



Module : Technologie du gaz

**Suite Chapitre I : Application des concepts
thermodynamiques dans l'industrie des gaz**

Chapitre II: Technologie de séparation de l'air

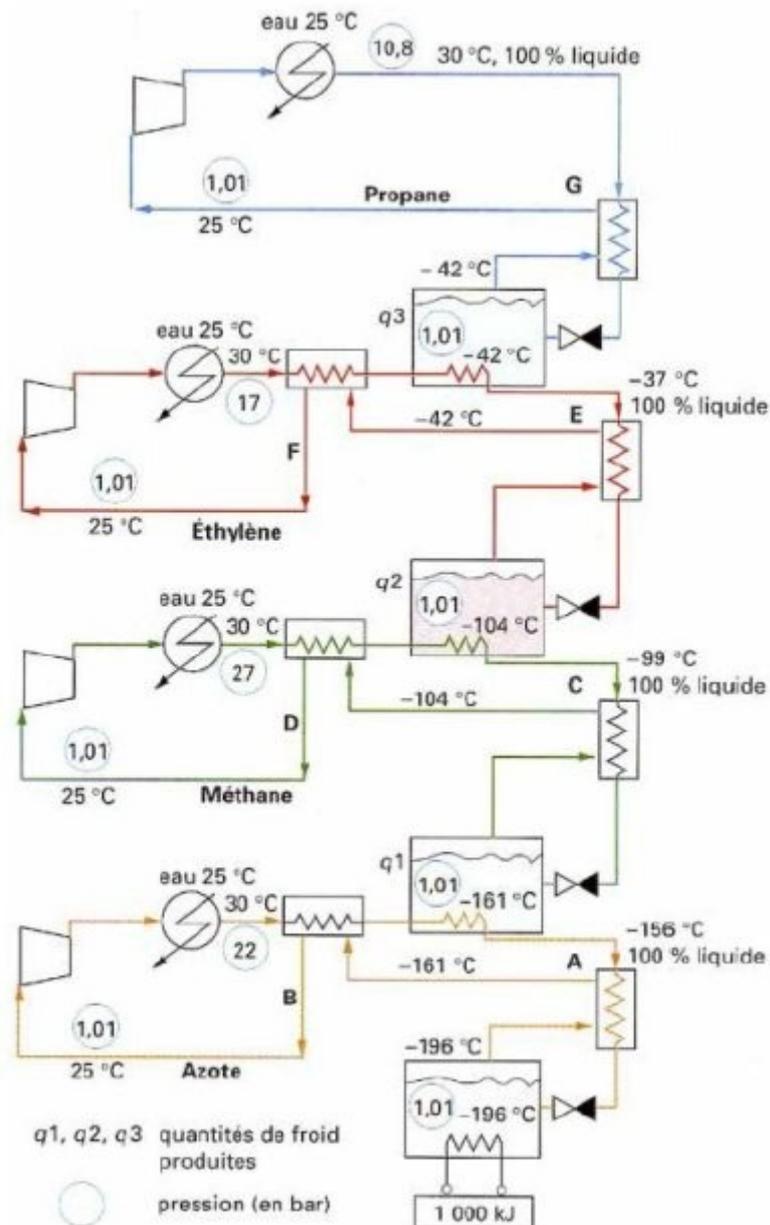
&

**Chapitre III: Gaz nobles (rares): L'hélium;
Le néon; L'argon; Krypton et Xénon**

CYCLES EN CASCADE

Il est aussi possible d'utiliser des cycles de réfrigération en cascade, l'évaporateur de l'un d'eux servant de condenseur à l'autre et ainsi de suite (figure ci-dessous). Les différents circuits frigorifiques sont alors indépendants sur le plan hydraulique, mais couplés thermiquement par leurs évapo-condenseurs.

Une variante, très utilisée de nos jours dans les unités de liquéfaction du gaz naturel, consiste à utiliser une cascade dite incorporée, faisant appel à un fluide thermodynamique unique composé d'un mélange de méthane, d'éthane, de propane, de butane et de pentane.



Cascade classique (d'après P. Petit)

Chapitre II:

Technologie de séparation de l'air

II. Technologie de séparation de l'air

1. Introduction :

De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour la **séparation des mélanges gazeux**, certaines sans changement d'état, soit à l'ambiante, soit à plus basse température. Cependant, les plus employées dans l'industrie font appel à la **liquéfaction**, donc **aux basses températures** ; c'est le cas de la distillation et de la condensation fractionnée.

Une partie des produits de la séparation peut être demandée à l'état liquide. On combine alors séparation et liquéfaction dans une même unité.

Dans d'autres cas, la liquéfaction est une fin en soi ; c'est le cas du **gaz naturel**, pour son transport par voie maritime, et aussi de l'**hydrogène**.

De nombreuses techniques s'appuyant sur certaines propriétés physiques ou physico-chimiques des constituants de mélanges gazeux peuvent être mises en œuvre pour les séparer. Parmi celles-ci, nous développerons les plus utilisées industriellement: perméation, adsorption, absorption, distillation et condensation fractionnée.

En ce qui concerne les **applications** de ces techniques, nous ne décrirons que les installations ayant un **caractère industriel**, par opposition à celles que l'on rencontre plutôt dans les activités de recherche (comme c'est souvent le cas encore pour des températures inférieures à 4 K) et aussi par opposition aux installations de petite taille.

On appelle **gaz** « tout corps qui se présente à l'état de fluide expansible et compressible (état gazeux) dans les conditions de température et de pression normales ».

