



Cours:
Industrie des gaz industriels

M1 : Génie du Raffinage

Cours: Industrie des gaz industriels

Le Module

UE Découverte Code : UED 1.1 Crédits : 2 Coefficients : 2	Industrie des Gaz Industriels	1	1	1h30			22h30	02h30		100%
	Sécurité des procédés industriels	1	1	1h30			22h30	02h30		100%

M1 : Génie du Raffinage

Cours: Industrie des gaz industriels

Le Module

Cette matière souligne les applications commerciales des gaz industriels et il admet pour principale vocation la description de la fabrication de gaz et son transport ainsi que la technologie industrielle de séparation. Ce module est prévu pour constituer une base qui permet la compréhension des facteurs qui composent le coût de production et de fourniture des gaz.

Connaissances préalables recommandées: Chimie organique, Phénomènes de transfert

Contenu de la matière:

Chapitre 1. Fabrication des gaz atmosphériques (3 Semaines)

(Technologie de séparation de l'air, Procédés cryogéniques)

Chapitre 2. Production du gaz de synthèse (4 Semaines)

(Bref historique sur les procédés d'obtention du gaz de synthèse, exemples de Production du gaz de synthèse)

Chapitre 3. Séparation du gaz de synthèse (4 Semaines)

(Séparation et purification, Exemple de l'hydrogène)

Chapitre 4. Stockage et transport des gaz industriels (4 Semaines)

(Stockage, Transport routier, Transport par canalisation)

Mode d'évaluation:

Examen: 100 %.

Rappel

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 »

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Exemples de gaz

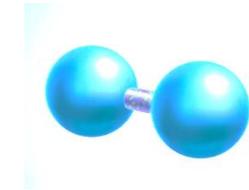
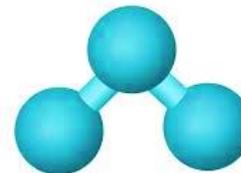
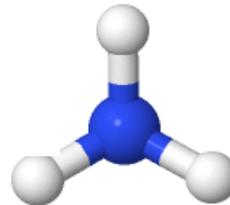
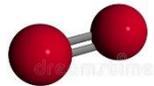
Une substance peut être nommée gaz en fonction de ses propriétés dans les conditions environnantes telles que la température et la pression. Par exemple, selon les conditions standards, et les propriétés, voici une liste d'exemples de gaz :

Air (un mélange de gaz)

Ozone

Oxygène

Hydrogène



Liquéfaction du gaz

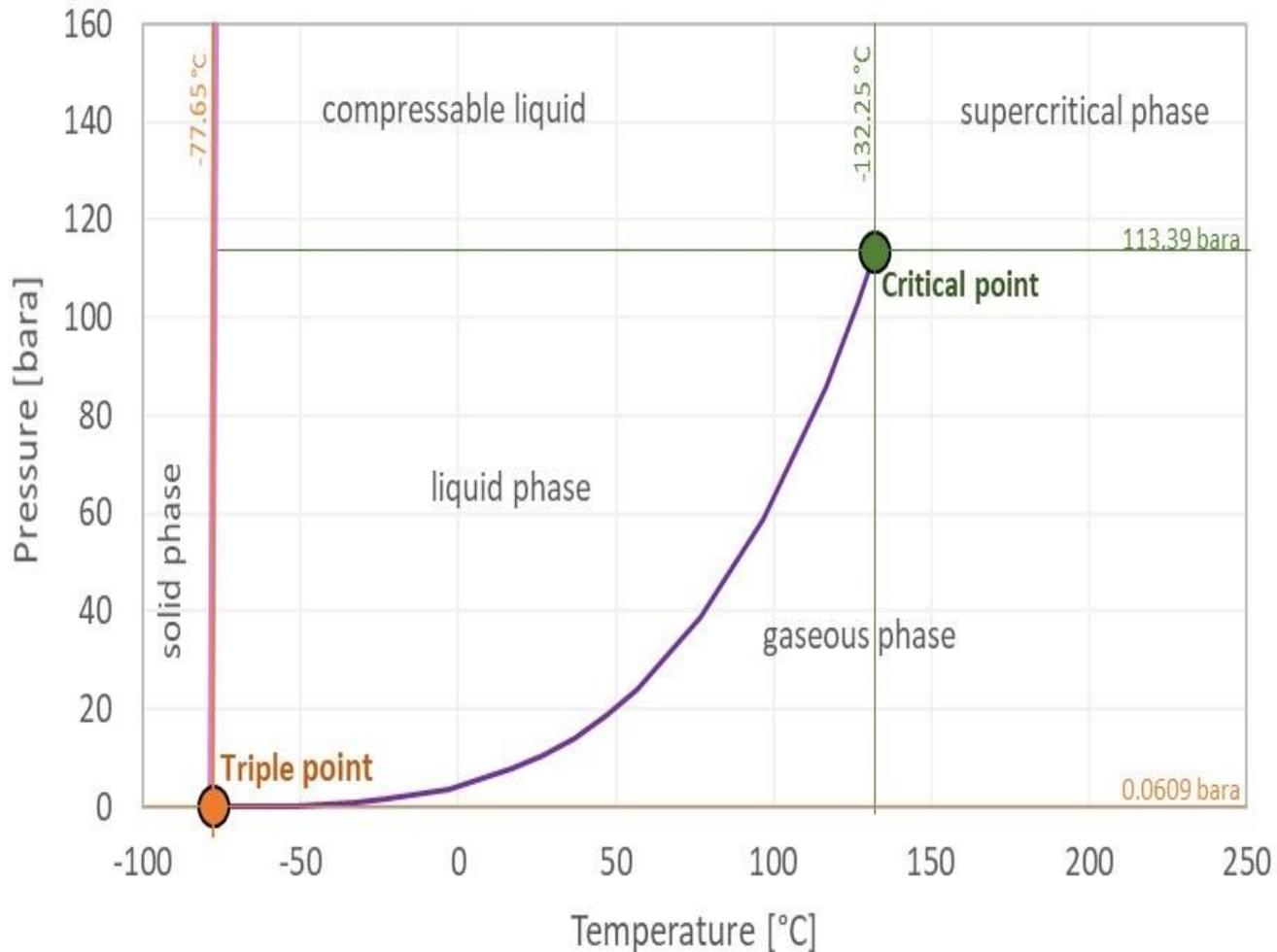
La façon la plus simple de **liquéfier** un gaz est d'augmenter sa pression à température ambiante jusqu'à atteindre les conditions où son état stable est l'état liquide.

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, la température critique de l'ammoniac est de **132°C**, tandis que sa pression de condensation est d'environ **10 atm à 25°C**.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Ammonia phase diagram



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

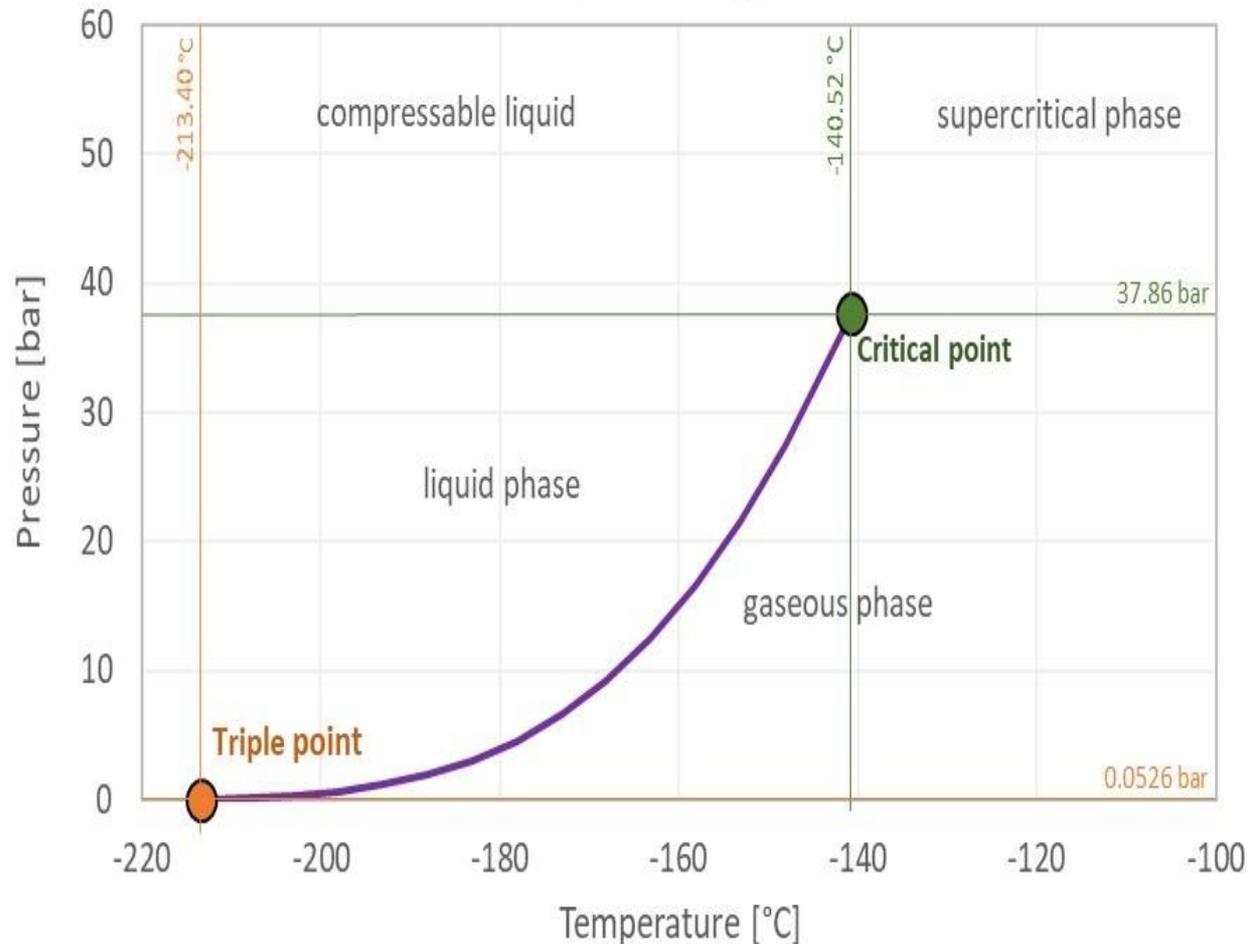
De plus, il existe de nombreux gaz dont les températures critiques sont inférieures à l'ambiante, dans lesquels la méthode de liquéfaction typique n'est pas suffisante, ce type des gaz sont appelés **gaz permanents**, dans lesquels ils sont définis selon une simple phrase "un gaz qui ne peut se liquéfier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

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Par exemple, l'air, sa température critique est de $-140,52^{\circ}\text{C}$ ce qui est bien loin de la température ambiante. 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 ».

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Air phase diagram



Systemes 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.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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)

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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.

Les échangeurs de chaleur

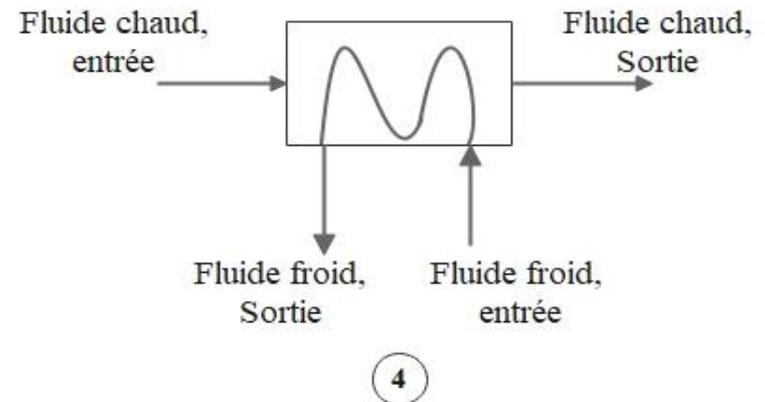
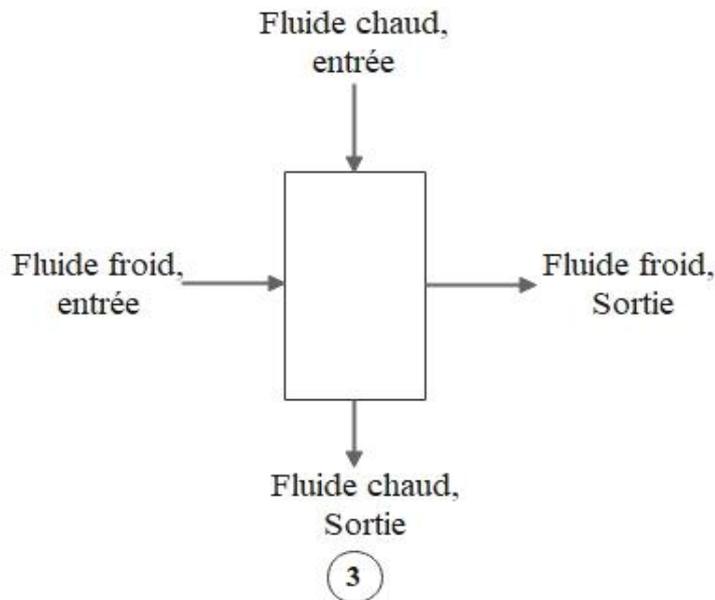
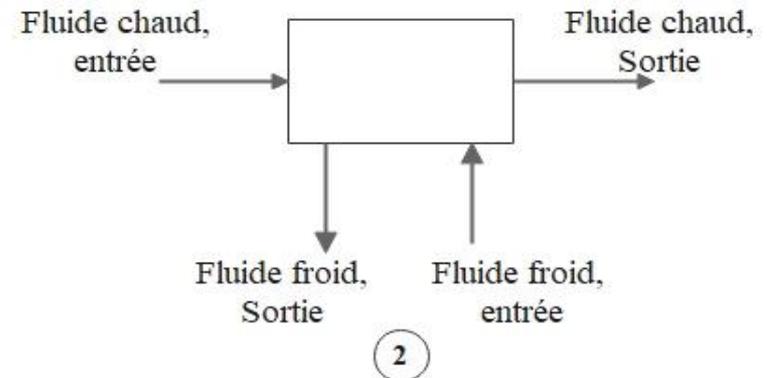
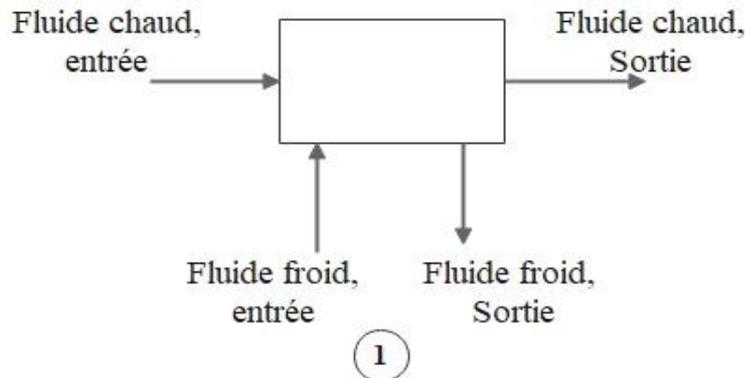
Les échangeurs de chaleur sont des équipements largement connus utilisés pour assurer le transfert de la chaleur entre deux ou plusieurs fluides. De plus, les échangeurs de chaleur sont généralement utilisés dans les processus de refroidissement et de chauffage. Par conséquent, les échangeurs de chaleur sont parmi les principaux composants des systèmes **cryogéniques**.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Le principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur consiste à transférer la chaleur sans transférer **ni mélanger** le fluide qui transporte la chaleur, où le fluide chaud se refroidit et le fluide froid se réchauffe, sans contact direct.

