échangeur air/réfrigérant. Les condensats sont retenus par un séparateur et éliminés par un purgeur automatique



**Principe du sécheur à réfrigération.**

Le compresseur (1) pompe le réfrigérant à l'état gazeux, le condensateur (3) a le rôle de faire passer le réfrigérant de l'état gazeux à l'état liquide par refroidissement à l'aide du motoventilateur(2). Le réfrigérant liquide passe par le filtre déshydratateur (4) pour éliminer l'humidité éventuelle dans le circuit frigorifique. La vanne thermostatique (5) régule le débit de réfrigérant injecté dans l'évaporateur (8) pour y produire la température désirée. L'évaporateur (8) se présente sous forme d'échangeur. C'est à l'intérieur que le réfrigérant est évaporé par la chaleur extraite de l'air comprimé chaud. Le débit du réfrigérant s'effectue à contre courant du débit d'air, ce qui procure un échange thermique particulièrement efficace. L'électrovanne (6) est un by-pass qui s'ouvre lorsque la température d'évaporation atteint 2°C .Son rôle est d'éviter la formation de givre dans l'évaporateur. La température est maintenue entre +2 et +3 °C afin de produire le point de rosée spécifié. Le séparateur de condensats (10) de conception cyclonique procure la séparation du flux d'air et des liquides. L'évacuation des condensats est assurée par une l'électrovanne (12) temporisée en intervalles et durée de purge.

- 1 compresseur frigorifique
- 2 motoventilateur
- 3 condensateur
- 4 filtre déshydratateur
- 5 valve thermostatique
- 6 électrovanne de contrôle du réfrigérant
- 7 séparateur du réfrigérant liquide
- 8 évaporateur
- 9 échangeur air-air
- 10 séparateur des condensats
- 11 filtre mécanique
- 12 électrovanne de purge des condensats
- 13 thermostat ou téléthermostat



**Le sécheur par adsorption :**

Il permet d'atteindre un point de rosée de 0 °C à - 70 °C sous pression. Le produit adsorbant (zéolites...), retient la vapeur d'eau de l'air sans subir de modification structurale, ce qui lui permet d'être régénéré. Ce type de sécheur est recommandé pour obtenir de l'air mis en contact avec des produits se désagrégeant par adsorption d'eau.

C'est seulement à partir de 1920 qu'on a mis en évidence le fait que ces matériaux étaient capables d'absorber des vapeurs organiques. On s'est également rendu compte que certaines de ces zéolites naturelles pouvaient fonctionner comme de véritables tamis de molécules, d'où leur nom générique de tamis moléculaire.

L'étude systématique des zéolites naturelles et de leurs propriétés, comme tamis moléculaire a été commencée par R. M. Barrer et ses collaborateurs vers 1930. De plus, cette même équipe de chercheurs a préparé pour la première fois des zéolites synthétiques. Depuis lors, toutes les grandes compagnies chimiques et pétrolières ont eu des activités dans ce domaine et ne cessent de déposer des brevets sur la préparation et les applications de zéolites nouvelles. Jusqu'à présent, toutes les zéolites naturelles ont été synthétisées, et, en outre, plusieurs nouvelles zéolites synthétiques, dont la structure n'existe pas dans la nature, sont connues. Entre-temps, toute une gamme de zéolites synthétiques a trouvé des applications industrielles comme échangeur de cations, tamis moléculaire, catalyseur et épurateur chimique. En 1983, l'étude des zéolites est un domaine scientifique et industriel en plein développement.



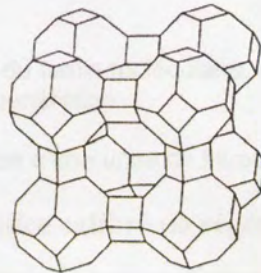
## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Le séchage des fluides est une des applications les plus répandues. Les tamis moléculaires (surtout la zéolite A) fixent énergiquement l'eau jusqu'à saturation pour atteindre des points de rosés plus performant que le sécheur à réfrigération (-30°C à -70°C). Les colonnes de tamis sont régénérables.

La purification des fluides pour piéger du CO<sub>2</sub> : Ce principe de filtration est couramment utilisé dans les centrales de liquéfactions d'air pour éviter la formation de gel dans les tuyauteries.

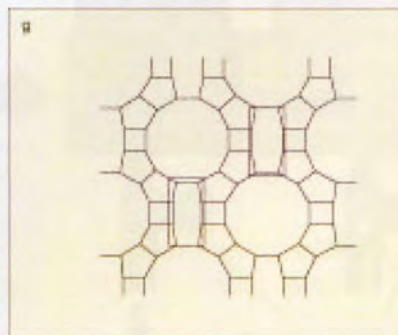
L'enrichissement d'air en oxygène : l'oxygène est adsorbé préférentiellement à l'azote sur des tamis moléculaires de types A et X.

Chimiquement, les zéolites (naturelles ou synthétiques) sont des aluminosilicates. Leurs structures, ou leurs réseaux cristallins, sont constituées par des enchaînements tridimensionnels liés par leurs sommets.



La charpente d'aluminosilicate, formée par ces enchaînements tridimensionnels, délimite un espace vacant. Cet espace est organisé en un réseau complexe de pores, cages et cavités. Les molécules d'eau occupant normalement ce réseau poreux peuvent être remplacées par des molécules de taille inférieure à la dimension des pores.

Le système poreux peut être mono-, bi- ou tridimensionnel, composé de pores droites, ondulaires ou même formé par des cages avec des fenêtres communes. Cette structure détermine les propriétés spécifiques comme tamis moléculaire et catalyseur sélectif.



### Tamis moléculaires ou adsorbants

Les propriétés adsorbantes particulières des zéolites sont déterminées par : la sélectivité dimensionnelle, la capacité et l'énergie d'adsorption.

L'espace vide dans une zéolite est constitué par les dimensions de ses pores et cages qui conduisent à la sélectivité dimensionnelle. Le diamètre des pores et des cages communiquant entre elles par des fenêtres, est fixé pour une structure donnée entre 3,4 et 5 Angströms (10 000 angströms égale 1 micron).