Un **gaz permanent** est « un gaz qui ne peut se liquéfier par simple augmentation de pression », sous-entendu à température ordinaire, c'est-à-dire sans application de froid. Dans un langage plus scientifique, on dirait : tout gaz dont la température critique est inférieure à l'ambiante. Il faut toutefois préciser où l'on situe la température ambiante. L'examen du réseau des courbes de pression de vapeur des gaz montre qu'à l'exception de l'ozone (molécule qu'il est difficile de rencontrer à l'état pur en raison de son instabilité) aucun gaz n'a son point critique dans la zone des températures comprises entre -64 °C (Kr) et $+10\text{ °C}$ (C_2H_4). Si l'on situe le seuil inférieur de la température ambiante dans cette zone, le krypton est le premier des gaz à se classer dans la catégorie des « gaz permanents ». Il sera cependant fait mention de quelques gaz ou mélanges de gaz qui, sous pression, peuvent être obtenus à l'état liquide à des températures relativement

basses (comprises entre $+10$ et $+40\text{ °C}$), et aussi de gaz ou mélanges de gaz qui, sous pression, demeurent liquides jusqu'à des températures de l'ordre de $+100\text{ °C}$. Ces derniers sont parfois appelés « **gaz liquides** » (propane, butane, ammoniac...).

- **Dix corps purs** répondent à la définition précédemment donnée des **gaz permanents** :
 - ▲ sept corps simples : He, H_2 , Ne, N_2 , Ar, O_2 , Kr ;
 - ▲ trois corps composés : CO, CH_4 , NO.

On ajoutera **trois mélanges de gaz** qui concernent tout particulièrement le domaine industriel : l'**air**, le **gaz naturel** (GN) et le **gaz de synthèse de l'ammoniac** ($\text{N}_2 + 3\text{H}_2$).

- **Gaz liquéfiables par simple augmentation de pression à des températures ambiantes relativement basses** (10 à 40 °C) C_2H_4 , Xe, CO_2 , N_2O , C_2H_2 , C_2H_6 , certains Fréon (R_{116} par exemple).
- **Gaz liquéfiables par simple augmentation de pression, encore liquides à températures élevées** (vers 100 °C et plus)

On les appelle parfois « gaz liquides ». Citons en quelques-uns :

- ▲ les GPL (gaz de pétrole liquéfiés) : butane, propane ;
- ▲ l'ammoniac (NH_3) ;

- ▲ quelques Fréon (R₂₂, R₁₂, R₁₁) utilisés comme fluides frigorigènes halogénés : chlorofluorocarbures (CFC) et hydrochlorofluorocarbures (HCFC).

2. Séparation et épuration par adsorption

Cette technique, déjà ancienne dans son application à l'épuration, est relativement récente dans l'application à la séparation. Elle fait appel à des **adsorbants** (aluminés, gels de silice, tamis moléculaires, charbons actifs, etc.) qui se présentent sous forme de cailloux, de billes, de lentilles, de bâtonnets, dont les dimensions se situent, pour ces usages, entre 1 et 4 mm. L'adsorbant est généralement disposé en vrac dans un récipient, entre deux grilles ; il constitue un lit qui sera traversé par le gaz à séparer ou à épurer. L'adsorbant doit être poreux (macropores) afin que les molécules du fluide atteignent facilement l'élément actif constitué de micropores, sortes de cavernes microscopiques dont les ouvertures ont des dimensions qui s'apparentent aux diamètres des molécules (0,2 à 0,5 nm).

- 0,3 à 1,0 nm pour les **tamis moléculaires** de type 3A, 4A et 5A (ou 13X) la désignation A signifiant angström ;

- 0,5 à 2 nm pour certains **charbons actifs** ;

- 2 à 4 nm pour des **silicagels** et des **aluminés activés**.

Les adsorbants sont sélectionnés en fonction de leur affinité pour certains types de molécules ; la taille de la molécule joue un rôle (la molécule à piéger doit pouvoir pénétrer dans la cavité), mais la sélectivité dépend aussi de bien d'autres propriétés physicochimiques, la polarité par exemple (c'est ainsi que la molécule d'eau est fortement adsorbée sur la plupart des adsorbants, d'où l'application au séchage des gaz).

2.1 Épuration par adsorption

Qu'il s'agisse d'épuration de gaz ou de liquides, les procédés faisant appel à l'adsorption sont utilisés depuis fort longtemps déjà. Le but est d'éliminer, parfois en partie, souvent en totalité, un ou plusieurs constituants présents en faible teneur, comme par exemple la **vapeur d'eau dans le gaz naturel (GN) ou dans l'air** (même à saturation, la teneur en eau dépasse rarement 1 % du fait de la pression du gaz) ; un autre exemple est celui de CO₂ dans l'air dont la teneur se situe vers 4×10^{-4} (en volume), voire 10^{-3} parfois sous forme de pics dans certaines zones industrielles, soit donc 0,1 % (dans le GN, la teneur en CO₂ atteint parfois plusieurs pour-cent, c'est pourquoi on n'utilise plus l'adsorption mais l'absorption).