On peut classer les échangeurs de chaleur en fonction de leur travail de base en 4 types basés sur la configuration du chemin d'écoulement

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

1. **Écoulement parallèle**, les deux flux de fluide entrent ensemble à une extrémité, s'écoulent dans la même direction et partent ensemble à l'autre extrémité.
2. **À contre-courant**, les deux flux se déplacent dans des directions opposées.
3. **Flux croisé à passage unique**, un fluide se déplace à travers le transfert de chaleur vers le trajet d'écoulement de l'autre fluide.
4. **Flux croisé multi passe**, un flux de fluide revient en arrière et plusieurs traversent le trajet d'écoulement de l'autre flux de fluide

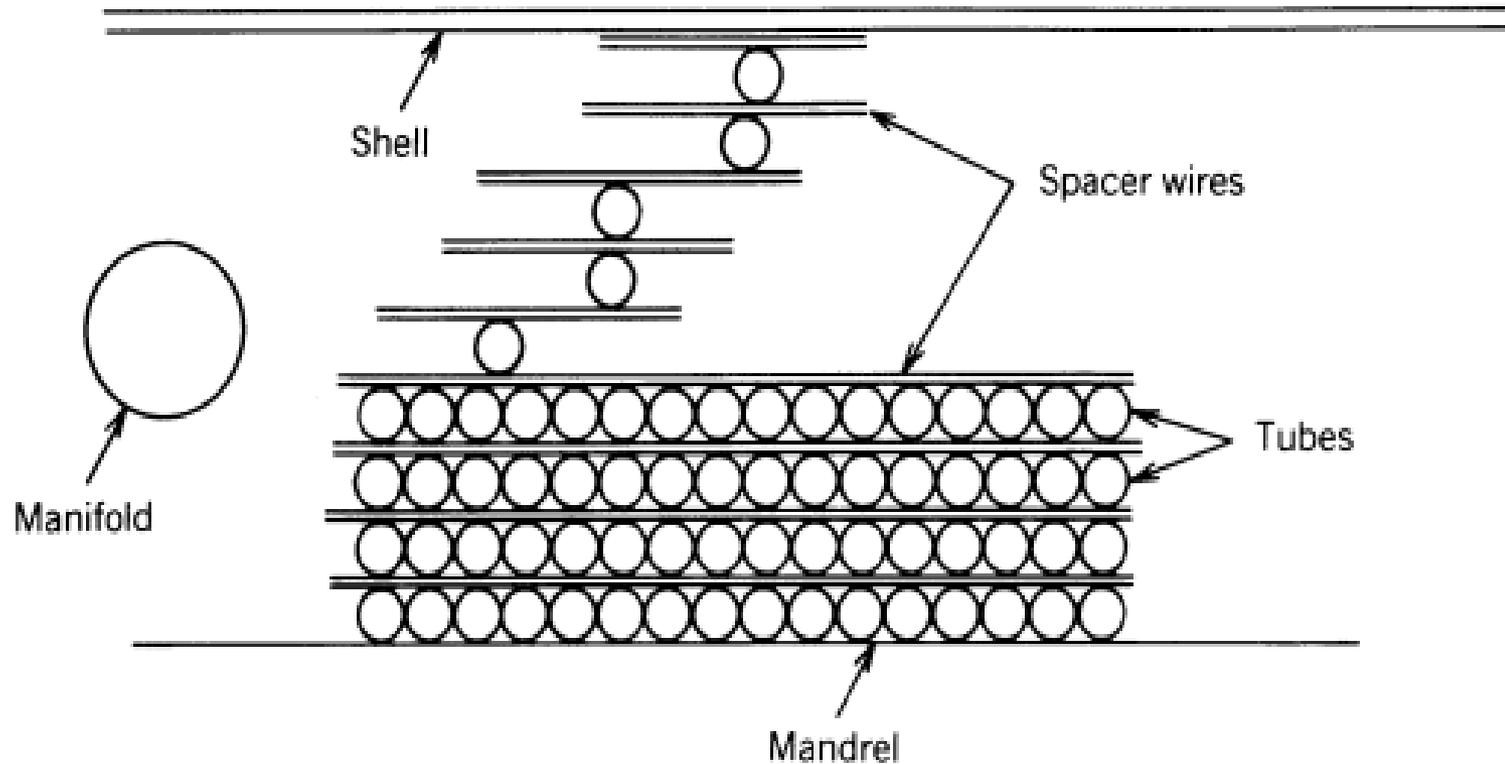
Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

La différence entre ces quatre types de base peut être citée dans la **surface de transfert de chaleur** nécessaire pour transférer la quantité de chaleur souhaitée entre les deux fluides. Aussi, il est important de noter que **plus** la configuration est **complexe**, **plus** les technologies sont **coûteuses**, un facteur peut influencer directement sur la faisabilité de la technologie d'un point de vue économique.

Échangeurs de chaleur dans les systèmes de liquéfaction

En fait, il existe deux échangeurs de chaleur couramment utilisés, le premier se réfère aux échangeurs **à tube enroulé dans une coque**, dans lesquels presque des systèmes ventilés ont été utilisés de ce type. Cependant, l'échangeur à tube enroulé dans une coque est coûteux et nécessite une grande quantité de main-d'œuvre. Ses avantages sont qu'il peut fonctionner à n'importe quelle pression supportée par le tube, et qu'il peut être construit sur des gammes de taille très larges et avec une grande flexibilité de conception.

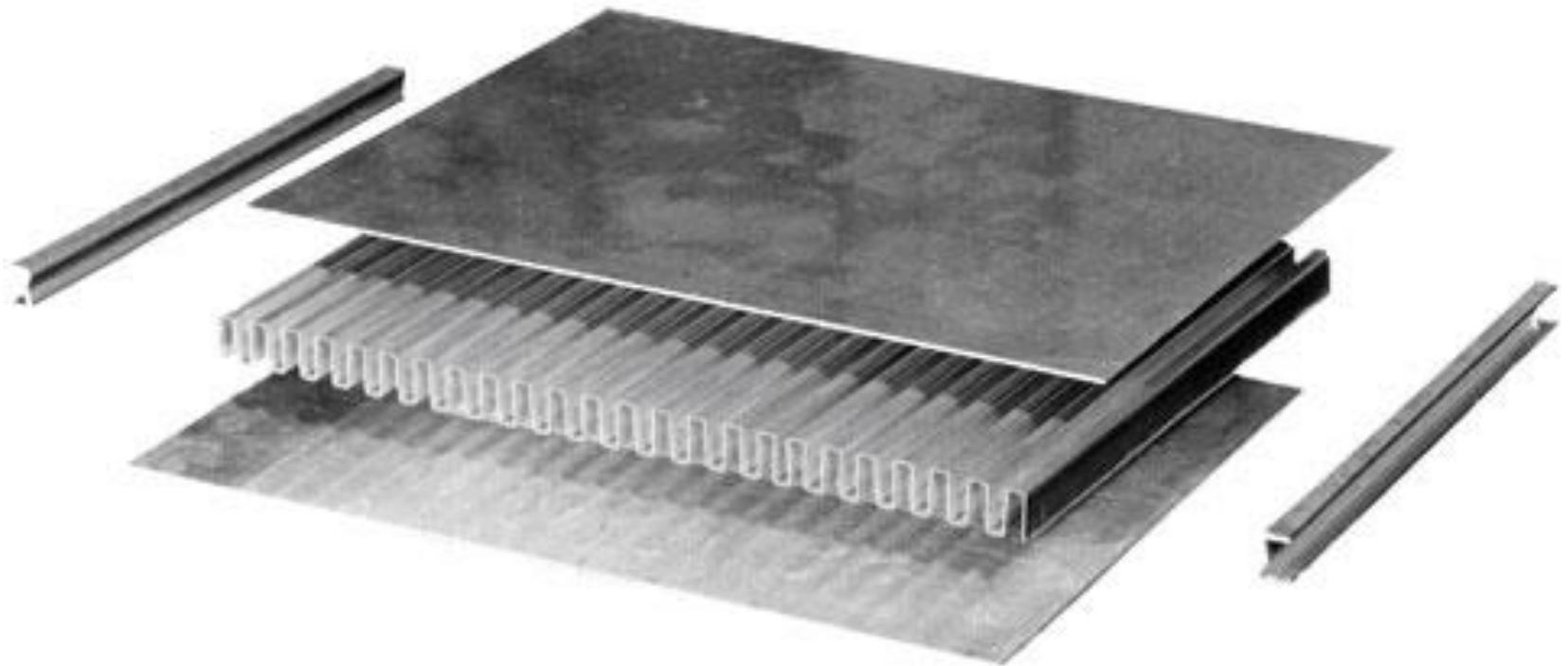
Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Le deuxième type d'échangeurs de chaleur couramment utilisés est **l'échangeur à plaques et ailettes**, qui est devenu plus tard le type le plus couramment utilisé. Car ce type assure un coût relativement faible et une forte concentration de surface par mètre cube de volume d'échangeur

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



Machines à expansion

Les machines à expansions sont des appareils qui permettent de **convertir** l'énergie d'un gaz ou d'une vapeur en travail mécanique lors de sa détente. Habituellement, ce processus se fait très rapidement et réduit considérablement la quantité de chaleur transférée ou reçue par le système.

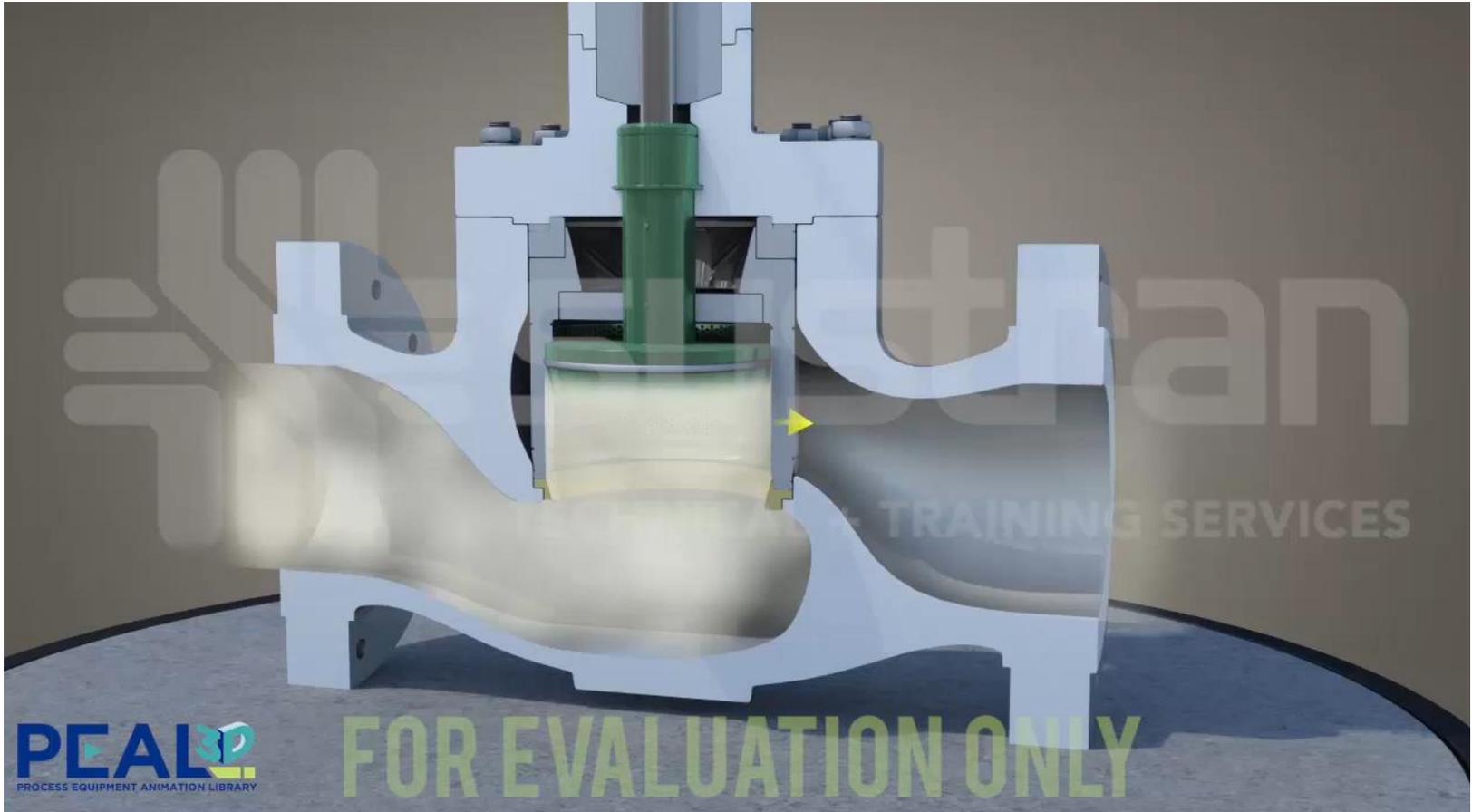
Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Donc, les machines à expansion pour le processus de liquéfaction du gaz sont généralement utilisées pour produire du **froid** en détendant un gaz dans une machine.