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

La capacité d'adsorption est déterminée par la densité du matériau : plus la densité de la zéolite est faible, plus sa capacité d'adsorption est élevée.

L'énergie d'adsorption est le travail dégagé quand une molécule est fixée dans les pores zéolitiques. Celle-ci détermine la force de l'adsorption ; c'est une mesure de l'énergie nécessaire pour « désorber » l'édifice cristallin.

La capacité d'adsorption des cartouches de tamis moléculaires :

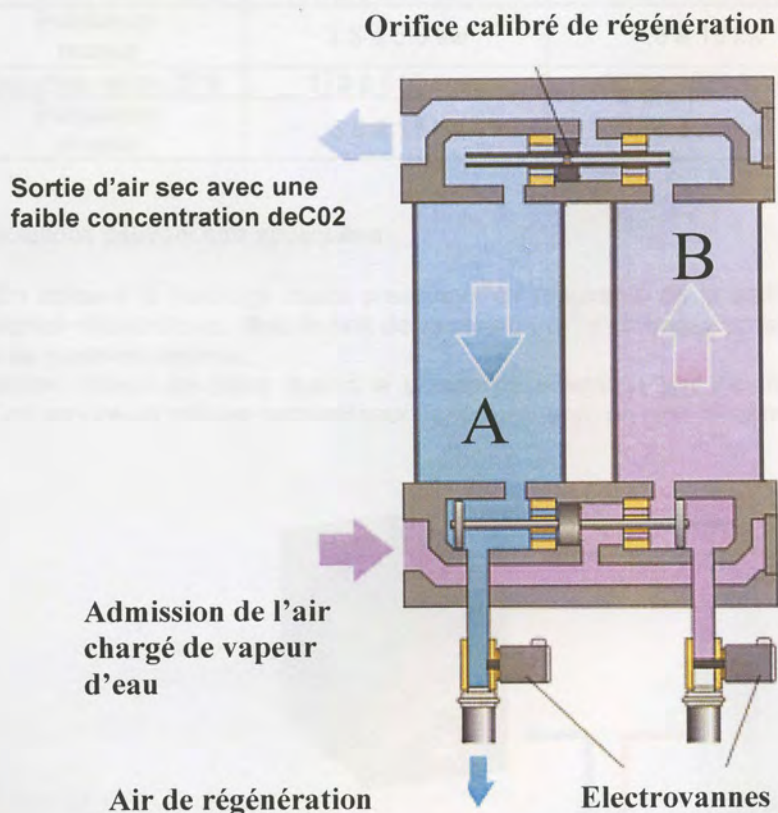
La durée de vie du tamis moléculaire utilisée pour la rétention d'eau est limitée dans le temps.

Exemple :

- 700 G de tamis moléculaire.	}	Saturation
- à une température de 30°C	}	Totale
- Pour un compresseur de 14 m <sup>3</sup> /h	}	en 40 H.

Pour maintenir, dans le temps, l'efficacité du tamis moléculaire, on peut utiliser de gros volume d'adsorbant ou équiper la filtration d'un système de régénération.

Schéma de principe d'une unité de filtration à régénération :



Le sécheur comporte deux colonnes chargées d'un tamis moléculaire. L'air comprimé est dirigé sur la colonne B, où la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone sont absorbés par le tamis moléculaire. Dans le même temps, le tamis moléculaire de la colonne A est régénéré par le passage à contre-courant d'un faible débit d'air déjà déshydraté, prélevé dans la colonne B.

Avant que le tamis moléculaire de la colonne B ne soit saturé en eau, un système de vannes, contrôlé par le système de commande, inverse le flux d'air. C'est au tour de la colonne A d'assurer le séchage, tandis que la colonne B passe en phase de régénération. La purge d'air est interrompue pour réduire au minimum la consommation d'énergie. L'alternance des cycles séchage et régénération permet de disposer d'un débit continu d'air sec et propre.



## PROCESS DE PRODUCTION D'UNE UNITE DE NITROX

### Production d'air :

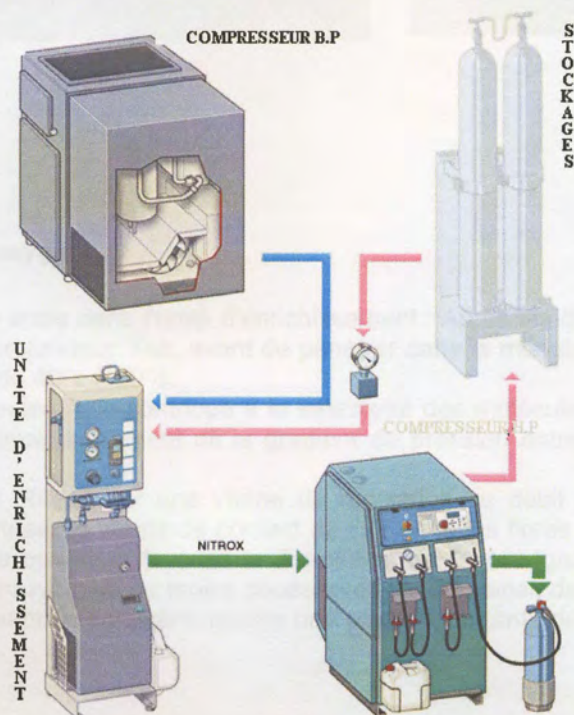
Produire du nitrox en partant de l'air ambiant nécessite une source d'air basse pression pour l'alimentation de l'unité d'enrichissement d'air.

Tableau de comparaison DEBIT AIR- CONCENTRATION D' OXYGENE- PUISSANCE MOTEUR			
Débit entrée membrane	212 à 708 l/min	354 à 1416 l/min	708 à 1770 l/min
Température de fonctionnement	43°C	43°C	43°C
Pression membrane	6 à 11 b	6 à 11 b	6 à 11 b
Production nitrox 40%	170 à 283 l/min	283 à 566 l/min	566 à 708 l/min
Puissance moteur	3.8 à 5.5 kw	7.5 à 15 kw	15 à 19 kw
Production nitrox 32%	170 à 510 l/min	283 à 1020 l/min	566 à 1274 l/min
Puissance moteur	3.8 à 11 kw	7.5 à 23 kw	15 à 30 kw

Deux solutions peuvent être appliquées :

En utilisant le stockage haute pression d'air respirable de la station de gonflage : Ce procédé est d'apparence économique. Mais le prix de revient du m<sup>3</sup> d'air basse pression est plus élevé en utilisant de l'air haute pression détendu.

