



## **Chapitre I : Fabrication des gaz atmosphériques**

### **I-1- Rappel**

#### **I-1-1- Définition**

Le gaz est l'un des quatre états fondamentaux de la matière, avec les solides, les liquides et le plasma. Dans des conditions ordinaires, l'état gazeux se situe entre les états « liquide et plasma ». Un gaz peut être constitué d'atomes d'un élément (par exemple,  $H_2$ , Ar) ou de composés (par exemple, HCl,  $CO_2$ ) ou de mélanges (par exemple, air, gaz naturel).

De plus, 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 »

#### **I-1-2- Exemples de gaz**

Une substance peut être nommée gaz en fonction de ses propriétés dans les conditions environnantes telles que la température et la pression. Par exemple, selon les conditions standards, et les propriétés, voici une liste d'exemples de gaz :

Air (un mélange de gaz)

Ozone

Oxygène

Hydrogène

#### **I-1-3- Liquéfaction du gaz**

La façon la plus simple de liquéfier un gaz est d'augmenter sa pression à température ambiante jusqu'à atteindre les conditions où son état stable est l'état liquide.

Cette méthode a été testée pour la première fois pour l'ammoniac par Martin van Marum vers 1760.

Selon le diagramme de phase de l'ammoniac (figure 1), la température critique de



l'ammoniac est de 132°C, tandis que sa pression de condensation est d'environ 10 atm à 26°C.

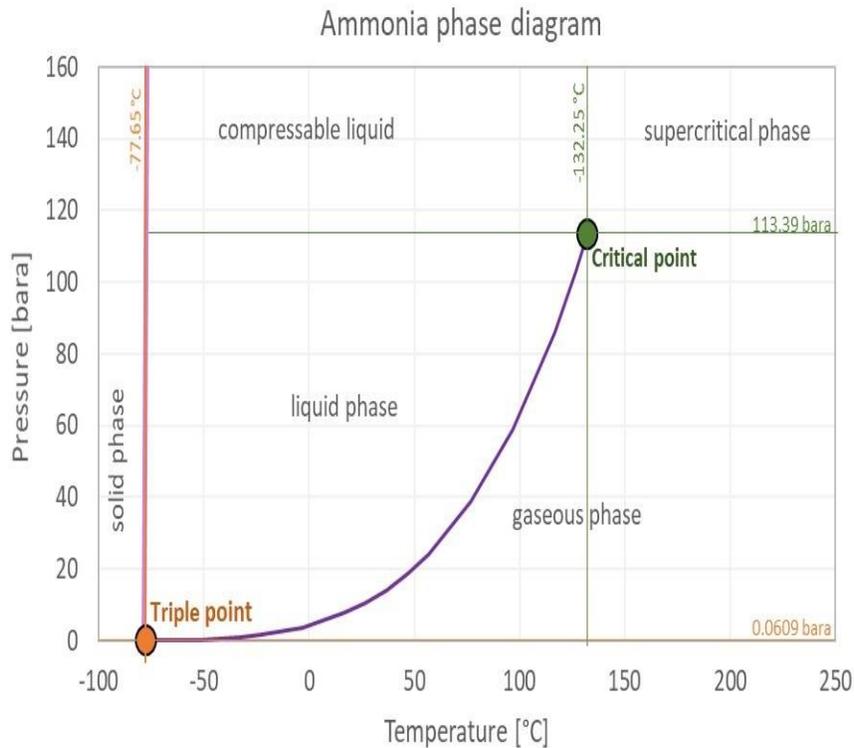


Figure 1. Diagramme de phase de l'Ammoniac

De plus, il existe de nombreux gaz dont les températures critiques sont inférieures à l'ambiante, dans lesquels la méthode de liquéfaction typique n'est pas suffisante, ce type des gaz sont appelés gaz permanents, dans lesquels ils sont définis selon une simple phrase "un gaz qui ne peut se liquéfier par simple augmentation de pression".