Parmi les machines de détente utilisées dans les cycles **cryogéniques** de liquéfaction, la valve de Joule Thomson, ainsi que les turbines, la Figure suivante illustre des images réelles pour une valve de Joule Thomson et une turbine cryogénique.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques





Cycles de liquéfaction

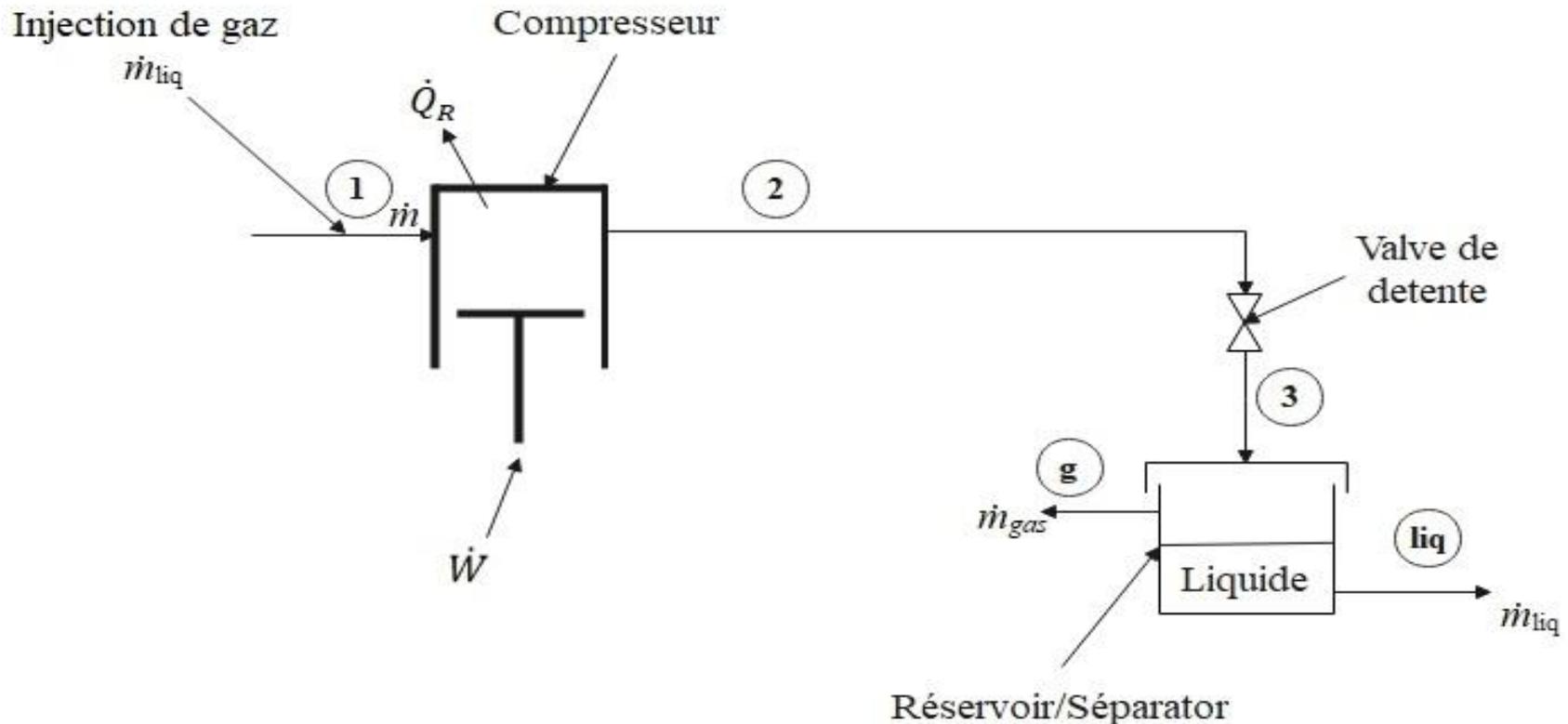
Comme mentionné précédemment, afin de liquéfier les gaz **permanents**, il est nécessaire d'utiliser des méthodes améliorées à cette fin, pour cette raison, de nombreux chercheurs et scientifiques travaillent sur l'invention de différents systèmes et cycles qui garantissent l'occurrence de ce processus. Les cycles de liquéfaction expliqués dans ce cours sont cités comme suit :

- **Cycle (Expansion libre à travers une valve)**
- **Cycle de Linde**
- **Cycle de Claude**
- **Cycle de Kapitsa**
- **Cycle Cascade**

Cycle (Expansion libre à travers une valve)

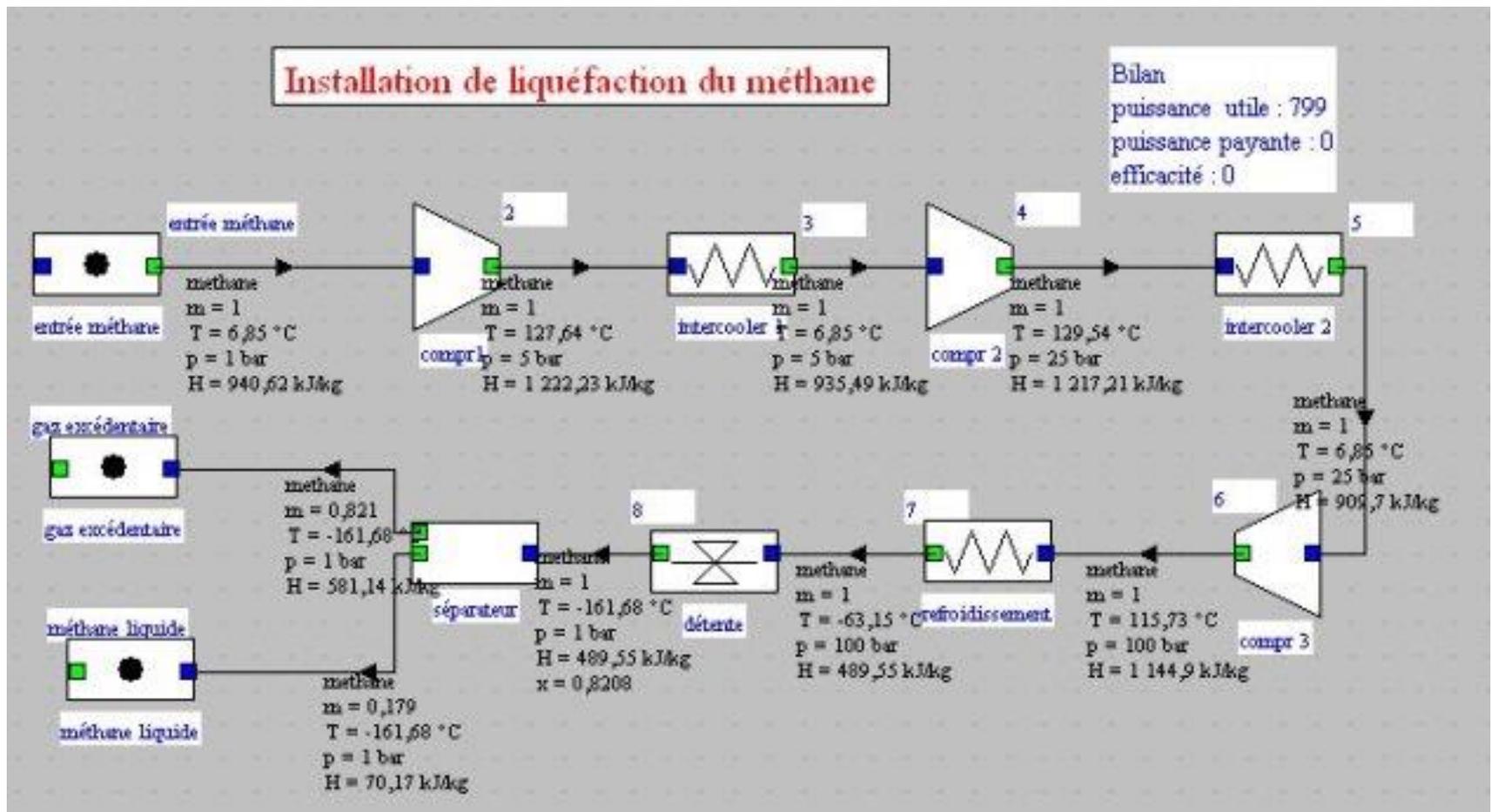
Ce cycle se caractérise par une configuration très simple, dans laquelle son principe de travail consiste en la **compression** du gaz en de nombreuses étapes, y compris un refroidissement intermédiaire, afin d'atteindre la pression nécessaire en fonction des propriétés du gaz, puis il traverse une valve de détente dans laquelle une détente rapide se produit, après cela, elle entre dans un séparateur ou un réservoir où deux phases différentes avec des fractions différentes sont séparées.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

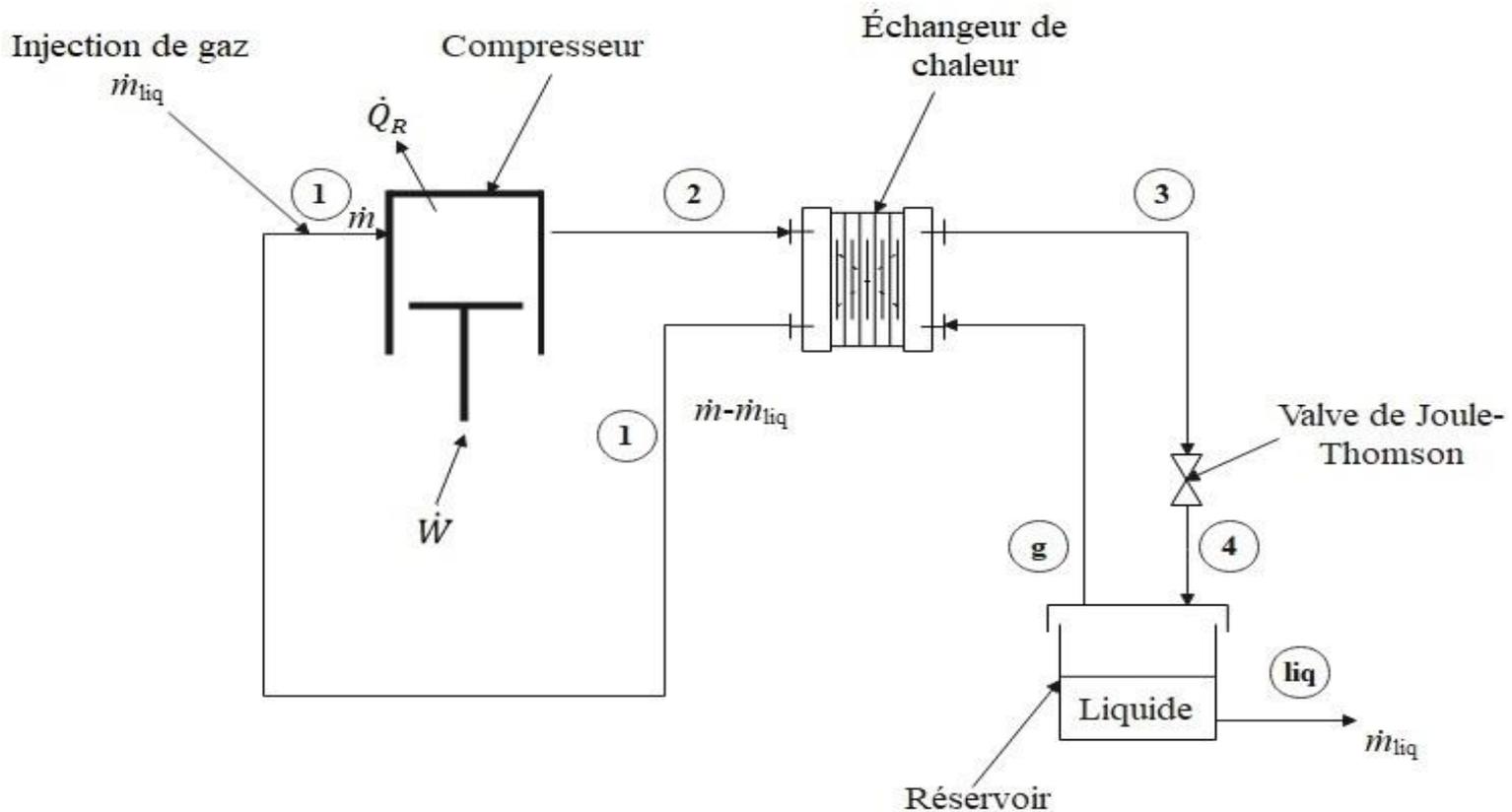
Exemples



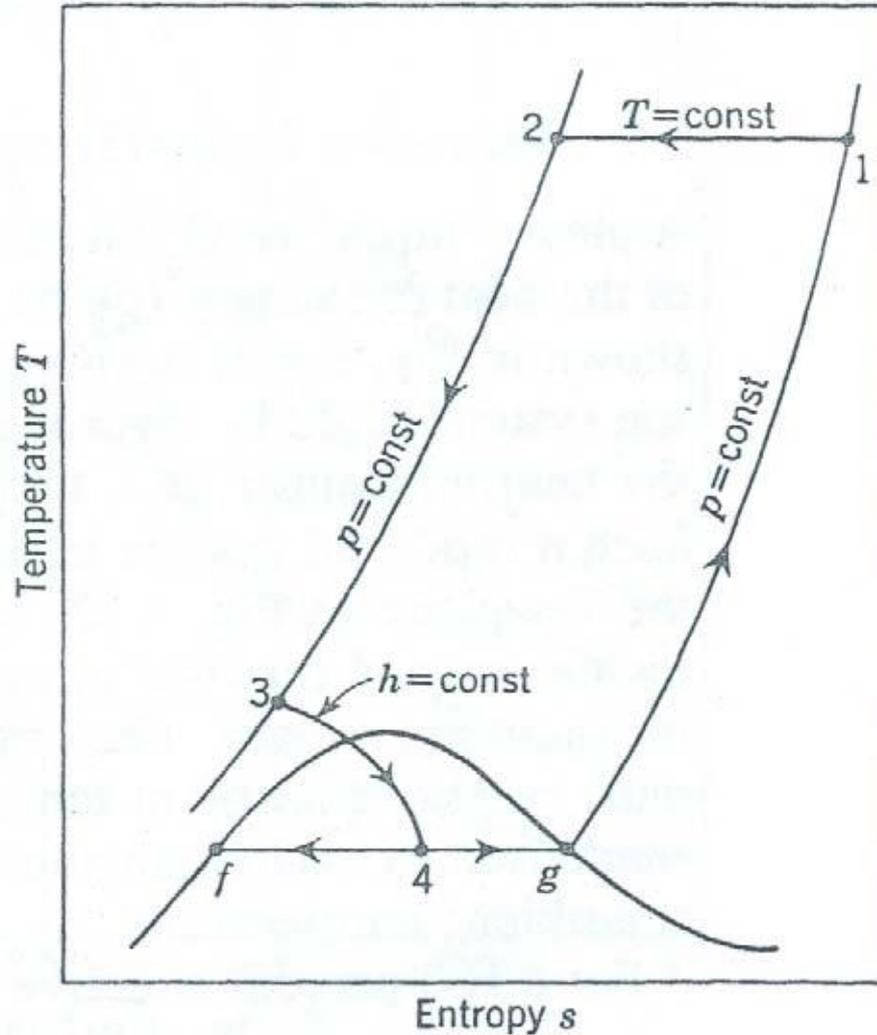
Cycle de Linde

Le cycle de Linde est l'un de plus simple systèmes de liquéfaction, il repose sur la détente **isenthalpique** (Joule-Thomson) mais il nécessite un refroidissement préalable pour abaisser la température des gaz à l'aide de l'air ambiant ou autre fluide froid. Après la détente Joule-Thomson, on obtient une fraction « y » de liquide et une fraction « $1-y$ » de vapeur. Un schéma du cycle de Linde et la représentation du cycle dans le diagramme T-s sont illustrés dans les figures suivantes .