Ce système trouve sa place quand la puissance électrique est insuffisante (groupe électrogène) pour mettre en service un groupe compresseur basse pression, en plus du compresseur haute pression.





## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

En produisant un air basse pression en débit suffisant et en continu avec une machine : Avec plus de 50 années d'application industrielle, le compresseur à vis fait office de référence.

Ses principaux avantages sont :

- une production continue d'air sans baisse de rendement,
- un entretien réduit au strict minimum,
- une régulation maintenant une pression rigoureusement constante,
- un déshuilage de l'air au moyen d'un séparateur très élaboré.

Principe de compression :

Deux rotors asymétriques constituent le cœur du compresseur. Le rotor mâle à quatre lobes, refoule l'air dans les six rainures du rotor femelle. Entraîné par le flux d'air, ce rotor est parfaitement libre, d'où la puissance absorbée minimale et son usure insignifiante. L'huile injectée dans la partie basse du carter absorbe la chaleur produite par la compression, empêche le contact des rotors et assure la lubrification des roulements.

Des lumières alternatives dévoilées par le jeu des rotors constituent, à chaque extrémité du carter, les orifices d'aspiration et de refoulement.

Le ventilateur intégré assure un refroidissement optimal de tous les composants en fonctionnement.

La régulation auto-asservie permet d'adapter le débit de gaz produit à la consommation. Il s'agit d'une régulation tout ou rien, avec arrêt différé.



### Enrichissement de l'air en oxygène :

Le débit d'air basse pression entre dans l'unité d'enrichissement : Après les différentes étapes de filtration pour traiter les polluants en profondeur, l'air, avant de pénétrer dans le module membrane, est réchauffé et maintenu à une température de 40°C à 60°C.

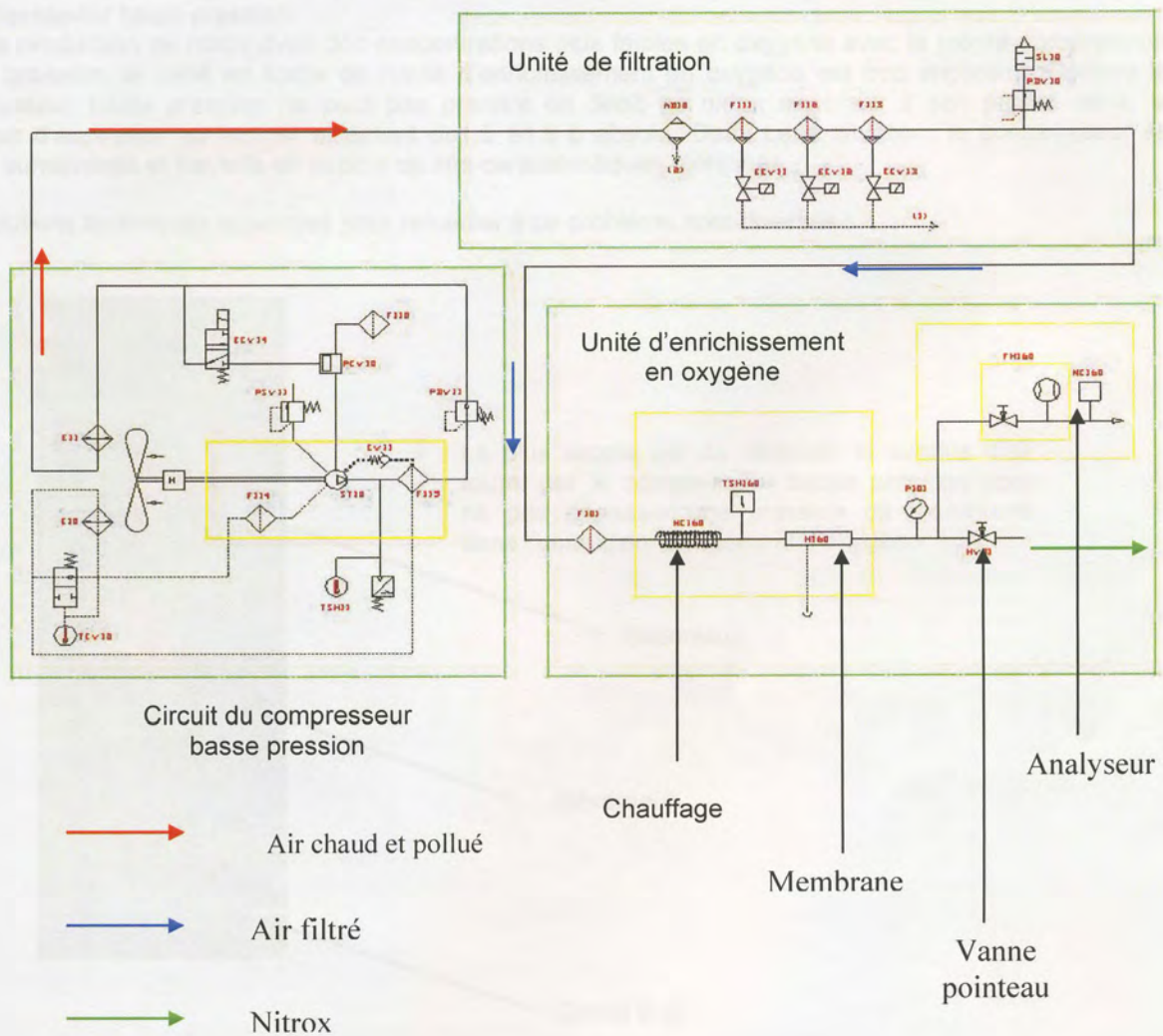
Cette étape est essentielle, puisqu'elle contribue à la sélectivité des molécules (dissolution) et elle est en plus associée à la force motrice, autrement dit le gradient de pression entre l'intérieur et l'extérieur des fibres.