Dans le cas de l'air, l'eau et CO₂ sont arrêtés dans un unique adsorbant ; on emploie soit un seul adsorbant, du tamis moléculaire, soit deux adsorbants disposés en deux lits successifs d'alumine pour l'arrêt de l'eau et de tamis moléculaire pour l'arrêt de CO₂. Quand le gaz est saturé en humidité, ce qui est souvent le cas après

compression, une part importante de l'eau peut être éliminée par simple refroidissement préalable jusqu'au voisinage de 0°C (un refroidissement de + 30 à + 5°C élimine par condensation 80 % de l'eau contenue au départ). De plus, la capacité d'adsorption peut aussi se trouver augmentée du fait de l'abaissement de la température ; ce prérefroidissement est particulièrement utile pour l'arrêt de CO₂ réalisé en aval de celui de l'eau. L'épuration par adsorption peut aussi être effectuée à très basse température ; c'est ainsi que l'on élimine les dernières traces d'azote dans l'hydrogène avant sa liquéfaction par passage du gaz sur un lit de gel de silice à la température de l'azote liquide.

L'épuration par adsorption permet d'abaisser le taux des impuretés jusqu'à 1 ppm (partie par million) en volume et même bien au-dessous si nécessaire.

L'adsorbant, après un certain temps de fonctionnement en épuration, doit être régénéré ; le fonctionnement est donc cyclique, avec des périodes qui varient de 2 h à quelques heures. La régénération se fait généralement par un écoulement en sens contraire d'un gaz à plus faible pression (souvent la pression atmosphérique) et à plus haute température (le plus souvent

comprise entre 80 et 200°C). La quantité de gaz de régénération, exprimée en moles, se situe vers 10 à 20 % de la quantité épurée.

2.2 Description du procédé

Le gaz brut sous pression est introduit dans l'adsorbent où les composants lourds comme l'azote, les hydrocarbures ou les oxydes d'azote sont arrêtés alors que l'hydrogène traverse l'adsorbent.

L'adsorbant est régénéré en plusieurs étapes d'abaissement de pression. On opère de façon cyclique avec au moins trois adsorbent. En utilisant cinq adsorbent, on obtient une production d'hydrogène à débit constant.

Le cycle complet dans le cas de 3 adsorbent peut ne pas dépasser 9 min.

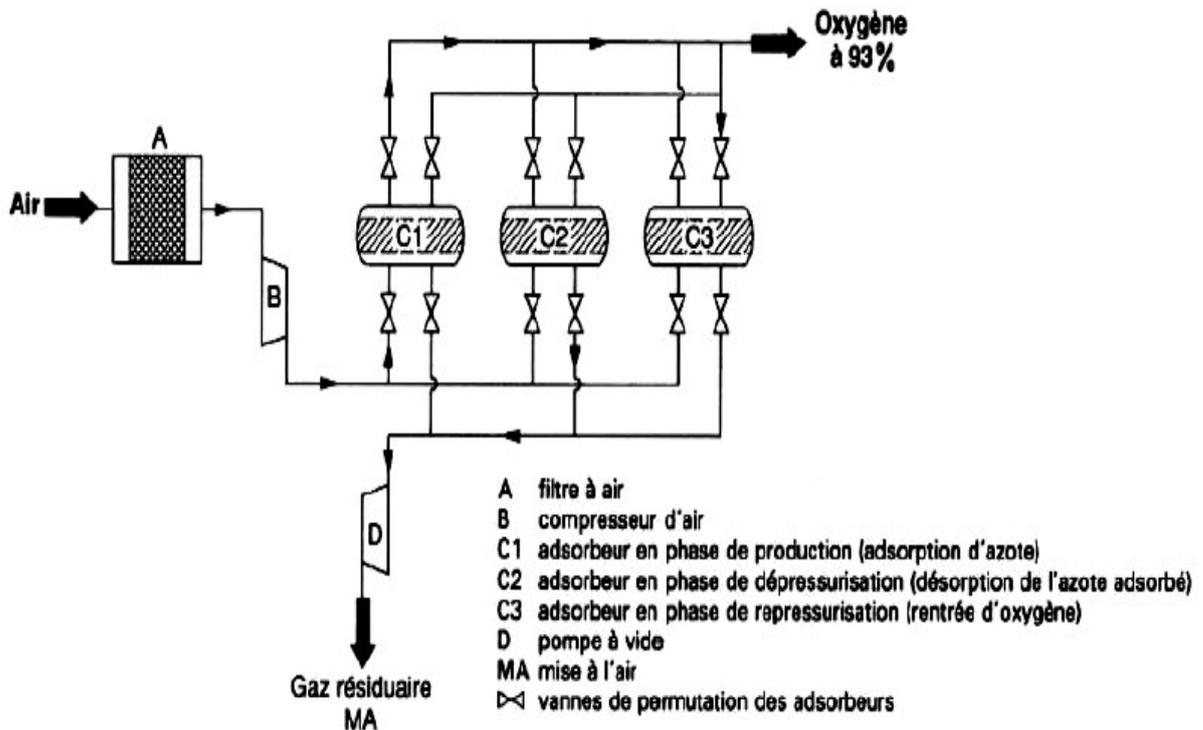
L'adsorption fait appel à une fixation préférentielle d'un ou de plusieurs constituants du mélange sur un adsorbent qui est généralement un tamis moléculaire zéolitique, mais qui peut être aussi un tamis moléculaire carboné, voire une combinaison des deux types.

Le procédé dit « **PSA** » (*Pressure Swing Adsorption*) comporte plusieurs adsorbent qui, par permutation cyclique, réalisent les phases successives du procédé, lequel se caractérise par des changements de pression uniquement (5 bar et 1 bar pour le PSA, 1 bar et 0,2 bar pour le VSA [*Vacuum Swing Adsorption*]).