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



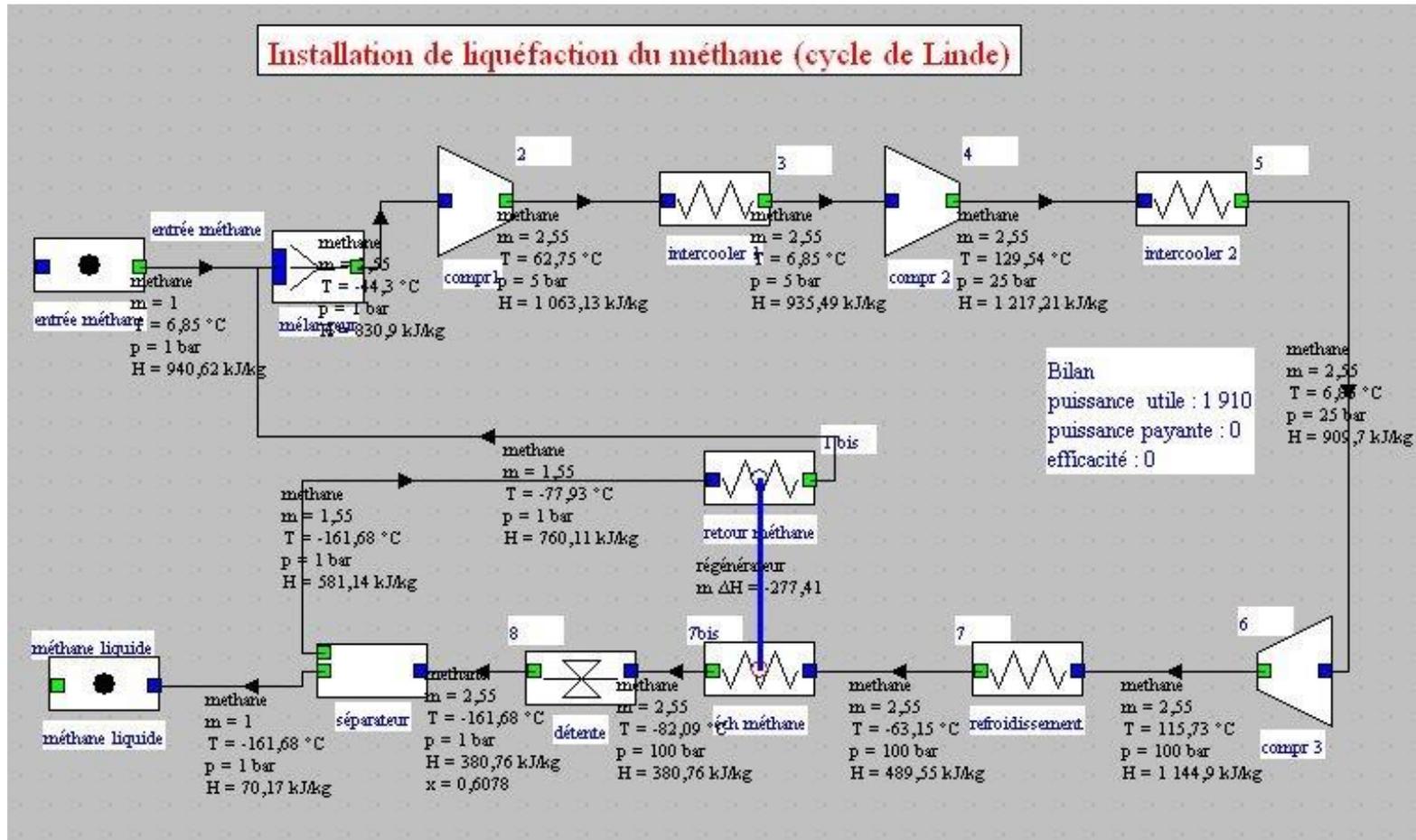
Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Les processus **1** à **2** seraient en fait deux processus : une compression **isotherme** « compression suivie d'un refroidissement ultérieur pour abaisser la température du gaz à quelques degrés près de la température ambiante ». Le gaz passe ensuite dans un échangeur de chaleur à pression constante (idéalement) dans lequel il échange de l'énergie avec le flux basse pression sortant vers le point **3**.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

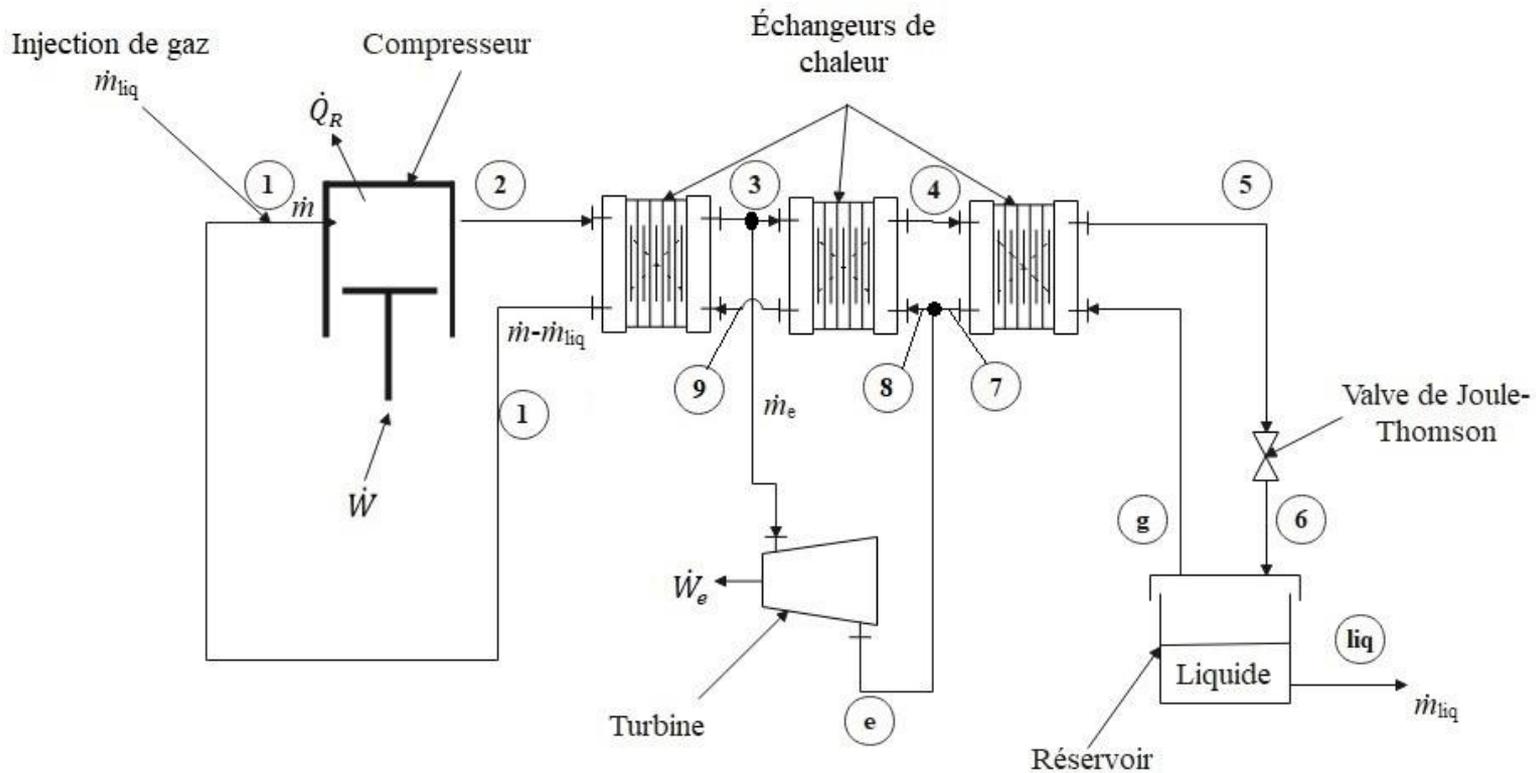
Du point 3 au point 4, le gaz se détend à travers un détendeur jusqu'à point 4. Au point 4, une partie du flux gazeux est à l'état liquide et est soutiré à la condition liq (condition de liquide saturé), et le reste du gaz quitte le récepteur de liquide à la condition g (condition de vapeur saturée). Ce gaz froid est finalement réchauffé à la température initiale en absorbant l'énergie à pression constante (idéalement) du flux haute pression entrant.

Exemples

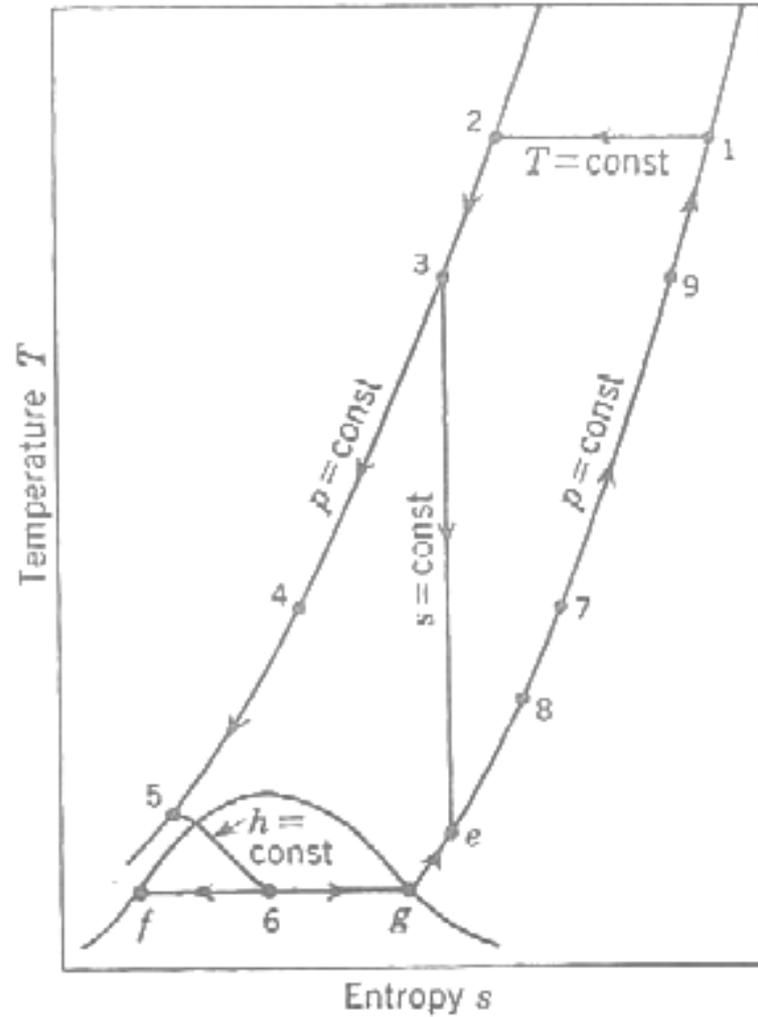


Cycle de Claude

Dans le cycle de Claude, un dispositif supplémentaire a été intégré au schéma du cycle de Linde, ou dans lequel ce dispositif travaille sur le retrait d'énergie du flux gazeux en lui permettant d'effectuer un travail à l'aide d'un **détendeur** ou **turbine**.



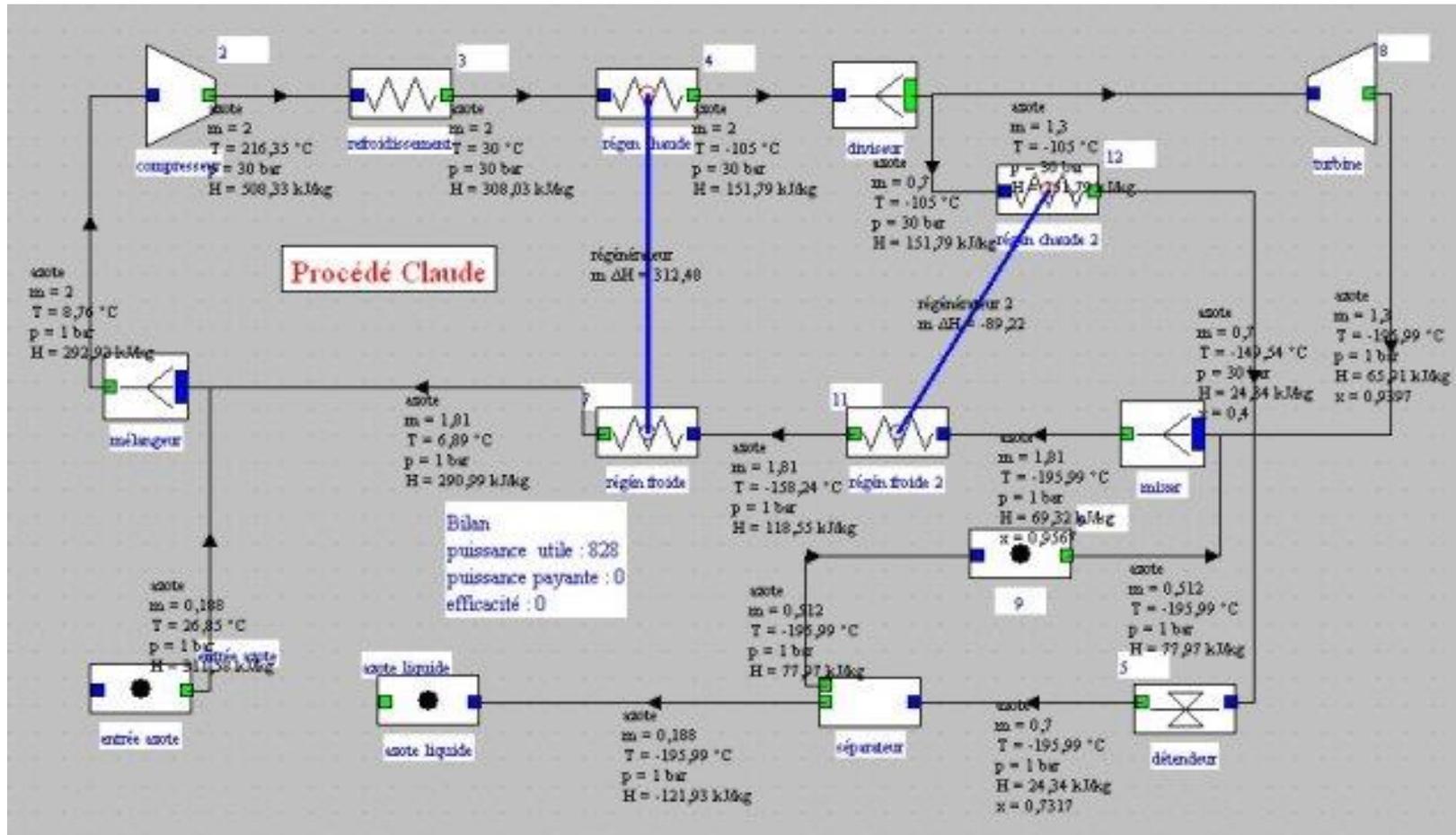
Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Le cycle de Claude se compose de deux **expansions**, la première est **isenthalpique** tandis que l'autre est **isentropique**. Le principe de travail du cycle Claude est similaire au cycle Linde, au point **3** après le premier échangeur de chaleur (une combinaison de 3 échangeurs de chaleur), une partie du gaz partiellement refroidi est prélevée de l'échangeur de chaleur "**1**" et envoyé à la turbine où se produit une détente **isentropique**, cette turbine fournit de la puissance et refroidit le gaz en même temps (point 7).