Ce gradient de pression est obtenu par une vanne de régulation de débit placée sur la sortie du gaz retentat. Son rôle est de maîtriser le temps de contact de l'air dans les fibres par un étranglement du gaz retentat riche en azote. Cette opération favorise la dissolution de l'azote (gaz lent) dans le polymère. La concentration d'oxygène se trouve plus ou moins diluée avec l'azote, ainsi, dans les limites de pression et de débit, l'unité d'enrichissement de l'oxygène balaye une plage importante de nitrox et facilement les plus courants (Nx32, Nx36, Nx40).



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Schéma de principe d'un générateur de nitrox



Ce dernier point de régulation, porte à réflexion : Plus le nitrox est pauvre en oxygène, plus le débit est important, donc la production de nitrox a un débit variable en fonction de la concentration d'oxygène. Alors, comment adapter sur un compresseur haute pression, un débit de nitrox qui varie avec la concentration d'oxygène ?

### Le compresseur haute pression :

Le compresseur haute pression utilisé dans l'ensemble des structures de plongée est conçu pour fonctionner à la pression atmosphérique ; en dessous de cette pression, il perd son débit, chauffe et consomme son huile ; en dessus, il travaille en suralimentation dans des ratio de compression trop élevés augmentant les charges mécaniques. Dans les deux cas, le compresseur subira des dommages.

Les adaptations techniques ne manquent pas et peuvent être des plus simples au plus sophistiquées :

- Par le contrôle du débit d'air du compresseur basse pression,
- Par la maîtrise du débit de nitrox à l'aspiration du compresseur haute pression,
- Par l'utilisation d'un compresseur adapté pour fonctionner à la pression atmosphérique et au delà.



## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Le contrôle du débit d'air du compresseur basse pression.

Le critère de dimensionnement du compresseur basse pression est le débit d'air nécessaire pour l'unité d'enrichissement en oxygène pour la production de nitrox 40% sans dépasser 1b à 1.1b absolu à l'aspiration du compresseur haute pression.

Pour la production de nitrox avec des concentrations plus faibles en oxygène avec le même compresseur basse pression, le débit en sortie de l'unité d'enrichissement en oxygène est trop important. Comme le compresseur haute pression ne peut pas prendre un débit de nitrox supérieur à son propre débit, la pression d'aspiration va monter aisément de 1.5 à 1.8 b absolu. Dans cette situation, le compresseur se trouve suralimenté et travaille en dehors de ses caractéristiques d'origines.

Les solutions techniques apportées pour remédier à ce problème sont diverses :



- Le plus simple est de déverser le surplus d'air fourni par le compresseur basse pression pour ne pas dépasser une pression de membrane dans l'unité d'enrichissement d'oxygène.

Silencieux

Déverseur

Circuit d'air

- Le variateur de vitesse est aussi employé pour adapter le débit d'air du compresseur basse pression, pour régler le débit de nitrox fourni au débit du compresseur haute pression.

Le variateur de vitesse devient l'un des composants essentiels dans tous les systèmes modernes. Il commande le moteur pour faire varier sa vitesse de manière continue jusqu'à sa vitesse nominale. La valeur de la vitesse peut être proportionnelle à un signal analogique fourni par un potentiomètre, ou une source d'alimentation externe. Des vitesses présélectionnées peuvent être également exploitées.



Variateur de vitesse



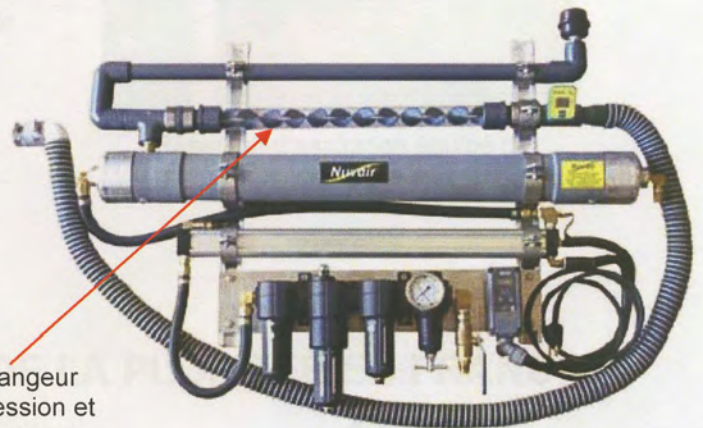
## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

Filtre à air

Sortie de nitrox du module membrane



- Il existe aussi des systèmes qui rejettent à l'atmosphère le surplus de nitrox. Ce matériel ressemble à un bâton mélangeur. Il a pour fonction d'éviter de suralimenter le compresseur haute pression en rejetant le nitrox au travers d'un filtre à air, et aussi d'éviter la dépression à l'aspiration en aspirant l'air ambiant au travers de ce même filtre si le nitrox vient à manquer.



Tube mélangeur anti-dépression et surpression

Sortie nitrox vers compresseur

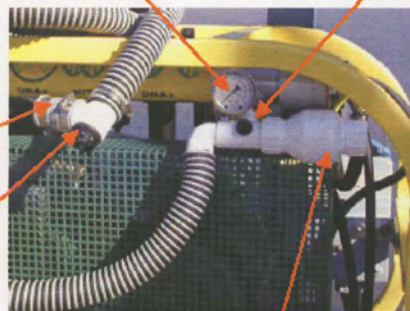
- D'autres, équipent l'entrée compresseur haute pression d'une soupape de surpression et d'un clapet de dépression

Permeate Pressure Gauge

Permeate O2% Analysis Port

Attach to HP Compressor Intake

Overpressure Relief Valve



Underpressure Relief Valve

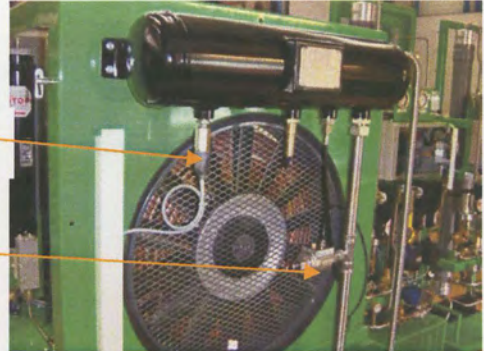


## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

- Un nouveau type de compresseur arrive sur le marché du nitrox : Issu du milieu industriel et militaire, mis en œuvre sur des process de récupération et de génération de gaz pur, il a la particularité d'accepter des pressions d'aspiration allant de 1b à 7 b absolu. Ce compresseur trouve sa place dans les unités de production de nitrox car il accepte tout le volume de gaz fourni grâce à des plages de travail à l'aspiration supérieures à la pression atmosphérique.