2.3 Description de l'installation

Elle comprend les éléments principaux ci-après :

- les **adsorbent** au nombre de 3 à 10 en fonction du débit ou du rendement d'extraction requis pour l'hydrogène ;
- des **capacités tampons** pour le stockage et pour la stabilisation des débits et de la composition du produit ;
- un ensemble préfabriqué regroupant toutes les vannes.

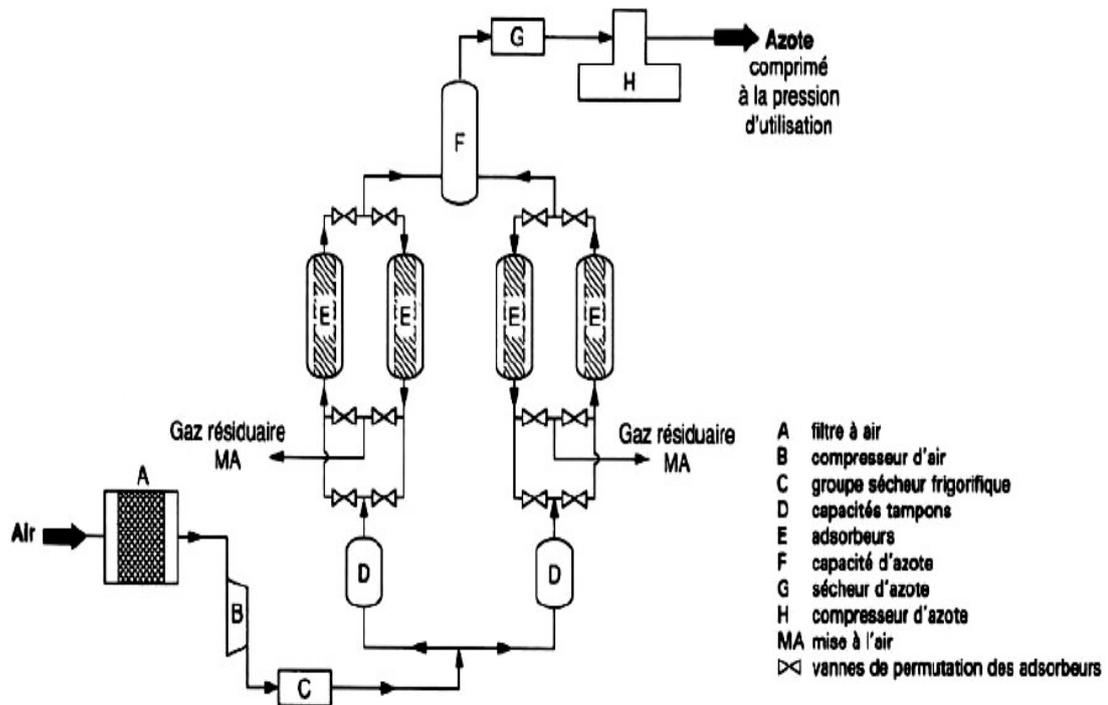


Production d'oxygène par adsorption PSA

La figure suivante représente un schéma de production d'azote par adsorption PSA.

On sélectionne alors un adsorbant qui possède la propriété d'adsorber l'oxygène beaucoup plus rapidement que l'azote. L'air comprimé à 8-10 bar est de préférence soumis à un séchage frigorifique vers 2°C avant d'être envoyé, *via* une capacité tampon, à l'entrée d'un des adsorbeurs. L'azote est disponible à la sortie de l'adsorbeur. La durée de la phase d'adsorption est de 1 min, comme celle de la phase de désorption qui consiste en une simple dépressurisation de l'adsorbeur par mise à l'air du gaz résiduaire (enrichi en oxygène).

La re-pressurisation se fera quasi instantanément en deux étapes : équilibrage des deux adsorbeurs par le bas puis remplissage simultané par les deux extrémités, en air et en azote. L'azote est produit entre 6 et 9 bars.



Production d'azote par adsorption PSA de grosse capacité (6 000 Nm³/h)

3. Séparation et épuration par absorption

Le procédé repose sur la propriété qu'ont certains liquides de dissoudre des corps contenus dans un mélange généralement gazeux. Le liquide de lavage et le gaz sont mis en contact à contrecourant, comme dans une colonne à distiller. Il s'agit, par exemple, d'un **lavage aux amines** (en fait solution d'amines dans l'eau) qui ramène de quelques pour-cent à 100 ppm en volume la teneur en CO₂ d'un gaz naturel avant sa liquéfaction (CO₂ étant légèrement soluble dans les hydrocarbures liquéfiés, il n'est pas indispensable de pousser plus avant son élimination). On complète par un **lavage à l'eau** pour éliminer les vapeurs d'amine ; on a alors un gaz saturé en vapeur d'eau que l'on séchera par adsorption par passage sur un lit d'alumine. Le gaz sera alors apte à un traitement à basse température. Avant l'apparition sur le marché des tamis moléculaires (années 60), l'épuration de l'air était réalisée en deux étapes :

- lavage de l'air avec une solution aqueuse de soude pour l'élimination de CO₂ ;
- séchage par passage sur un lit d'alumine, opération parfois précédée d'un prérefroidissement à + 5°C.

Une autre technique également mise en oeuvre comportait, elle aussi, deux étapes, mais dans un ordre différent :

- séchage sur un lit d'alumine à température ambiante ou à + 5 °C ;
- arrêt de CO₂ en cours de refroidissement, vers – 100 °C, par passage sur un lit d'alumine.