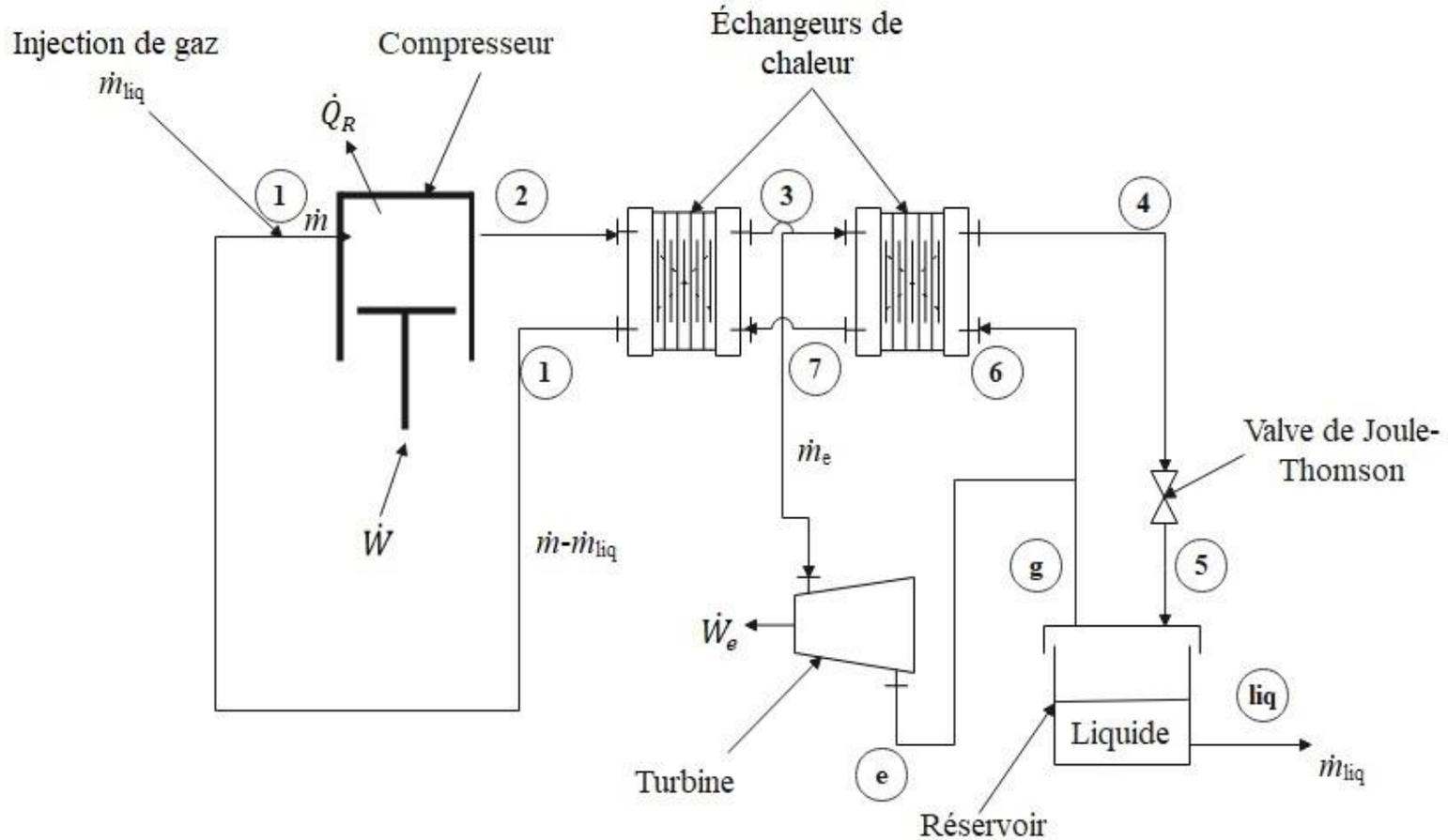
Exemples



Cycle de Kapitsa

Le cycle Kapitsa est la **modification** du cycle de Claude, en supprimant **le troisième échangeur de chaleur** (Echangeur basse température). Aussi, Kapitsa a fait plusieurs changements sur le cycle tel que la turbine, dans lequel il remplace la turbine de **mouvement alternatif** par un moteur **d'expansion rotatif**, mais en général, le principe de travail de ce cycle est **similaire** au cycle de Claude.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



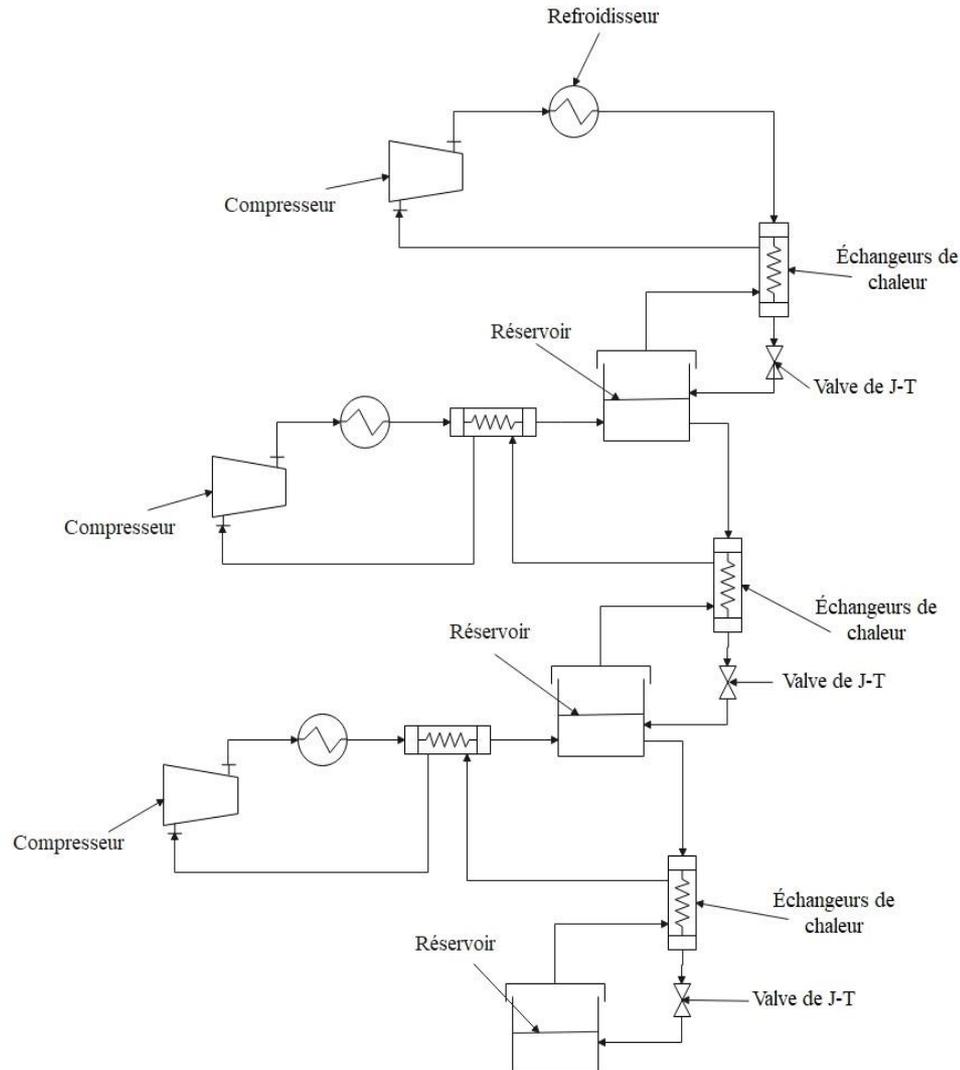
Cycle de Cascade

Le cycle en cascade est l'utilisation de **plusieurs cycles** en les mettant en cascade, dans lequel le **réservoir** du premier cycle peut être utilisé comme **condenseur** dans le deuxième cycle lié, et de même façon pour les cycles suivants, dans lesquels chaque réservoir d'un cycle précédent peut servir de condenseur pour les prochains cycles, dont le transfert de froid s'effectue d'étage en étage.

M1 : Génie du Raffinage

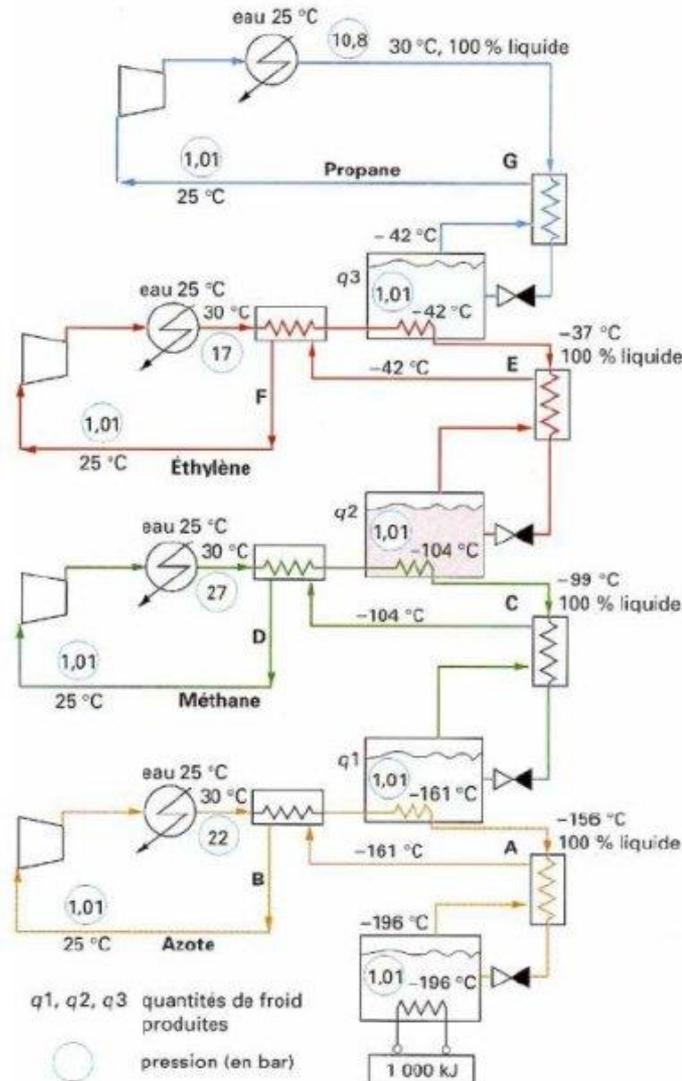
Cours: Industrie des gaz industriels

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Exemples

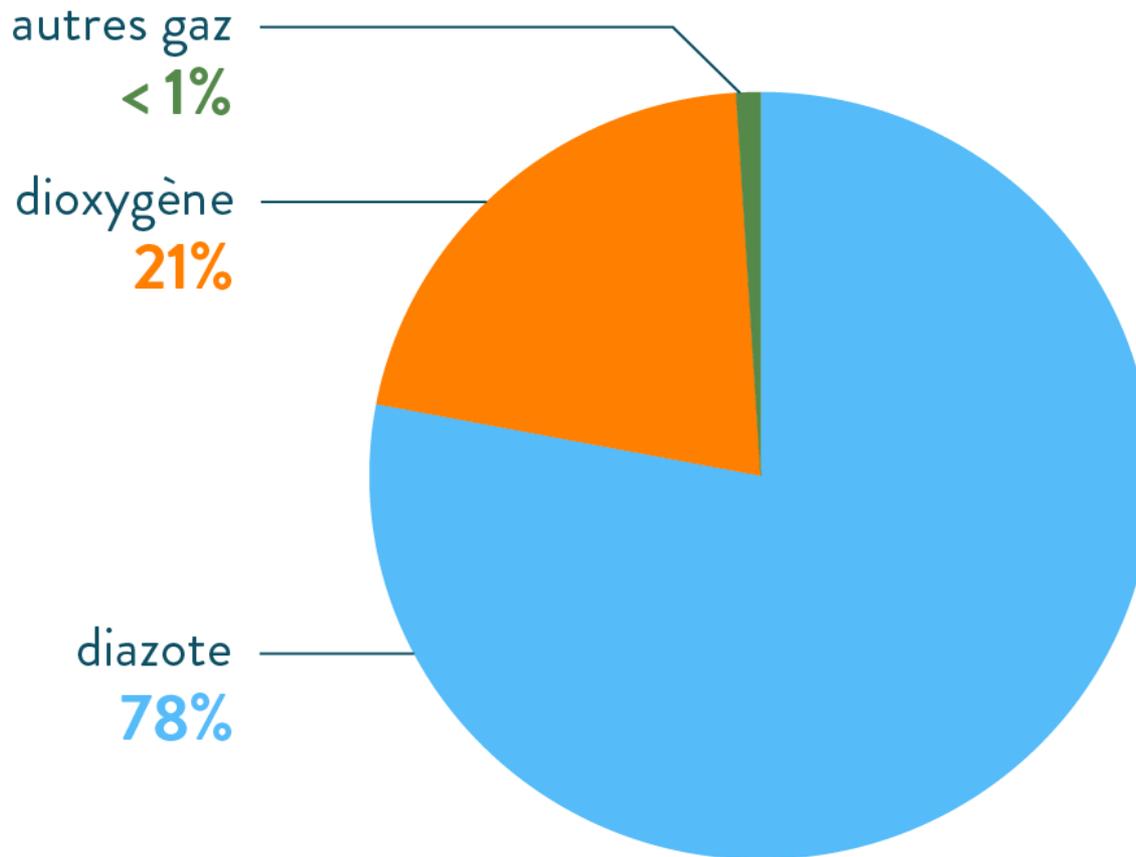


Technologie de séparation de l'air

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.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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**.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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 **N₂**, **O₂** 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**.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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.