Par exemple, l'air, sa température critique est de -140,52°C ce qui est bien loin de la température ambiante (voir Figure 2). Par conséquent, il n'y a aucune possibilité qu'une condensation se produise sans abaisser sa température en dessous de cette valeur. Pour ces raisons, il est nécessaire d'utiliser d'autres méthodes réalisables pour cette opération, dans lesquelles sont appelées les systèmes de liquéfaction, dans laquelle ils sont basés sur la cryogénie « la production des basses températures ».

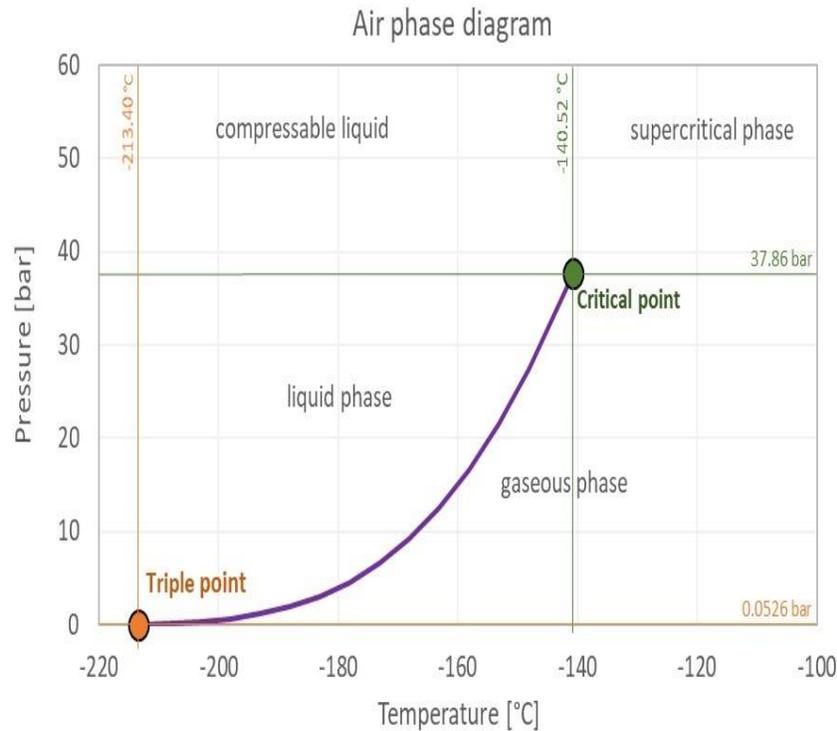


Figure 2. Diagramme de phase de l'Air

#### I-1-4- Systèmes de liquéfaction

On parle de liquéfaction lorsqu'on a un changement d'état d'un état gazeux à un état liquide. Alors, pour effectuer cette opération, il est nécessaire d'identifier les propriétés du gaz, et de déterminer s'il est classé parmi les gaz permanents dans lesquels un système de réfrigération et de liquéfaction cryogénique est nécessaire, ou une seule méthode basique de liquéfaction est suffisante, qui consiste à augmenter la pression.

Par conséquent, si le gaz est classé dans la catégorie des gaz permanents, il faut appliquer un système de liquéfaction, dans lequel ces systèmes consistent en une série de transformations thermodynamiques.

Les cycles de liquéfaction impliquent des combinaisons de compression, de refroidissement, de régénération thermique et d'expansion isenthalpique (sans échange thermique ou mécanique avec l'extérieur) ou adiabatique des fluides. Ainsi, de nombreux équipements sont nécessaires pour effectuer le processus de



liquéfaction, afin d'assurer l'échange de chaleur, la détente et la compression dans certains cas.

## I-2- Technologie de séparation de l'air

### I-2-1- Généralité

L'air est défini comme le mélange de gaz qui compose l'atmosphère terrestre, il est constitué principalement d'azote (environ 78%), d'oxygène (environ 21%), de vapeur d'eau (variable), d'argon (environ 0,9%), de dioxyde de carbone (environ 0,04 %), et de nombreuses traces d'autres gaz. L'air est caractérisé par aucune odeur perceptible et aucune couleur.