4. Séparation par distillation

Le principe est bien connu : il s'agit de mettre en contact dans une colonne à distiller, à contre-courant, une phase liquide descendante (écoulement par gravité) et une phase vapeur montante (écoulement forcé). Le contact est réalisé :

- ✓ par barbotage (bulles à travers un liquide sur des plateaux) ;
- ✓ par chute de gouttelettes (écoulement du liquide en pluie dans un espace plus ou moins vide) ;
- ✓ par léchage, par le gaz, de parois mouillées par le liquide qui ruisselle (colonne à garnissage en vrac ou structuré).

La phase vapeur, en fond de colonne ou de cuve, est générée par un rebouilleur ou vaporiseur ; elle peut aussi être la conséquence directe d'une alimentation gazeuse en cuve. De même, la phase liquide en tête de colonne est générée par un condenseur, mais elle peut aussi être la conséquence directe d'une alimentation liquide en tête.

Le principe de fonctionnement d'une colonne de distillation est le même à basse température qu'à tout autre température. C'est l'importance grandissante, avec l'abaissement de la température, des « irréversibilités selon Carnot » qui a conduit aux quelques particularités ci-après.

- Les colonnes fonctionnent souvent dans des conditions difficiles :
 - ▲ volatilités relatives parfois voisines de l'unité ;
 - ▲ reflux voisins du reflux minimal ;
 - ▲ grandes puretés requises pour les produits.
- Le nombre d'étages théoriques à installer dans une colonne dépasse parfois la centaine. Les qualités requises pour les plateaux équipant ces colonnes sont contraignantes et, en tout cas, très spécifiques du domaine par comparaison à d'autres domaines, telle la pétrochimie par exemple ; à savoir :
 - ▲ écartement des plateaux : de quelques centimètres à 20 cm au maximum ;

- ▲ pertes de charge : 3 mbar par étage théorique n'est généralement plus acceptable dans les grosses unités actuelles ;
- ▲ rendement de plateau : on vise 60 à 80 % au minimum.

Un garnissage, pour être performant, doit présenter une grande surface volumique, mais cela n'est pas suffisant pour une utilisation dans des tronçons de colonnes à grand nombre d'étages théoriques, fonctionnant près du taux de reflux minimal. Les qualités fondamentales ci-après sont également requises :

- le garnissage doit présenter une résistance au passage du gaz qui soit parfaitement homogène dans toute la section de la colonne ;
- la distribution initiale du liquide sur le garnissage doit être particulièrement soignée et maintenue ainsi, voire améliorée, tout au long de l'écoulement descendant.

La conception, la réalisation et l'installation dans la virole des distributeurs de liquide et du garnissage concourent au bon fonctionnement de la colonne. Pour cette raison, le fournisseur de l'unité cryogénique préfère réserver à ses propres ateliers l'ensemble des étapes de construction des colonnes de distillation destinées à équiper ses unités.

4. 1 Séparation des constituants de l'air par distillation

Généralités

Les installations ont pour but la production d'au moins un des constituants principaux de l'air : le plus souvent il s'agissait d'oxygène, mais, de plus en plus, se sera aussi de l'azote, plus exceptionnellement de l'argon. La plupart des appareils produisent simultanément la presque totalité de l'oxygène contenu dans l'air traité, une partie plus ou moins grande d'azote sous forme d'azote pur et, presque toujours, de l'argon quand il s'agit d'unités de grosse taille. Souvent, les unités de grosse taille (1 000 t/j d'oxygène et plus) sont équipées pour produire les gaz rares : hélium néon et surtout krypton-xénon.

Le schéma de principe de l'installation peut varier quelque peu si l'on entre dans le détail ; il est adapté au mieux pour répondre à la demande : nature des productions, quantités, souplesse (coulées en aciéries par exemple, besoins réduits durant le weekend, etc.). Nous limiterons notre présentation au schéma de base le plus classique, utilisé pour une unité de grosse taille (quelques centaines de tonnes par jour d'oxygène) produisant, en continu, essentiellement de l'oxygène gazeux, de l'azote à haute pureté en quantité plus ou moins grande et de l'argon à l'état liquide.

5. Séparation par perméation

Cette technique, de mise en oeuvre récente, utilise des **membranes** dites **semi-perméables**, qui ont la propriété d'être traversées plus facilement par certaines molécules que par d'autres (perméation sélective). La sélectivité n'est pas uniquement fonction de la taille des molécules, qui joue cependant un rôle majeur quand les tailles sont très différentes : cas de l'obtention d'hydrogène pur à partir de mélanges contenant N₂,

CH₄, CO, Ar, etc. L'hydrogène qui a traversé la membrane constitue le perméat ; sa pureté peut atteindre 99,9 %.

Les éléments constitutifs du cœur de l'équipement pour la réalisation d'un procédé mis en oeuvre par l'Air

Ces éléments sont constitués de millions de **fibres creuses en polyaramide**, fines comme des cheveux. Les gaz « rapides » diffusent de façon préférentielle à travers la membrane, s'écoulent à l'intérieur de la fibre creuse et sont collectés pour constituer le perméat. Les gaz « lents » s'écoulent autour des parois des fibres et constituent le résidu. Les fibres en grandes longueurs sont tressées et enroulées sur un noyau ; leurs extrémités sont enrobées dans un manchon en résine époxyde qui est ensuite tronçonné, réalisant ainsi la **plaque tubulaire** qui permet de collecter le perméat. Le gaz à traiter s'écoule à l'extérieur des fibres comme le ferait le fluide, côté virole, d'un échangeur tubulaire : le gaz brut entre à une extrémité de la virole, le résidu sort à l'autre extrémité.