Séparation cryogénique de l'air

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**.

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.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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 :

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

- 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.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

- Le refroidissement et la purification de l'air

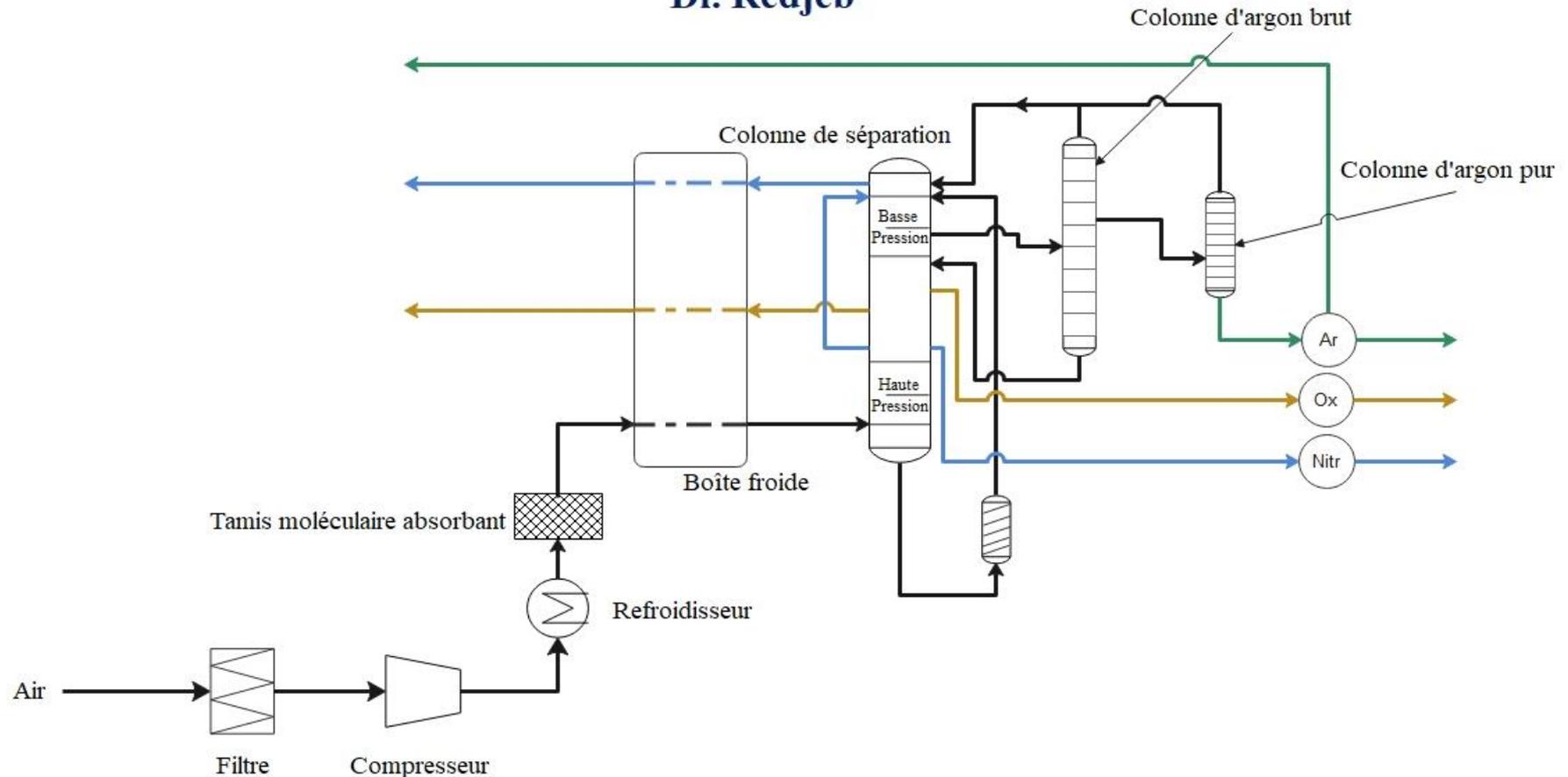
Après la compression, l'air est ensuite **refroidi** à l'aide d'eau à une température proche de la température ambiante, après cela, un processus de **purification** a lieu à l'aide d'un **tamis moléculaire absorbant** visant à éliminer le dioxyde de carbone et les hydrocarbures.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Procédé typique de séparation d'air

Université d'El Oued

Dr. Redjeb



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

- Le procédé de réfrigération/liquéfaction

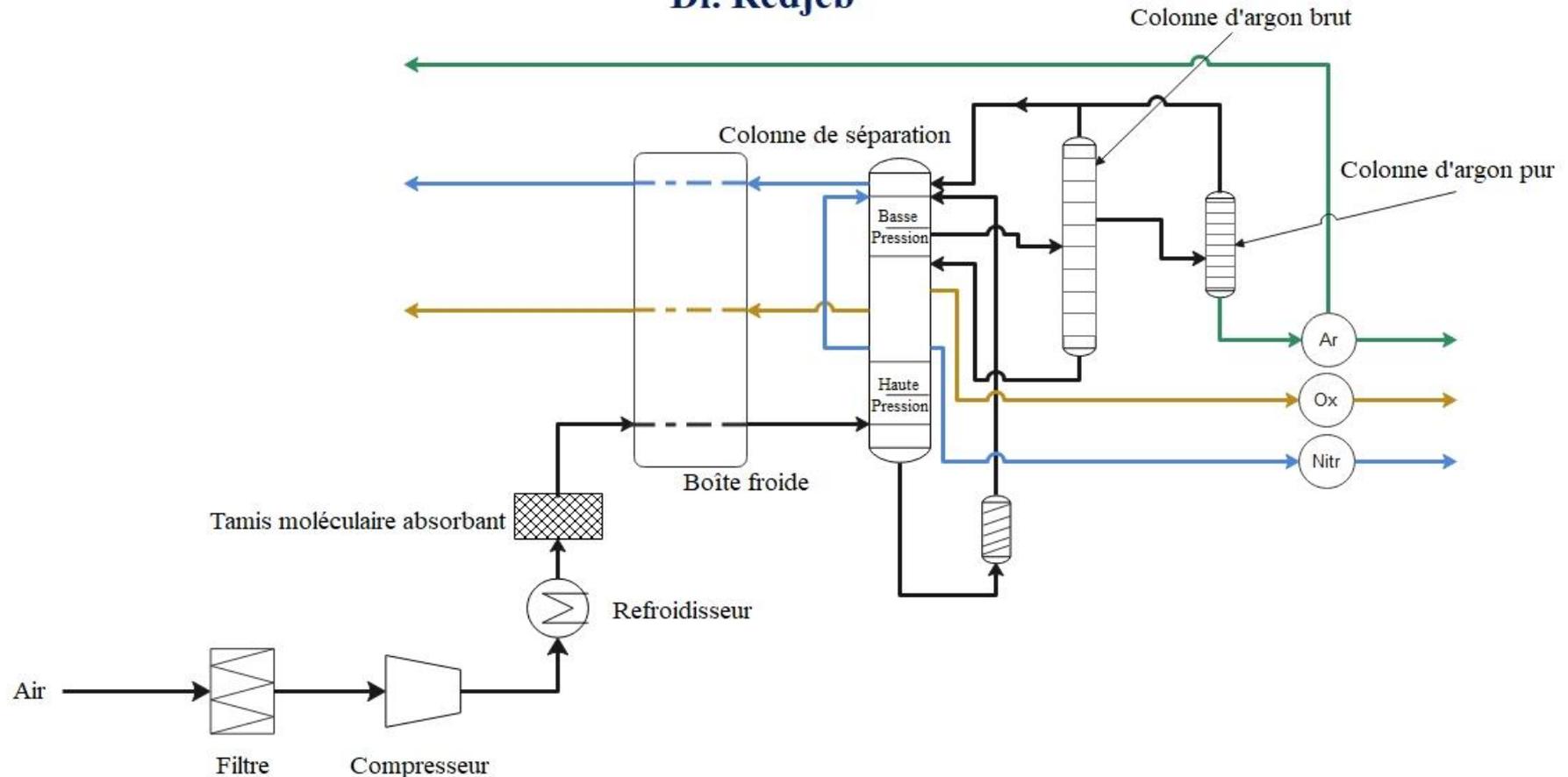
À l'aide d'échangeurs de chaleur et de processus de réfrigération, l'air comprimé est refroidi à l'aide de la « boîte froide », où il atteint une température cryogénique d'environ -180°C . Ensuite, un refroidissement final a lieu à travers un processus d'expansion de l'alimentation utilisant une machine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

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Procédé typique de séparation d'air

Université d'El Oued

Dr. Redjeb



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

- 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.

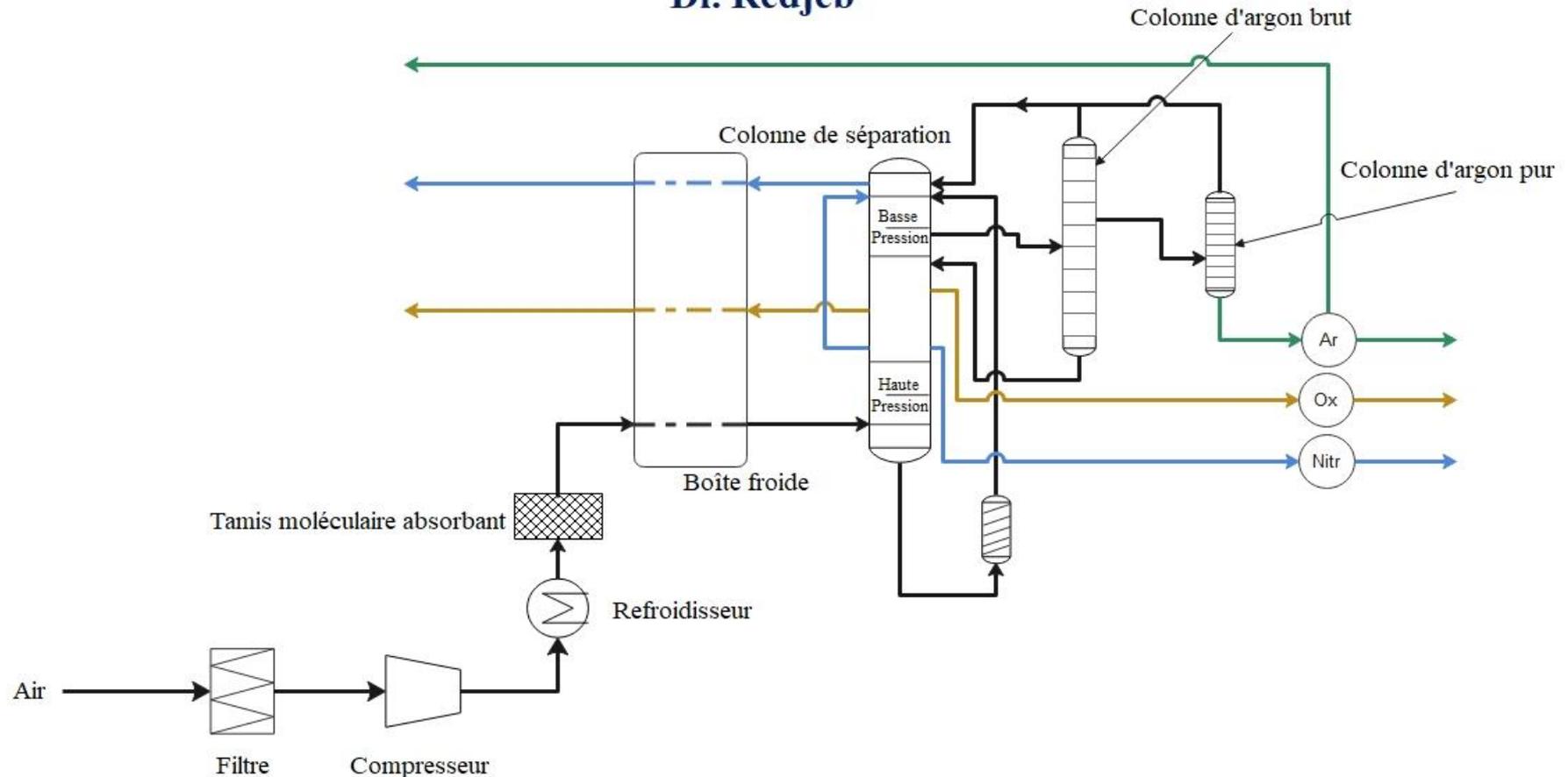
Après cela, **l'air enrichi en oxygène** de la partie haute pression s'écoule dans la partie basse pression, où il est encore purifié, dans lequel l'azote pur est finalement retiré du haut des colonnes haute et basse pression et l'oxygène pur est soutiré en cuve de la **colonne** basse pression.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Procédé typique de séparation d'air

Université d'El Oued

Dr. Redjeb



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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**.