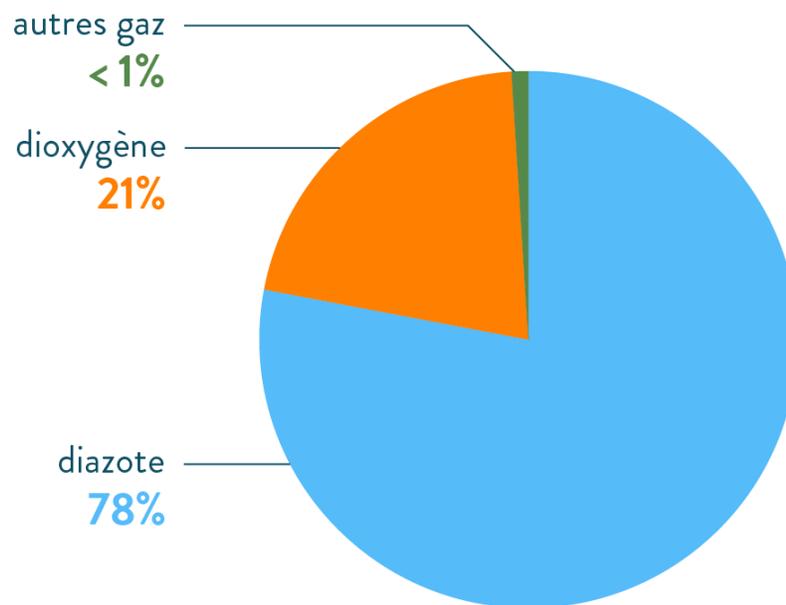


Figure 1. Composition de l'air

Les composants de l'air mentionnés ci-dessus sont vraiment critiques pour de nombreux processus industriels. Par exemple, l'oxygène est important pour de nombreuses industries, telles que la production de métaux et les industries de fabrication de produits chimiques, tandis que l'azote est utilisé pour le broyage cryogénique et le stockage cryogénique de matériaux biologiques et d'autres applications. De plus, l'argon (Ar) est utilisé comme matériau inerte dans le soudage, la sidérurgie, la fabrication électronique et autres. À cette fin, une



référence d'une page traite des principales méthodes par lesquelles ces gaz industriels courants peuvent être dérivés de l'air. Par conséquent, en raison de cette forte demande pour les composants spécifiques de l'air pour de nombreuses applications, la réflexion et la recherche sur la séparation de l'air ont depuis longtemps commencé, dans lesquelles de nombreux procédés et installations ont été inventés et installés pour le séparer en ses composants principaux.

En retour, les méthodes de séparation de l'air peuvent être divisées selon leur nature en deux catégories principales : la première se réfère à la séparation cryogénique de l'air tandis que la seconde est les procédés non cryogéniques. La première catégorie est la plus connue et la plus utilisée, notamment lorsqu'une grande pureté et des taux de production élevés sont requis, le principe de travail de cette catégorie consiste à employer une distillation à basse température afin de le séparer en  $N_2$ ,  $O_2$  et Ar soit gaz ou liquides, puis, pour les procédés non cryogéniques, ils fonctionnent près de la température ambiante et sont utilisés pour la production d'azote ou d'oxygène sous forme de gaz. Ces procédés peuvent constituer un choix rentable lorsque la demande de gaz est relativement faible et que la très grande pureté des gaz n'est pas requise.

Selon la littérature et les connaissances de fabrication de l'industrie, il existe trois méthodes connues dominantes pour la séparation de l'air, et elles sont répertoriées comme suit :

- Procédé de distillation cryogénique, ou Rectification à basse température,
- Adsorption,
- Séparation membranaire.

Les points suivants présentent ces méthodes qui sont les plus couramment utilisées pour la séparation de l'air.

## **I-2-2- Procédés de séparation de l'air**

### **I-2-2-1- Séparation cryogénique de l'air**

Comme mentionné précédemment, la séparation cryogénique de l'air est la technologie la plus couramment utilisée et la plus rentable pour la séparation de composants de très haute pureté.