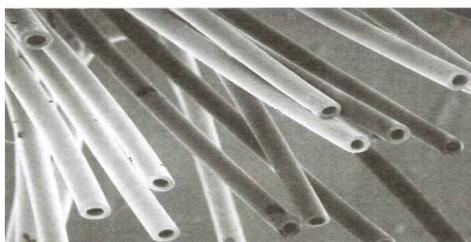
Le classement des gaz (pour ce type de membrane), du plus « rapide » au plus « lent », est le suivant :

$\text{He} > \text{H}_2 > \text{H}_2\text{O} > \text{NH}_3 > \text{CO}_2 > \text{H}_2\text{S} > \text{CH}_3\text{OH} > \text{CO} > \text{Ar} > \text{N}_2 > \text{CH}_4 > \text{C}_2\text{H}_6 > \text{C}_3\text{H}_8$

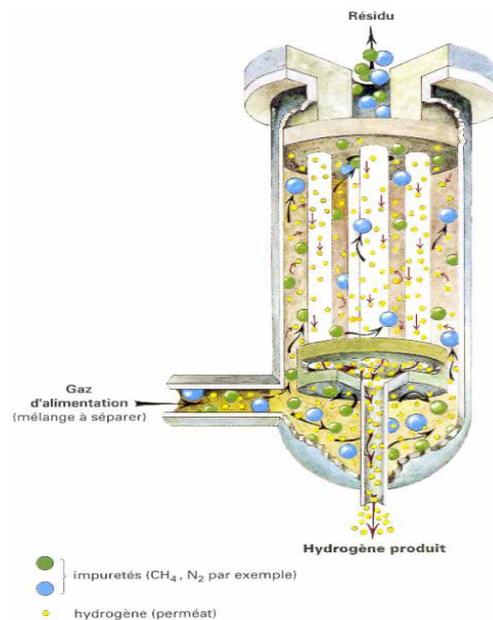
L'utilisation de membranes connaît actuellement un développement important pour la **purification de l'hydrogène** ou la séparation de fractions contenant de l'hydrogène tant en raffinerie que dans la pétrochimie, ainsi que pour la production d'azote à partir de l'air (système Medal, voir figure).



Ⓐ grandeur nature



Ⓑ vue au microscope



Les durées de phases sont courtes, de l'ordre de la minute, ce qui serait incompatible avec des procédés basés sur des changements de températures en raison de la grande inertie thermique des lits d'adsorbants.

Chapitre III:

Gaz nobles (rares): L'hélium; Le néon; L'argon; Krypton et Xénon

III. Les gaz nobles

1. Introduction :

On appelle gaz nobles, ou gaz rares, les éléments chimiques du groupe VIIIA du tableau périodique des éléments. Leur nom vient de leur faible réactivité chimique. Ceux-ci sont aussi appelés gaz inertes.

Les six gaz nobles sont l'hélium (He), le néon (Ne), l'argon (Ar), le krypton (Kr), le xénon (Xe) et le radon (Rn).

Les gaz nobles ont plusieurs utilités technologiques importantes. Ils ont chacun des utilisations et des caractéristiques différentes.

Les différents gaz nobles

2. L'hélium :

Fut le premier gaz rare à être découvert. Son nom signifie soleil, car c'est dans le soleil qu'il fut découvert. Il est utilisé dans les gonflements de ballons atmosphériques et dans les bouteilles de plongée des grandes profondeurs. L'hélium peut aussi être utilisé dans les enseignes lumineuses. Son point d'ébullition est de $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ et il se liquéfie à $-272\text{ }^{\circ}\text{C}$. Une fois solide, il présente une conductibilité thermique très élevée.

L'hélium est essentiellement obtenu lors de la purification du gaz naturel de certains gisements. Il existe aujourd'hui une crise mondiale de production d'hélium.

Tous les gaz monoatomiques, à l'exception du radon, sont obtenus par distillation fractionnée de l'air liquide.

De l'hélium peut être isolé en petite quantité comme produit de désintégration (particules alpha).

Deuxième en abondance dans l'univers : 23% (après l'hydrogène 76%)

Sur terre, il s'en forme continuellement dans l'atmosphère et lors de certaines réactions nucléaires (α), mais sa faible densité fait qu'il ne s'accumule pas au-delà de 0,0005 % dans l'air,

2.1. Principales propriétés physicochimiques.

- ▲ Inerte chimiquement.
- ▲ Gaz incolore et inodore.
- ▲ Point de fusion : $-272.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ▲ Point d'ébullition : $-268.93\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ▲ Degrés d'oxydation : 0 (zéro).
- ▲ L'état solide nécessite une pression élevée.
- ▲ A basse température, l'hélium liquide a une viscosité très faible, c'est la superfluidité. Elle est observée pour ^4He et ^3He .
- ▲ Il existe deux isotopes de l'hélium : ^3He 0.000137 % et ^4He 99.999863 %,
- ▲ En radioactivité, les particules « alpha » sont des noyaux d'hélium 4.