Mécanique de compression travaillant de 1b à 2.5b absolus à l'aspiration.



vacuostat

Mise à vide

Réservoir d'aspiration équipé de ses protections et de sa mise à vide

## MACHINE SUR LE MARCHE DE LA PLONGEE EN FRANCE



MCH14 Nitrox importé par Coltri

B-TROX importé par Bauer





## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

### QUAND CHOISIR LE GENERATEUR NITROX



Mixmaster de L&W  
importé par Bargaz

Cette sélection ne tient pas compte :

- Des volumes résiduels formés dans la bouteille d'origine et des pertes inévitables dans les manipulations.
- De l'investissement nécessaire, ainsi que de transfert de la bouteille.
- Des frais de transport.
- De la sécurité personnelle et celle des bouteilles.
- De celle de tout d'autres.

### COUT DE FABRICATION GX Series de NRC A L'OUVERTURE



8000  
6000  
4000  
2000



NXG fabriqué et commercialisé par  
Sté Cirrus. France.



## QUAND CHOISIR LE GENERATEUR NITROX

### Coût de fabrication des nitrox avec de l'oxygène pur :

Le coût hors taxe du mètre cube de nitrox est calculé sur le prix moyen connu à ce jour d'une bouteille d'oxygène : montant HT 54 €, ajouter à ce prix 8% de frais de dossier et de pollution, soit 58.32 € HT pour dix mètres cubes d'oxygène.

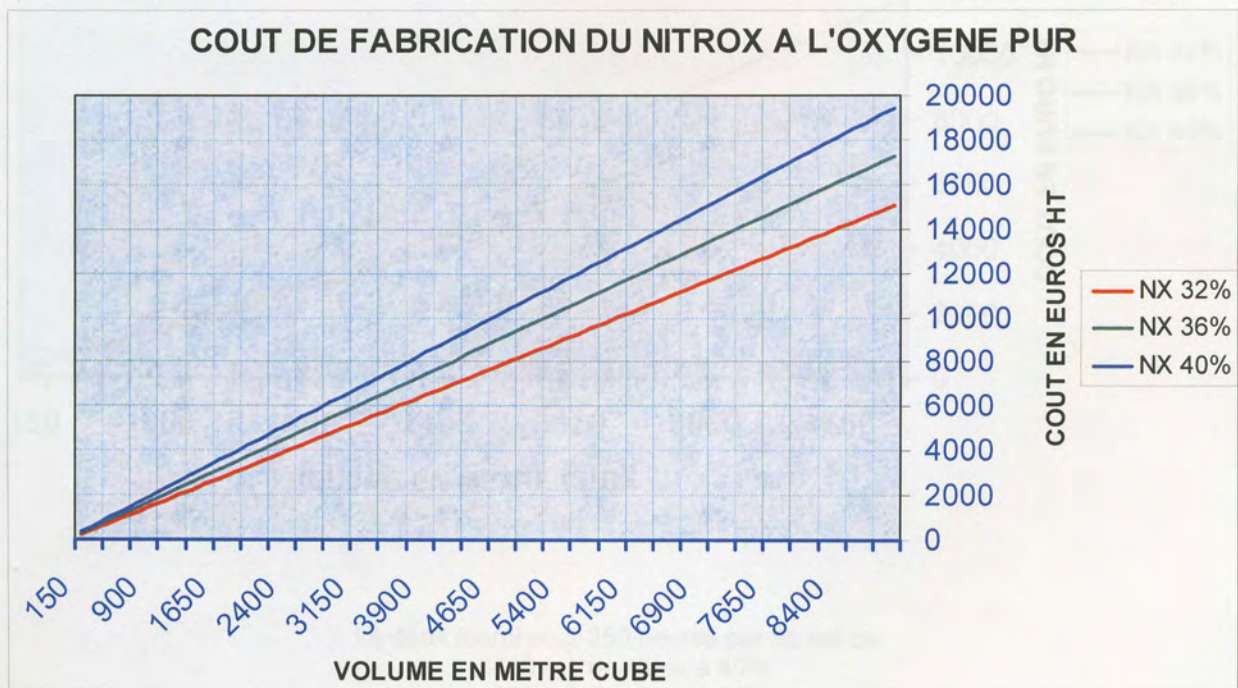
Pour compléter le calcul, il faut prendre en compte aussi le volume d'air nécessaire à la réalisation du nitrox considéré ; pour ce faire, le prix utilisé est de 4,18€ HT pour trois mètres cubes d'air.