Par conséquent, ce procédé de séparation est utilisé dans les usines à grande ou moyenne échelle pour séparer les composants de l'air en gaz et/ou produits liquides. Il se caractérise par différentes échelles de consommation, dans lesquelles les besoins énergétiques dépendent directement du mélange de produits et des puretés du produit final. Cependant, il est nécessaire de mentionner que la configuration qui produit du gaz en tant que produits finaux nécessite moins de puissance que ceux où les produits finaux sont liquides.

Par ailleurs, la conception et le dimensionnement des systèmes et cycles cryogéniques utilisés pour la séparation des composants de l'air dépendent également du nombre de produits souhaités en fin de procédé : azote ; oxygène ; à la fois de l'oxygène et de l'azote ; ou azote, oxygène et argon, outre la pureté requise des résultats obtenus, et également si certains produits doivent être sous forme liquide.

En général, tous les configurations de séparation cryogénique basés sur le fait que les différents composants de l'air ont des points d'ébullition différents, et en manipulant les conditions extérieures telles que la pression et la température, l'air peut être séparé. En outre, comme mentionné précédemment, tous les configurations consistent en une série d'étapes similaires, qui peuvent être répertoriées comme suit :

- La compression et le filtrage de l'air

Un processus de compression de l'air ambiant est effectué via un compresseur à plusieurs étages avec des refroidisseurs intermédiaires à une pression d'environ 6 bars (pression absolue). Parallèlement, l'utilisation d'un filtre est de mise afin d'éliminer les poussières, généralement les filtres sont situés à l'entrée du compresseur.

- Le refroidissement et la purification de l'air

Après la compression, l'air est ensuite refroidi à l'aide d'eau à une température proche de la température ambiante, après cela, un processus de purification a lieu à l'aide d'un tamis moléculaire absorbant visant à éliminer le dioxyde de carbone et les hydrocarbures.



- Le procédé de réfrigération/liquéfaction

À l'aide d'échangeurs de chaleur et de processus de réfrigération, l'air comprimé est refroidi à l'aide de la « boîte froide », où il atteint une température cryogénique d'environ  $-180^{\circ}\text{C}$ . Ensuite, un refroidissement final a lieu à travers un processus d'expansion de l'alimentation utilisant une machine d'expansion. Après cela, le mélange résultant est séparé et introduit dans la colonne de séparation.

- Le procédé de séparation

Habituellement, la colonne de séparation est divisée en deux parties selon la pression, une partie haute pression et une partie basse pression. Le mélange résultant s'écoule à travers la partie haute pression, dans laquelle il se sépare en azote en haut et en air enrichi en oxygène en bas.

Après cela, l'air enrichi en oxygène de la partie haute pression s'écoule dans la partie basse pression, où il est encore purifié, dans lequel l'azote pur est finalement retiré du haut des colonnes haute et basse pression et l'oxygène pur est soutiré en cuve de la colonne basse pression.

De plus, l'Argon est enrichi dans la partie médiane de la partie basse pression, dans laquelle il peut être soutiré et envoyé vers un traitement complémentaire de production.

Dans les processus typiques, l'alimentation de la partie basse pression est envoyée à la colonne d'argon brut, dans laquelle le produit de celle-ci est passé à travers un convertisseur catalytique pour éliminer l'oxygène restant avant qu'il ne passe à travers la colonne d'argon pur où tout azote restant est supprimé.

La figure suivante montre un diagramme schématique d'un procédé typique de séparation d'air





### I-2-2-2- Séparation de l'air par adsorption

Le procédé d'adsorption est un processus non cryogénique, ce processus basé sur la capacité de certains matériaux naturels et synthétiques à adsorber préférentiellement soit l'azote soit l'oxygène. En général, cette technologie est principalement utilisée pour produire soit de l'azote, soit de l'oxygène. De manière simple, une compression de l'air a lieu puis il traverse une cuve qui contient des matériaux adsorbants dans lesquels ils adsorbent le composant souhaité.

Dans ce procédé, le choix de l'adsorbant approprié repose directement sur ses caractéristiques d'adsorption et les produits finaux souhaités, dans lesquels ses caractéristiques doivent garantir que seuls quelques composants (indésirables) de l'air sont capturés par l'adsorbant.