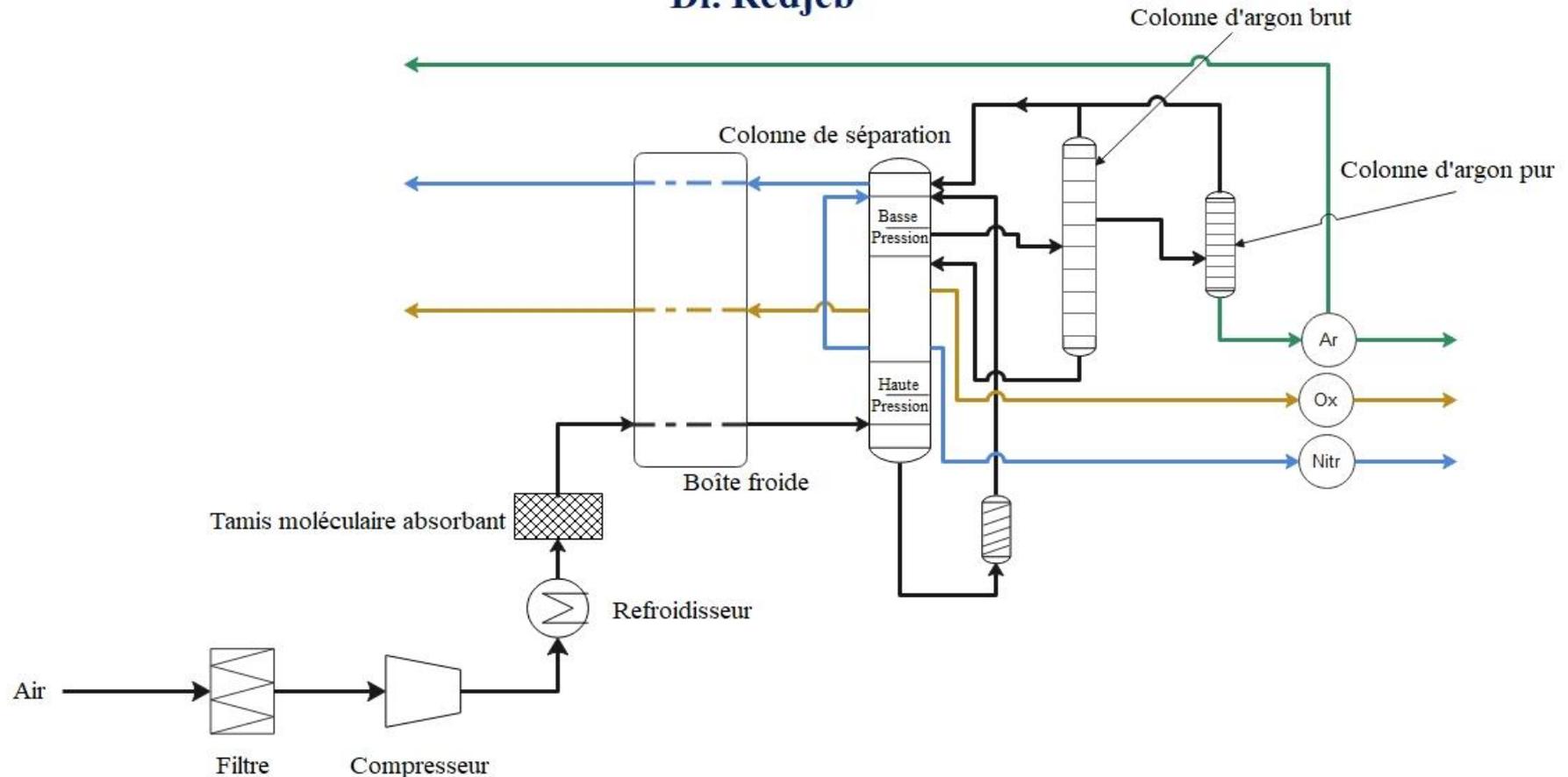
Dans les processus typiques, l'alimentation de la partie basse pression est envoyée à la **colonne d'argon brut**, dans laquelle le produit de celle-ci est passé à travers un **convertisseur catalytique** pour éliminer l'oxygène restant avant qu'il ne passe à travers la **colonne d'argon pur** où tout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

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Procédé typique de séparation d'air

Université d'El Oued

Dr. Redjeb



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.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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 %.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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.

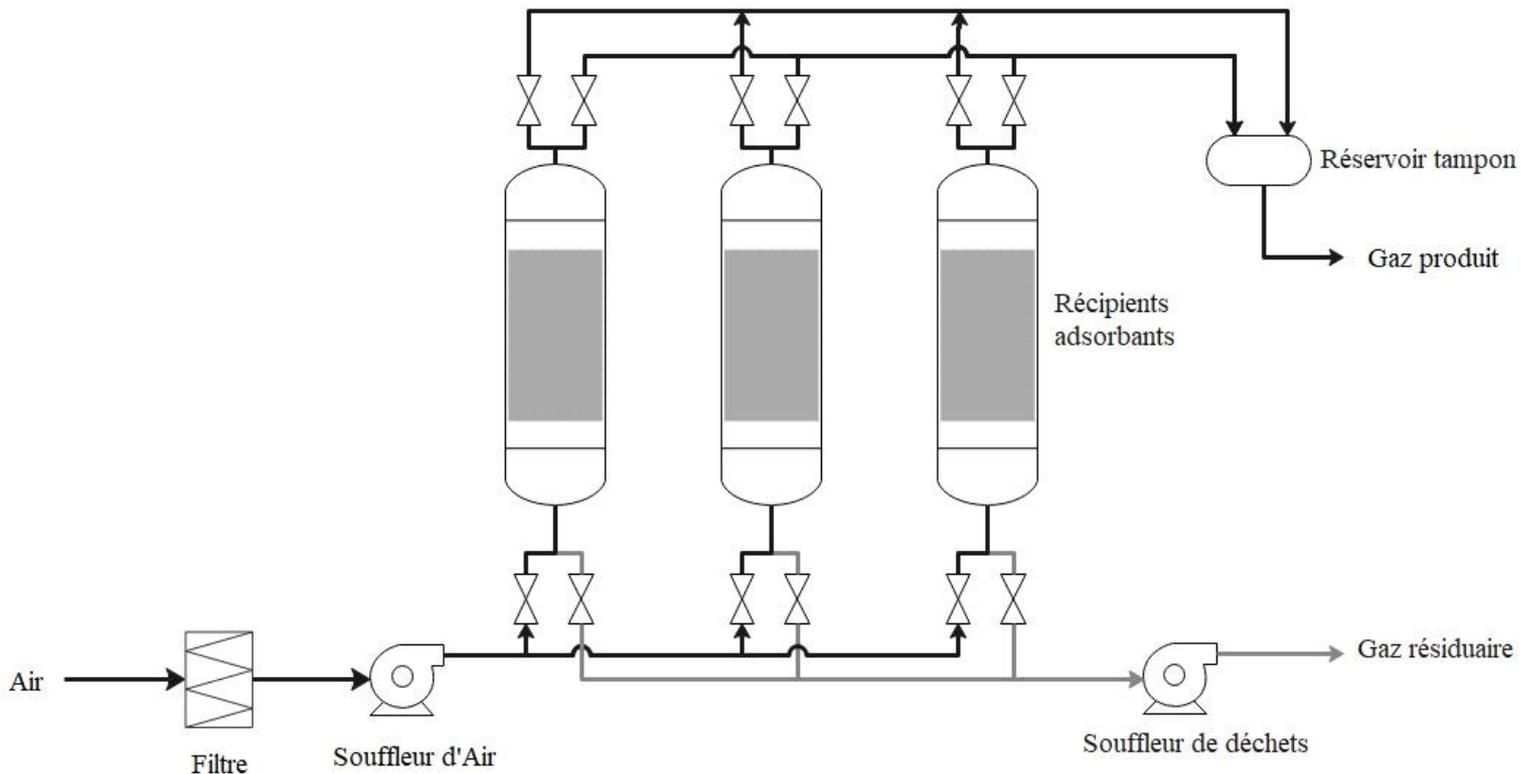
Pour le principe de **fonctionnement** de ce procédé, de manière simple, l'air sous pression circule dans une **cuve** qui contient le lit **d'adsorbant**. A travers la cuve, **l'azote/oxygène** est adsorbé et un flux d'effluent riche en **oxygène/azote** est produit jusqu'à ce que le lit d'adsorbant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

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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

Université d'El Oued

Dr. Redjeb



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

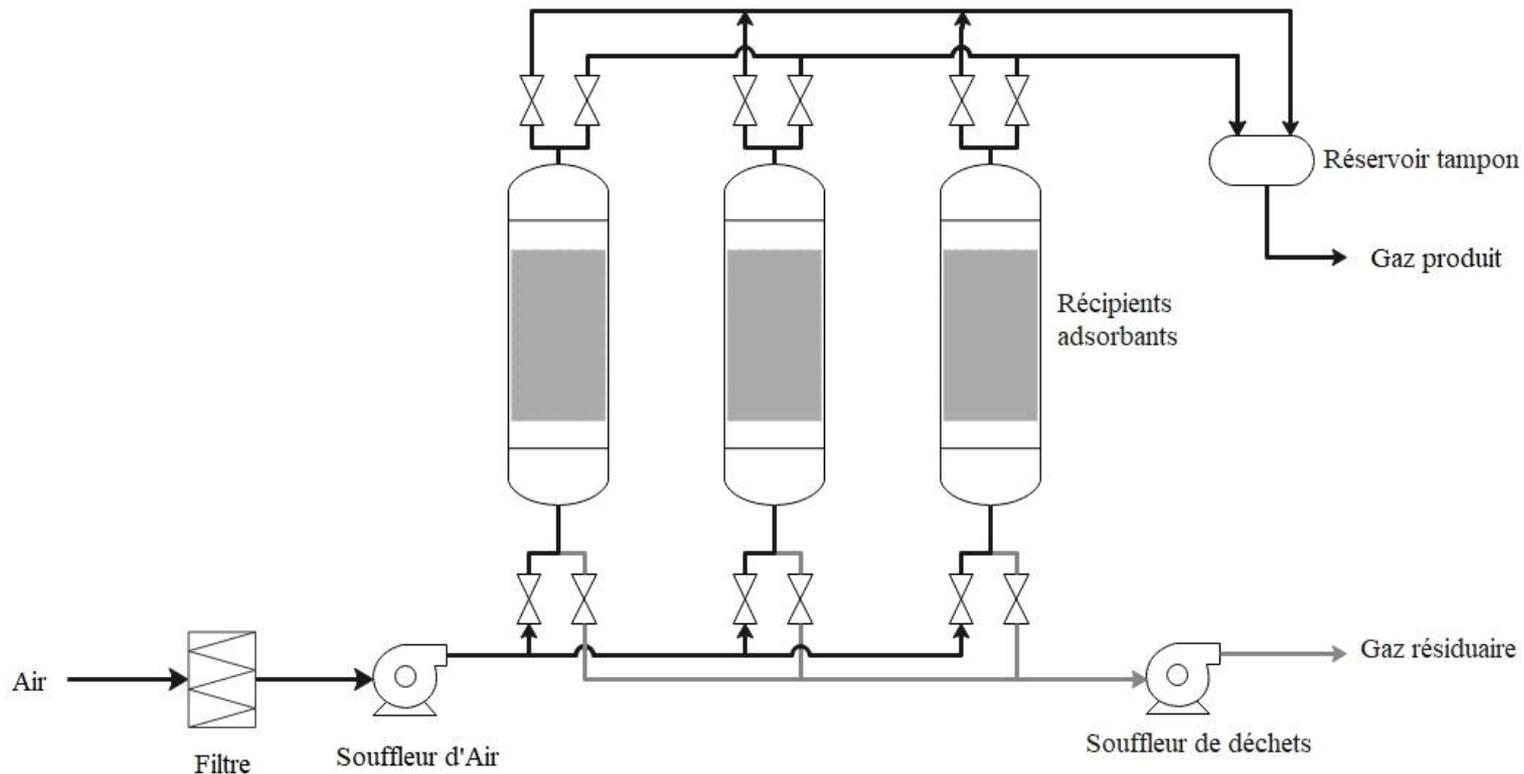
À ce stade, l'alimentation en air est commutée vers le récipient frais suivant et le procédé de **régénération** du lit **d'adsorbant** dans le premier récipient démarre. Le procédé de **régénération** peut être accompli en **chauffant** le lit **d'adsorbant** ou en **réduisant** la pression dans le 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**).

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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

Université d'El Oued

Dr. Redjeb



Technologie de séparation membranaire de l'air

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.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

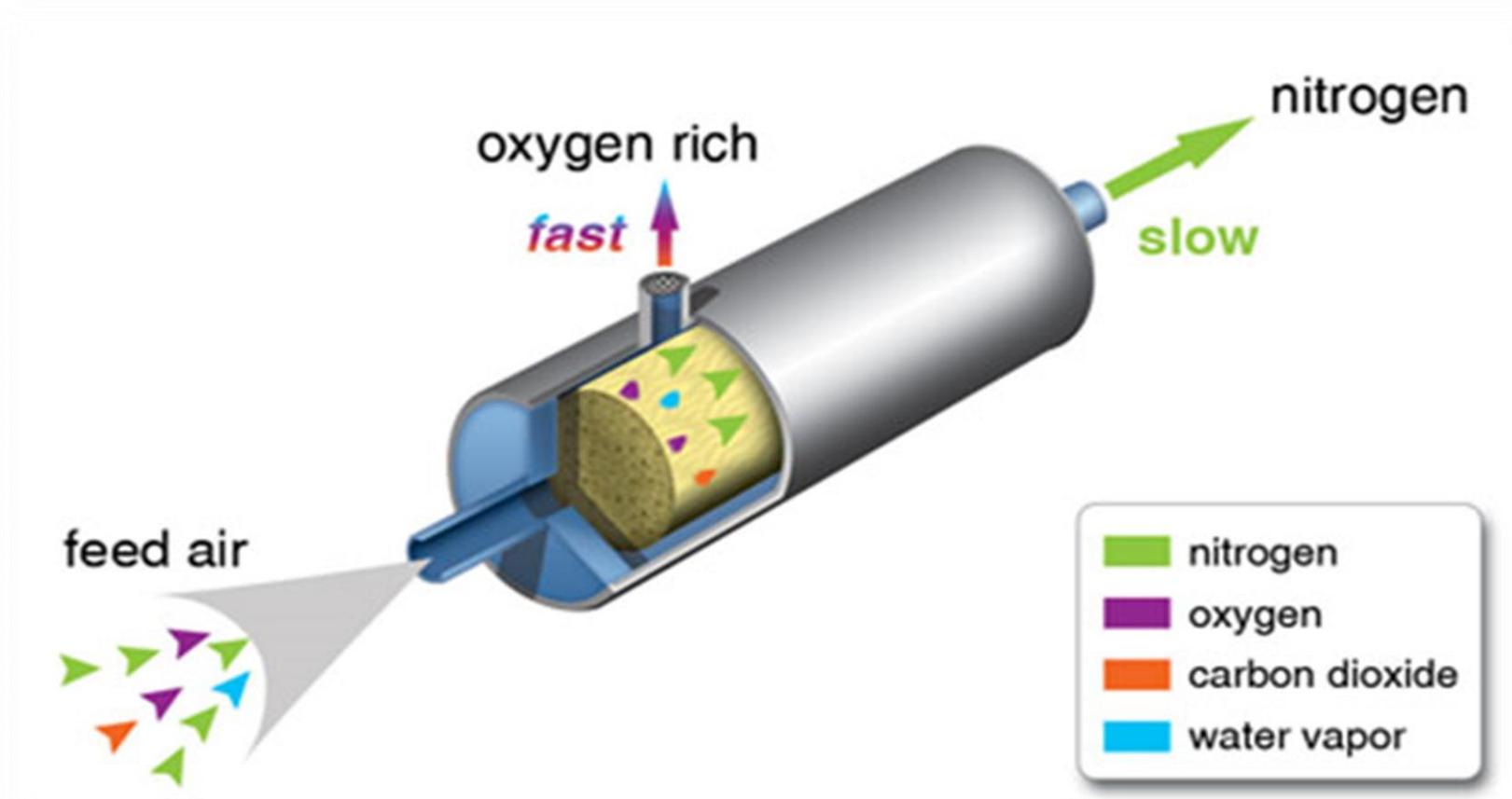
Par conséquent, pour **l'Air**, on peut dire que les procédés **membranaires** utilisant des **matériaux** polymères pour la séparation de l'air sont basés sur la différence des **taux de diffusion** de **l'oxygène** et de **l'azote** à travers une membrane. Le processus de séparation de l'air utilisant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