Ceci permet de déterminer un prix de revient moyen hors taxes du mètre cube de nitrox :

- 1.67 € pour du NX32%,
- 1.91 € pour du NX 36%
- 2.16 € pour du NX 40%

Cette estimation ne tient pas compte :

- Des volumes résiduels restants dans la bouteille d'oxygène et des pertes occasionnées dans les manipulations,
- De l'investissement en matériel, type lyre de transfert ou bâton mélangeur,
- Des frais de transport,
- De la location journalière ou mensuelle des bouteilles,
- Du coût de main d'oeuvre





## LE NITROX A LA SOURCE : SEPARATION DES GAZ PAR MEMBRANE POLYMERE

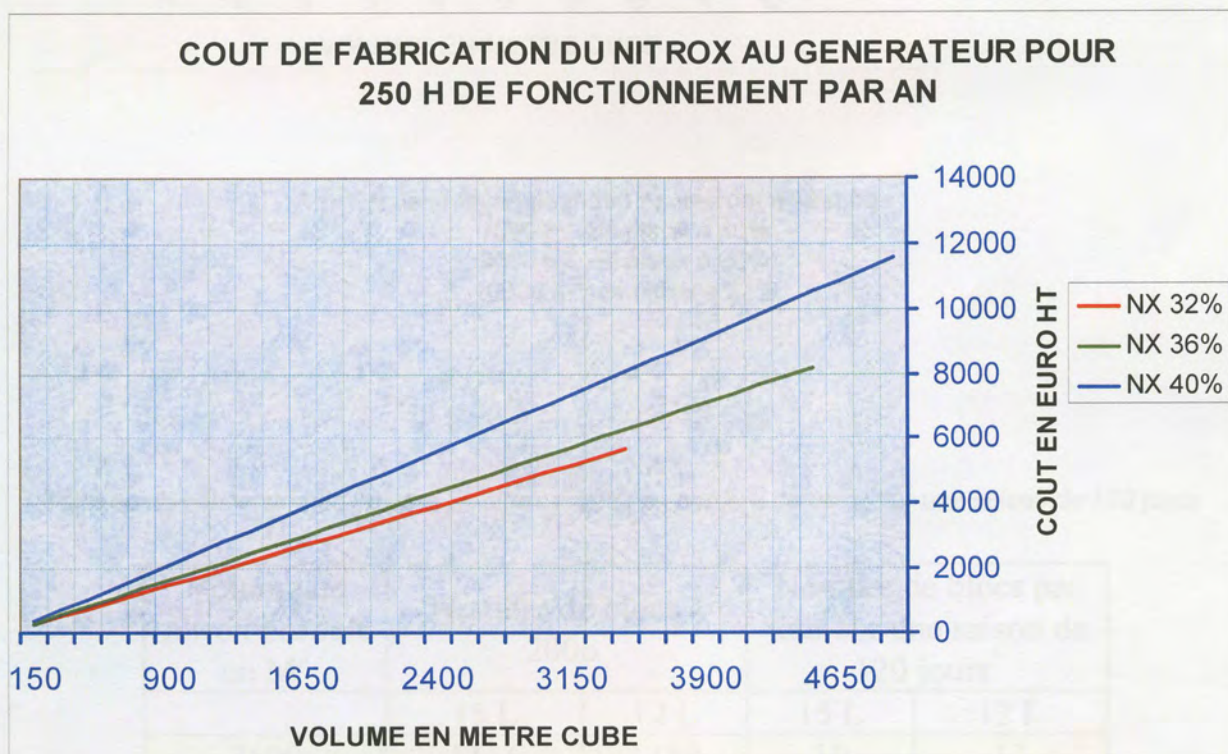
### Coût de fabrication des nitrox avec un générateur :

Pour déterminer un prix au mètre cube à la sortie d'un générateur de nitrox, plusieurs points sont à prendre en compte :

- Amortissement de la machine (durée 5 ans),
- Consommation électrique (base de 16.5 kW),
- Maintenance : maintenance courante (consommables) et préventive en fonction du nombre d'heures.

Les prix utilisés pour cette étude sont sur la base :

- D'un investissement de 31 000€ HT, comprenant la source d'air basse pression, l'unité d'enrichissement en oxygène, et le compresseur haute pression,
- D'un coût de maintenance sur cinq ans en fonction du nombre de d'heures de fonctionnement ramené à un coup moyen annuel,
- D'un prix au kW /h de 0.07 euros HT



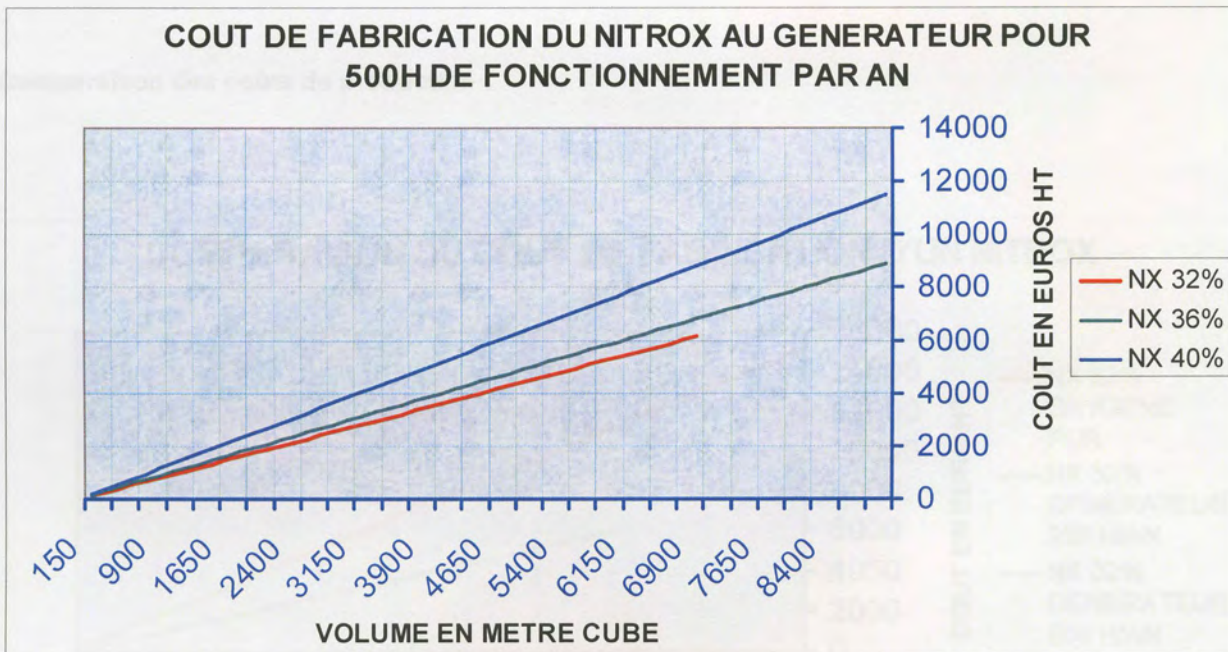
Le débit fourni pour 250 heures par an est de :

3500 m<sup>3</sup> de nitrox à 40%

4500 m<sup>3</sup> de nitrox à 36%

5000 m<sup>3</sup> de nitrox à 32%





Le débit fourni pour 500 heures par an est de :  
 7000 m<sup>3</sup> de nitrox à 40%  
 9000 m<sup>3</sup> de nitrox à 36%  
 10000 m<sup>3</sup> de nitrox à 32%

Tableau de conversion du volume de nitrox produit en nombre de blocs sur une saison de 120 jours.