Habituellement, les usines de production d'oxygène qui utilisent la technologie d'adsorption utilisent des tamis moléculaires de zéolite comme moyen d'adsorber l'azote, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau résiduelle en plus d'autres gaz, par conséquent, ce processus garantit l'obtention d'oxygène avec une pureté dans la gamme de 93 % à 95 %, ce pourcentage varie en fonction de la teneur en argon, qui est généralement de l'ordre de 4,5 % à 5 %.

En revanche, les usines de production d'azote qui utilisent la technologie d'adsorption utilisent un matériau de tamis moléculaire à charbon actif qui agit sur l'élimination de l'oxygène et d'autres composants indésirables par adsorption.

Certaines usines utilisent une unité "de-oxo", cette unité combine catalytiquement l'hydrogène avec l'oxygène comme moyen de produire de l'eau dans le "produit" d'azote après le processus d'adsorption. Après cela, l'eau est éliminée par refroidissement et adsorption supplémentaire.

Habituellement, l'azote produit a une pureté qui varie entre 95 % et 99,5 %, cette pureté dépend de la taille de l'équipement et du rapport entre l'alimentation en air et le produit.

Pour le principe de fonctionnement de ce procédé, de manière simple, l'air sous pression circule dans une cuve qui contient le lit d'adsorbant. A travers la cuve, l'azote/oxygène est adsorbé et un flux d'effluent riche en oxygène/azote est produit



jusqu'à ce que le lit d'adsorbant soit saturé en azote/oxygène.

À ce stade, l'alimentation en air est commutée vers le récipient frais suivant et le procédé de régénération du lit d'adsorbant dans le premier récipient démarre. Le procédé de régénération peut être accompli en chauffant le lit d'adsorbant ou en réduisant la pression dans le lit d'adsorbant, ce qui réduit la capacité de rétention d'azote/oxygène à l'équilibre de l'adsorbant, le premier processus étant communément appelé adsorption modulée en température « temperature swing adsorption » (TSA), tandis que le second celle basée sur la réduction de pression est communément connue sous le nom : d'adsorption modulée en pression ou sous vide « pressure or vacuum swing adsorption » (PSA ou VSA). La figure suivante montre un diagramme schématique d'un processus d'adsorption typique.