2.2. Importance industrielle :

On trouve de l'hélium dans des gisements de gaz naturel il est utilisé dans différents domaines :

- ❖ L'hélium est utilisé dans le gonflement de ballons d'enfants et pour gonfler les ballons sondes, les dirigeables, pour les mélanges gazeux utilisés en plongée à grande profondeur et la soudure (gaz inerte et plus léger que l'air).
- ❖ Gaz vecteur en chromatographie.
- ❖ Fluide cryogénique, La cryogénie est un procédé par lequel on utilise de l'hélium pour créer des températures très basses et congeler des corps de différentes natures, il est utilisé aussi dans le refroidissement des aimants supraconducteurs (RMN, IRM, accélérateurs) et la recherche à basses températures.
- ❖ L'hélium est aussi utilisé, en mélange avec l'oxygène, pour traiter l'asthme, car il diffuse plus rapidement que l'air à travers les bronchioles contractées.

3. Le néon :

Il est présent dans l'air avec une proportion de 0,0018 %. Il donne une couleur rouge vive lorsque soumis à une haute tension, ce qui explique sa grande utilisation dans les enseignes commerciales. Il y a quelque temps, il était utilisé avec l'hélium dans les premiers rayons laser. Maintenant, les lasers sont faits à partir de CO₂ qui est environ 66 million de fois plus puissant. Il ne réagit pas avec l'eau et l'air, puisqu'il est inerte. Son point de fusion se trouve à 24,5 K. Il bout à 27,1 K.

La configuration électronique de l'état fondamental est $(1s)^2(2s)^2(2p)^6$.

Le néon est le quatrième élément par ordre d'importance dans l'univers. Sur terre, il est présent dans l'atmosphère à une concentration de 0,0018 % (18 ppm), 0.00007 ppm dans la croûte terrestre et 0.04 ppm dans les océans.

3.1. Principales propriétés physicochimiques :

- ▲ Gaz incolore et inodore.
- ▲ Température d'ébullition : -246,053 °C
- ▲ Point de fusion : -248.59 °C
- ▲ Densité 0,89990 g·l⁻¹ (273 K)
- ▲ Le néon est inerte chimiquement.
- ▲ Degré d'oxydation : 0 (Zéro).
- ▲ Dans une lampe à décharge, le néon a la décharge la plus intense de tous les gaz rares et prend une teinte rouge orangé.
- ▲ Le néon est un réfrigérant plus efficace et moins cher que l'hélium.
- ▲ Il existe trois isotopes du néon : ²⁰Ne (90,48 %), ²¹Ne (0,27 %), ²²Ne (9,25 %)

3.2. Importance industrielle :

Le néon est obtenu par distillation fractionnée de l'air liquide, il est utilisé dans les lampes à décharge (couleur orangée), dans les écrans de télévision dits "plasma" en mélange avec le xénon. Il est aussi utilisé dans les lasers He-Ne.

4. L'argon :

Donne une couleur rouge ou bleue. Cela explique pourquoi il est utilisé dans les enseignes lumineuses, car lorsqu'il est mélangé avec le néon, il donne une couleur différente.

Puisque ses points d'ébullition et de fusion sont peu élevés, on l'utilise dans les thermomètres à températures élevées. Les isotopes de l'argon ne sont pas réactifs, contrairement au radon. L'argon est soluble dans l'eau.

4.1. Principales propriétés physicochimiques :

- ▲ Gaz incolore et inodore.
- ▲ Point de fusion : -189.34 °C
- ▲ Point d'ébullition : -185.89 °C
- ▲ Densité : 1.784 g dm^{-3} (273 K)
- ▲ L'argon est inerte chimiquement.
- ▲ Principaux degrés d'oxydation : Zéro.
- ▲ Il existe cinq isotopes: ^{36}Ar (0,336 %), ^{37}Ar (traces), ^{38}Ar (0,063 %), ^{39}Ar (traces), ^{40}Ar (99,6 %)
- ▲ La composition isotopique de l'argon varie beaucoup à l'intérieur du système solaire selon qu'il est produit par les roches (^{40}K – planètes telluriques) ou par nucléosynthèse stellaire (soleil – planètes géantes).

4.2. Importance industrielle :

- ❖ L'argon peut remplacer l'azote dans la plupart des applications sous atmosphère contrôlée.
- ❖ L'argon est utilisé pour éviter le contact, et donc l'interaction, entre le métal liquide et l'atmosphère ambiante, il est utilisé pour les opérations de dégazage en métallurgie, comme gaz de protection dans le soudage à l'arc et le découpage par plasma, l'argon est utilisé comme atmosphère inerte dans les lampes à incandescence
- ❖ L'industrie électronique utilise une atmosphère d'argon pour l'étirage des monocristaux de silicium et de germanium ainsi que dans la fabrication des semi-conducteurs.
- ❖ Pour ses capacités d'isolation thermique, l'argon est utilisé comme gaz de remplissage des fenêtres à double vitrage.
- ❖ Il est utilisé dans les laboratoires pour créer une atmosphère inerte.
- ❖ La pyrolyse est une autre utilisation de l'argon. C'est un procédé par lequel on place l'argon dans un cylindre de métal chauffé électriquement. Ça permet la fragmentation des différents produits. Grâce à ce procédé, on pourrait faire environ 28 millions de litres d'huile à chauffage à partir de 5 millions de vieux pneus.