Volume de nitrox produit en M <sup>3</sup>	Nombre de blocs à 200b*		Nombre de blocs par jour sur une saison de 120 jours*	
	15 L	12 L	15 L	12 L
3500	1166	1458	10	12
4500	1500	1875	13	16
5000	1666	2083	14	17
7000	2333	2916	19	24
9000	3000	3750	25	31
10 000	3333	4166	28	35

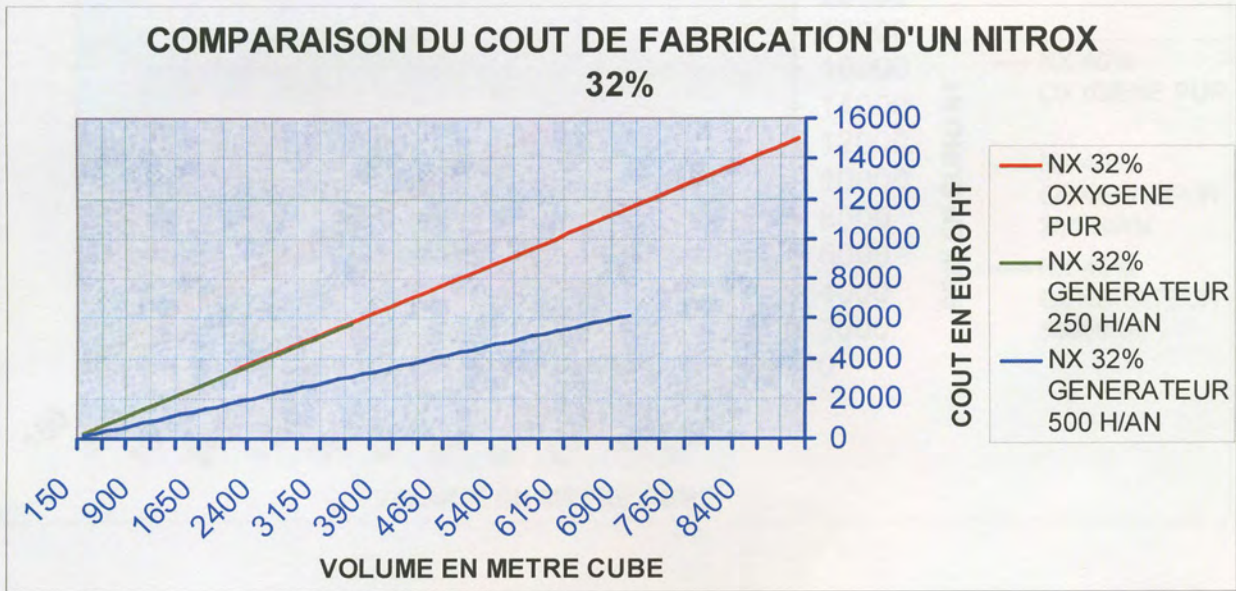
\*ces valeurs sont arrondies à l'unité la plus proche

**250 h de fonctionnement / an**

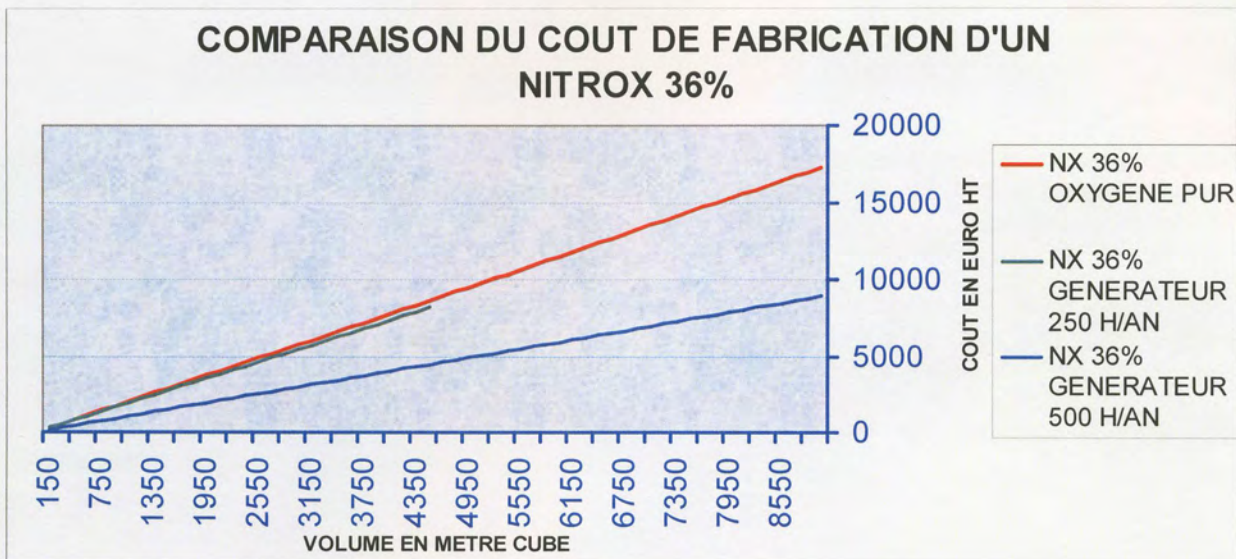
**500 h de fonctionnement / an**



Comparaison des coûts de production :