### Procédé de séparation de l'air basé sur la technologie d'adsorption

Université d'El Oued

Dr. Redjeb

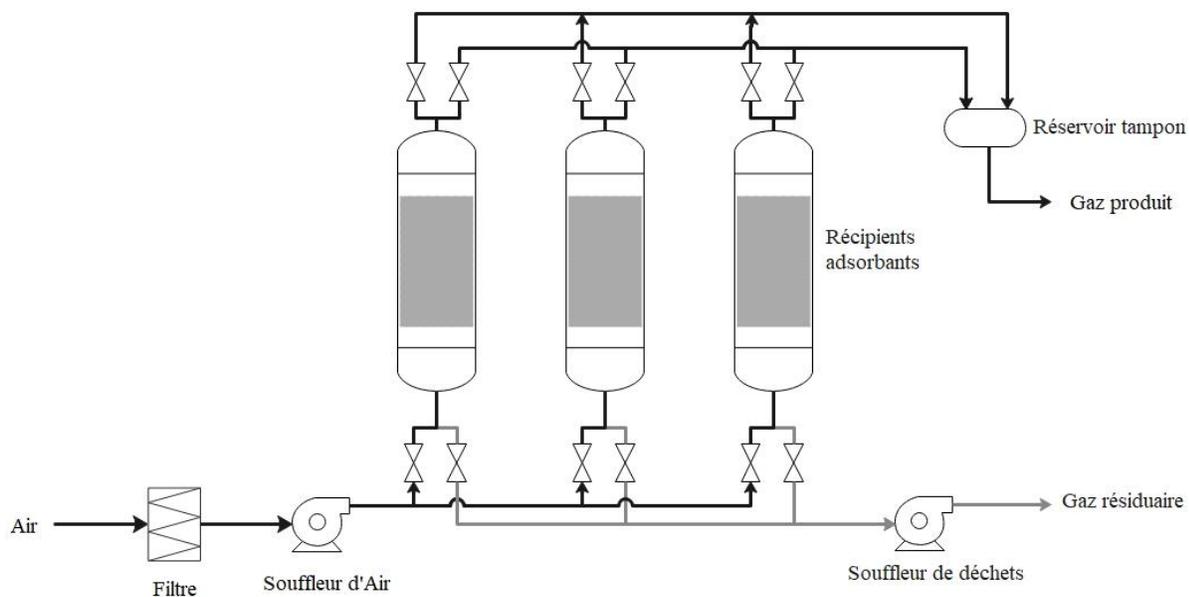


Figure 3. Procédé de séparation de l'air basé sur la technologie d'adsorption



### I-2-2-2- Technologie de séparation membranaire

La technologie de séparation membranaire est un procédé basé dans son principe sur les différentes vitesses de diffusion d'un composant gazeux à travers une membrane polymère.

Cette technologie de séparation utilise des faisceaux de tubes fabriqués à partir de polymères spéciaux, avec une configuration similaire à un échangeur de chaleur à calandre et tube.

Par conséquent, pour l'Air, on peut dire que les procédés membranaires utilisant des matériaux polymères pour la séparation de l'air sont basés sur la différence des taux de diffusion de l'oxygène et de l'azote à travers une membrane. Le processus de séparation de l'air utilisant cette technologie repose sur le fait que ses différents composants ont des taux de pénétration différents à travers le film polymère.

Comme mentionné précédemment, les composants de l'air ont des taux de pénétration différents à travers le film polymère, dans lequel l'oxygène ainsi que la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone sont considérés comme des « gaz rapides » qui diffusent plus rapidement à travers les parois du tube que les « gaz lents » qui sont représentés dans l'argon et l'azote.

Ces caractéristiques permettent la conversion de l'air en un produit qui est un mélange inerte composé principalement d'azote gazeux et d'argon, et de gaz résiduaux riches en oxygène, vapeur d'eau et dioxyde de carbone est évacué de la coque (Voir Figure 4).

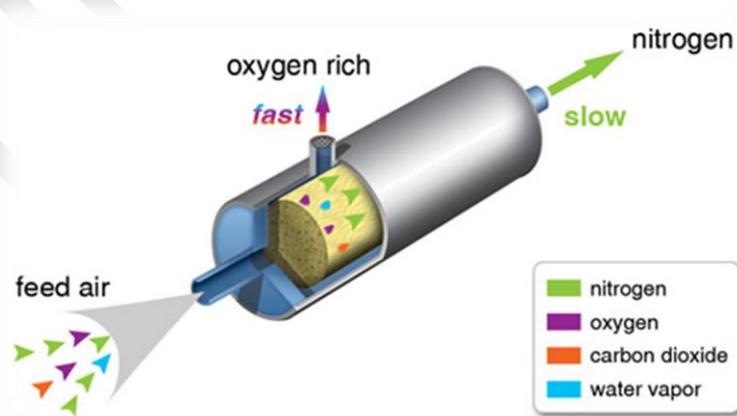


Figure 4. Cartouche à membrane pour séparation d'air



Pour le principe de fonctionnement de ce procédé, l'air est d'abord filtré, puis comprimé à la pression requise, séché puis s'écoule à travers un module à membrane, dans lequel pénètrent les composants de l'air à plus haut taux de diffusion (tels que  $O_2$  et  $CO_2$ ). Les fibres de la membrane polymère plus rapidement, d'où un flux riche en azote. Habituellement, la pureté du gaz  $N_2$  varie entre 93 % et 99,5 %, cette valeur dépend du débit à travers le module membranaire.

Ce procédé est couramment utilisé pour la production d'azote, mais dans le cas où le produit souhaité est l'oxygène, les systèmes à membrane sont normalement limités à la production d'air enrichi en oxygène (généralement entre 25 % et 50 % d'oxygène), dans lequel l'utilisation des membranes incorporent un agent complexant l'oxygène pour augmenter la sélectivité de l'oxygène, comme moyen d'augmenter la pureté de l'oxygène.