5. Le krypton :

Tient son nom du mot "kryptos" qui signifie "the hidden one". Le krypton produit une couleur jaune-vert. Son point de fusion est beaucoup plus haut que celui de l'hélium, à -157 °C et son point d'ébullition à -152 °C . Sa concentration dans l'air est de 0,00011 %, dans la croûte terrestre : 0.00001 ppm, dans les océans : 0.0003 ppm

La configuration électronique de l'état fondamental est Kr ($Z = 36$): $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(3d)^{10}(4s)^2(4p)^6$

5. 1 Principales propriétés physicochimiques :

- ▲ Le krypton est inerte chimiquement.
- ▲ Point de fusion : $-157,36\text{ °C}$

- ▲ Point d'ébullition : $-153,34^{\circ}\text{C}$
- ▲ Masse volumique : $3,733 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ (273 K)
- ▲ Principaux degrés d'oxydation : 0
- ▲ Principaux composés : KrF_2 , synthétisé en 1963
- ▲ En 1960, le mètre fut défini à partir d'une caractéristique du krypton (1 650 763,73 fois la longueur d'onde dans le vide de la transition entre les niveaux $2p^{10}$ et $5d^5$ de l'isotope ^{86}Kr). En 1983, cette référence fut remplacée par la célérité de la lumière dans le vide.
- ▲ *Il existe six isotopes naturels du krypton : ^{78}Kr (0,35 %), ^{80}Kr (2,25 %), ^{82}Kr (11,6 %), ^{83}Kr (11,5 %), ^{84}Kr (57 %), ^{86}Kr (17,3 %). ^{81}Kr est utilisé pour dater les eaux souterraines (50,000–800,000 ans).*

5. 2 Importance industrielle :

- ❖ Le krypton est utilisé comme gaz de remplissage dans les lampes à incandescence : les lampes au krypton produisent une lumière de haute intensité avec une longue durée de vie.
- ❖ Les lasers utilisent le krypton pour fournir une longueur d'onde optique désirée.
- ❖ Le krypton est toujours mélangé à un halogène, généralement du fluor, pour produire les caractéristiques souhaitées. Les lasers de ce type sont appelés lasers "excimères".
- ❖ Double vitrage : le krypton est utilisé avec l'argon en remplissage pour augmenter l'isolation thermique.

6. Le xénon :

Signifie "the stranger". Le xénon est obtenu en petites quantités à partir de la distillation fractionnée de l'air liquide, il est beaucoup plus cher que les autres gaz nobles.

Il possède neuf isotopes naturels qui se situent entre 126 et 134. Le xénon est le gaz noble ayant le deuxième plus haut point de fusion et d'ébullition. Il est le moins abondant dans l'air avec 0,000009 %. Sa configuration électronique de l'état fondamental est $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(3d)^{10}(4s)^2(4p)^6(4d)^{10}(4f)^{14}(5s)^2(5p)^6$.

Il présente dans l'atmosphère : 0.086 ppm, Croute terrestre : 0.000002 ppm et les Océans : 0.00004 ppm

6.1 Principales propriétés physicochimiques :

- ▲ Le xénon est un gaz incolore et inodore.
- ▲ Masse volumique $5,887 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (gaz)
- ▲ Point de fusion : $-111,75^{\circ}\text{C}$
- ▲ Température d'ébullition : $-108,0^{\circ}\text{C}$
- ▲ Le fait d'être monoatomique en fait un gaz quasi parfait.
- ▲ Principaux degrés d'oxydation : 0 ; +II ; +IV ; +VI, +VIII
- ▲ Il existe neuf isotopes naturels de xénon : ^{124}Xe (0.10 %), ^{126}Xe (0.09 %), ^{128}Xe (1.91%), ^{129}Xe (26.4 %), ^{130}Xe (4.1 %), ^{131}Xe (21.2 %), ^{132}Xe (26.9 %), ^{134}Xe (10.4 %), ^{136}Xe (8.9 %).

- ♣ L'isotope ^{129}Xe présente un spin nucléaire $I = \frac{1}{2}$. Monoatomique, est polarisable en fonction de l'environnement électronique et cela lui confère des propriétés de sonde locale utilisée en RMN multinoyaux.

6.2 Importance industrielle :

- ❖ L'excitation électrique du xénon produit une lumière d'un blanc éclatant, les lampes à décharge au xénon ont une température de couleur proche de celle du soleil.
- ❖ Le xénon est utilisé pour le remplissage des lampes flash, il est utilisé depuis peu pour les phares d'automobile.
- ❖ Le laser à excimères de chlorure de xénon a été utilisé par exemple pour des applications en dermatologie. Dans le domaine de la médecine, le xénon peut être utilisé en anesthésie, mais il intervient également dans des dispositifs d'imagerie médicale (émission gamma du radio-isotope ^{133}Xe), elle étudie les fonctions cardiaques, respiratoires et circulatoires.
- ❖ Dans les industries, on prend le xénon pour mettre dans les lampes à haute intensité et aussi dans les lasers à ultraviolet.
- ❖ Le xénon est le carburant le plus couramment utilisé pour la propulsion ionique des engins spatiaux. Il est aussi employé dans les chambres à bulles et l'industrie des réacteurs nucléaires.

NB : Pour conclure, les six gaz rares ne réagissent pas entre eux ou avec d'autres gaz. C'est pour cela qu'on les appelle inertes. La plupart ne sont pas nocifs pour nous, c'est pourquoi ils ont plusieurs utilités.

Références

- ASHRAE, Cryogenics, Fundamentals Handbook (SI), 2002.
- P. PETIT, Séparation et liquéfaction des gaz, Techniques de l'Ingénieur, J 3600.