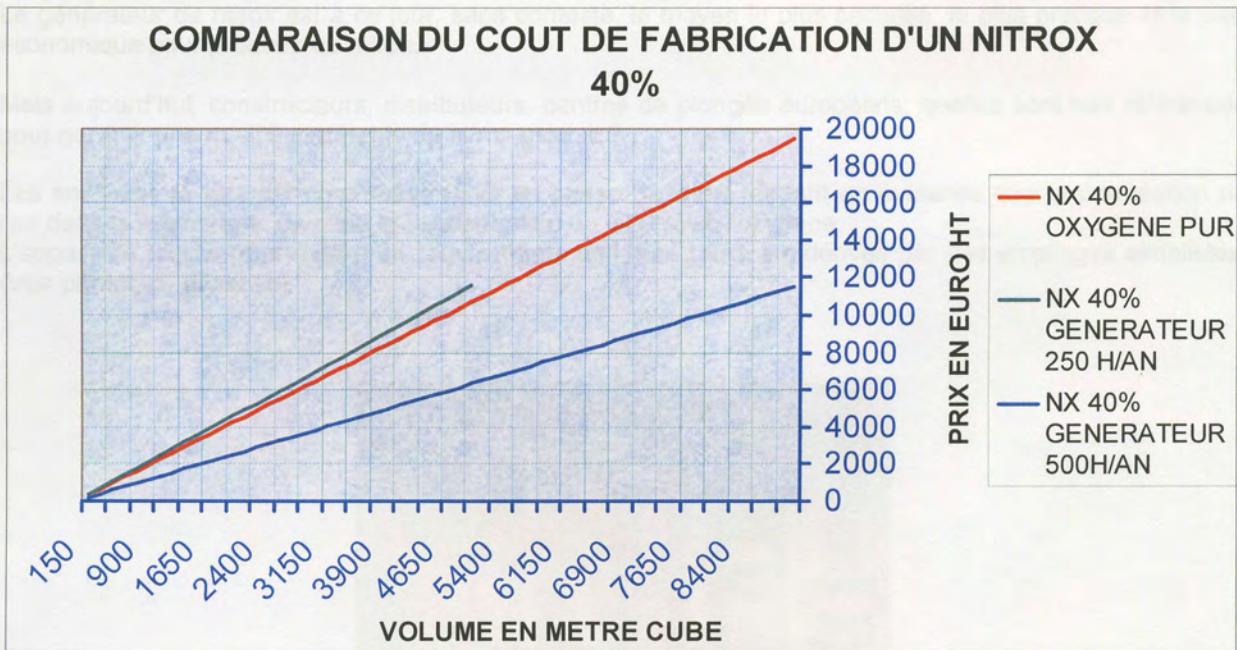


Des tableaux de comparaison sont en vente au service client de Nitrox. Ils permettent de comparer le coût de production de nitrox par voie membranaire avec les autres méthodes de production de nitrox.





CONCLUSION



Ces tableaux de comparaison mettent en évidence, qu'à partir de 250 h de fonctionnement par an, le coût de production de nitrox par un générateur est équivalent, voir inférieur, au coût de production d'un nitrox en utilisant de l'oxygène pur.

Dans le cadre de la politique européenne pour le plongeur en Europe, ne serait-il pas souhaitable de faire ériger de ce minimum le nitrox, qui est devenu à nos plongeurs, et une qualité essentielle à même de leur donner la norme EN 12021 ?

Qu'en est-il pour le générateur de nitrox ?

Le générateur de nitrox est une évolution sans précédent dans l'histoire de la plongée. Ces progrès sont à saluer pour rendre encore plus simple les conditions d'exploitation. Il faut cependant se poser, et discuter, la question à l'évolution de la plongée sur mélange et surtout la production de deux mélanges : le générateur de nitrox est par conséquent l'élément clé pour répondre aux diversités techniques de plongée proposées par le F.P.S.S.S.

Les mélanges sont dans l'air du temps, l'air de notre temps.



## CONCLUSION

Le générateur de nitrox est à ce jour, sans conteste, le moyen le plus sécurisé, le plus pratique et le plus économique pour produire du nitrox.

Mais aujourd'hui, constructeurs, distributeurs, centres de plongée européens, quelles sont leur références pour garantir une qualité respirable du nitrox produit ?

Les analyses de gaz par chromatographie en phase gazeuse mettent en évidence que la perméation de l'air dans la membrane, favorise la concentration du CO<sub>2</sub> avec l'oxygène.

L'apparente facilité pour mettre en œuvre une membrane incite les dérives par des empilages simplistes. (Voir photos ci-dessous)



Dans le cadre de la politique normative pour la plongée en Europe, ne serait-il pas souhaitable qu'il soit exigé qu'au minimum, le nitrox, que l'on distribue à nos plongeurs, ait une qualité « respirable » comme défini dans la norme EN 12021 ?

Quel avenir pour le générateur de nitrox ?

Le générateur de nitrox est une évolution sans précédent dans l'histoire de la plongée, des progrès sont à réaliser pour rendre encore plus simples les conditions d'exploitation. Il trouvera toute sa place, si demain, il contribue à l'évolution de la plongée aux mélanges en facilitant la production de trimix normoxique.

Le générateur de nitrox est par excellence l'outil polyvalent pour répondre aux différentes techniques de plongée proposées par la F.F.E.S.S.M.

*Les mélanges sont dans l'air du temps, l'air de notre temps.*



## BIBLIOGRAPHIE

- |   |   |
|---|---|
| Membrane de perméabilité gazeuse<br>Membrane semi-perméable | REMY AUDINOS                              |
| Perméation gazeuse  | LIAN-MING SUN<br>JEAN YVES THONNELIER     |
| Zéolite   | PIERRE HENRI JACOBS                       |
| Gas separation using polymers                               | DAVID T. COKER                            |
| Fabrication industrielle du dioxygène                       | SOCIETE FRANCAISE DE<br>CHIMIE            |
| Manuel de plongée au nitrox                                 | JEAN LOUIS BLANCHARD<br>JEAN YVES KERSALE |
| Gas blending  | IANTD                                     |
| Tauch medizin   | A.A. BÜHLMANN                             |