La figure suivante montre un diagramme schématique du procédé membranaire pour la séparation de l'air.

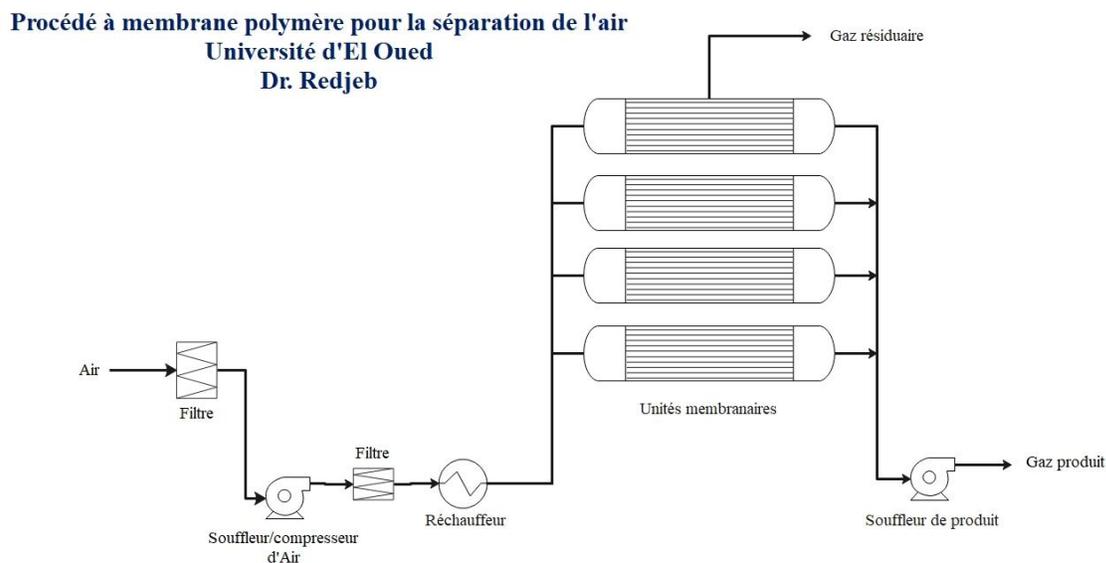


Figure 5. Procédé membranaire pour la séparation de l'air

Cependant, ces procédés présentés sont les plus connus et utilisés dans la séparation des composants de l'air, mais il existe encore de nombreuses autres technologies qui s'appliquent dans le même but, et présentent une bonne efficacité,



parmi elles ; La technologie des membranes de transport d'ions (ITM), les technologies de procédés chimiques.

Ces technologies sont également des alternatives à celles largement utilisées, et peuvent être utiles dans certaines conditions et selon les produits recherchés.

### **I-3- Projet**

Effectuez une recherche sur les deux dernières technologies mentionnées pour la séparation de l'air et citez la différence entre elles et celles présentées dans ce chapitre.



## Références

P. PETIT, Séparation et liquéfaction des gaz, Techniques de l'Ingénieur, J 3600.

Mechanical Engineers' Handbook: Energy and Power, Volume 4, Third Edition

Compressed Gas Association, Inc. Handbook of Compressed Gases, 3rd ed. Van Nostrand Reinhold, New York (1990)

Ayad ouardia et Chouimet imene « Etude et simulation des cycles de liquéfaction des gaz cryogéniques », mémoire de master en génie mécanique, université de Bouira Akli Mohand Oulhadj, 2016, pages : 25-27 et 31-37

Zohuri B. (2017) Heat Exchanger Types and Classifications. In: Compact Heat Exchangers. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29835-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29835-1_2)

Servomex Group Limited, Servomex Total Solution for Gas Analysis on Cryogenic Air Separation Plants, Crowborough, East Sussex, UK

Smith AR, Klosek J. A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes. Fuel Process Technol 2001;70(2):115–34.

Pour les autres chapitres ou plus d'informations, merci d'utiliser le code QR