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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**.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques





M1 : Génie du Raffinage

Cours: Industrie des gaz industriels

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

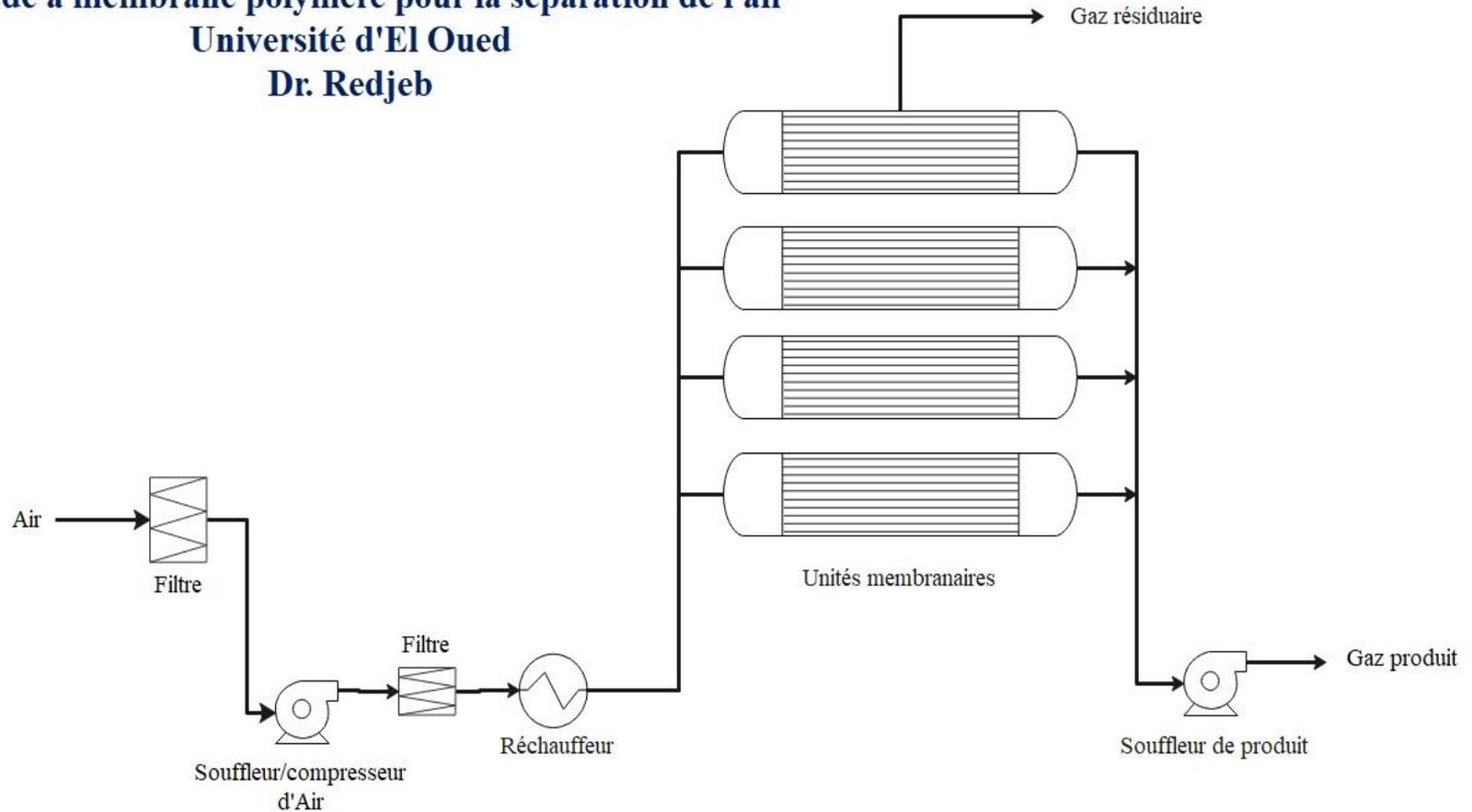
Pour le principe de fonctionnement de ce procédé, **l'air** est d'abord **filtré**, puis **comprimé** à la pression requise, **séché** puis **s'écoule** à travers un **module à membrane**, dans lequel pénètrent les composants de l'air à plus haut taux de diffusion (tels que O₂ et CO₂). Les fibres de la **membrane polymère** plus rapidement, d'où un flux riche en azote. Habituellement, la pureté du gaz **N₂** varie entre **93 % et 99,5%**, cette valeur dépend du débit à travers le module membranaire.

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Procédé à membrane polymère pour la séparation de l'air

Université d'El Oued

Dr. Redjeb



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

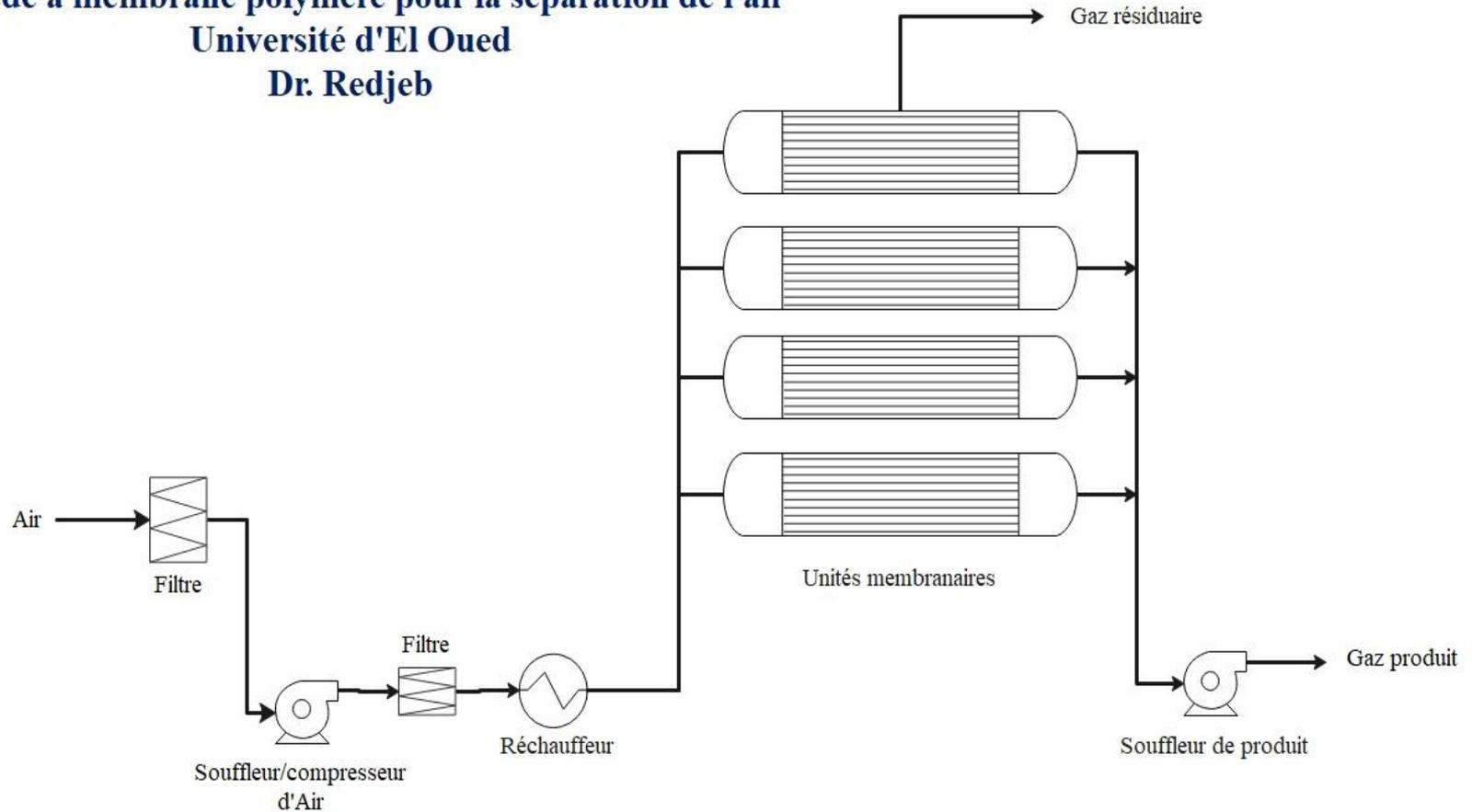
Ce procédé est couramment utilisé pour la production d'azote, mais dans le cas où le produit souhaité est l'oxygène, les systèmes à membrane sont normalement limités à la production d'air enrichi en oxygène (généralement entre 25 % et 50 % d'oxygène), dans lequel l'utilisation des membranes incorporent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

Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

Procédé à membrane polymère pour la séparation de l'air

Université d'El Oued

Dr. Redjeb



Chapitre I: Fabrication des gaz atmosphériques

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.

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.

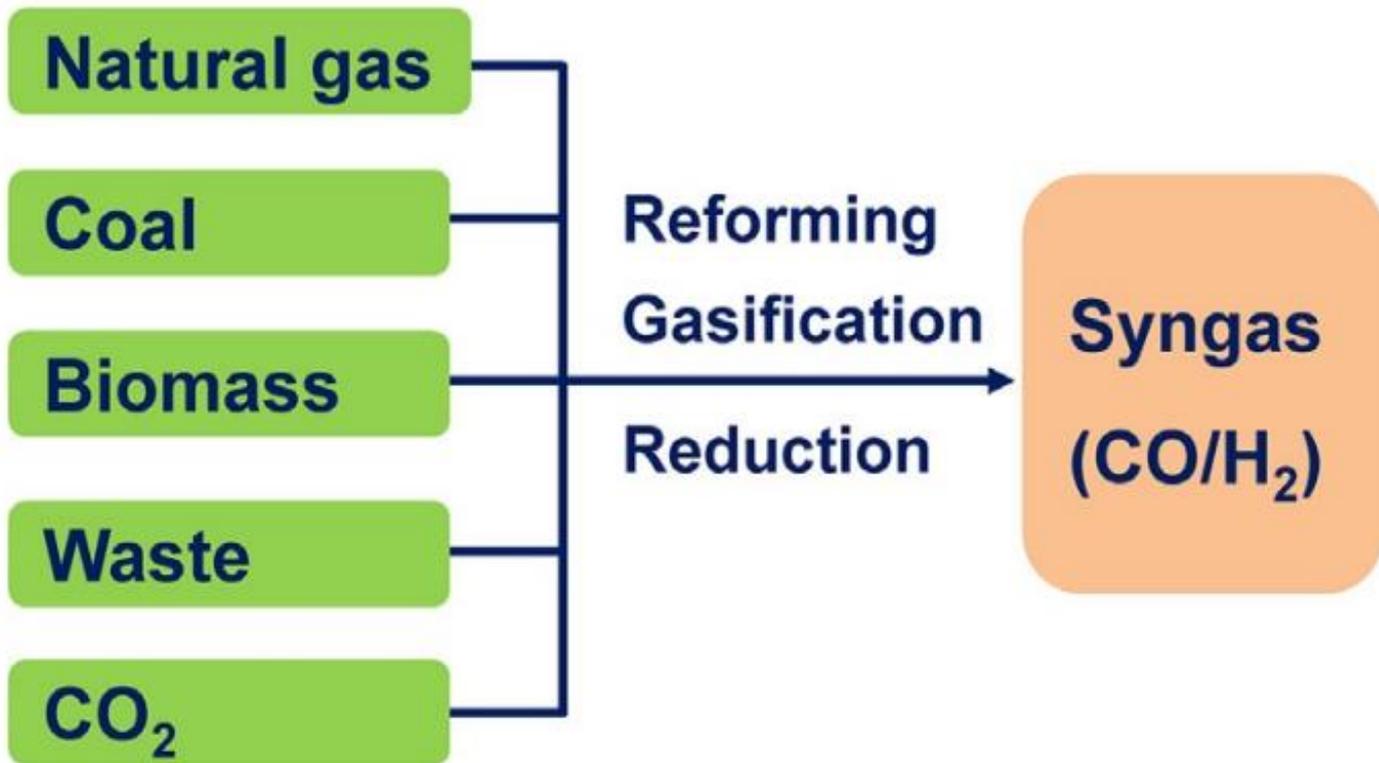
Introduction

Le gaz de synthèse (également connu sous le nom de gaz de synthèse) est un mélange de **monoxyde de carbone** (CO) et **d'hydrogène** (H₂) qui est utilisé comme gaz combustible mais qui est produit à partir d'une large gamme de matières premières carbonées et est utilisé pour produire une large gamme de produits chimiques. La production de gaz de synthèse, c'est-à-dire de mélanges de monoxyde de carbone et d'hydrogène est connue depuis plusieurs siècles et peut être réalisée par gazéification de combustibles carbonés.

Chapitre II: Production du gaz de synthèse

S'appuyant sur la littérature et les connaissances techniques, le gaz de **synthèse** peut être produit à partir de l'une des nombreuses **matières** premières **carbonées** (telles qu'un résidu de pétrole brut, du pétrole lourd, du bitume de sable bitumineux et de la biomasse).

Chapitre II: Production du gaz de synthèse



Chapitre II: Production du gaz de synthèse

Ce cours est dédié à expliquer les différentes **manières** qui peuvent probablement être adoptées afin de produire les gaz de **synthèse** en utilisant diverses ressources.

Production de gaz de synthèse

1- À partir de gaz naturel

Il y a une étape importante qui doit avoir lieu avant de transformer le gaz naturel en gaz de **synthèse**, représentée par l'élimination des impuretés. Les plus importants sont les composés **soufrés** (tels que H₂S), principalement en raison des effets toxiques qu'ils peuvent avoir sur les catalyseurs.

Pour la production de gaz de **synthèse** (H₂, CO et CO₂), de nombreux procédés peuvent être utilisés, les points suivants présentent un bref détail sur les technologies couramment utilisées.

Reformage à la vapeur

Le processus de reformage à la vapeur est la méthode traditionnellement dominante, dans ce processus, le gaz méthane et la vapeur sont mélangés à haute température et pression, puis, à l'aide de catalyseurs, forment du **monoxyde de carbone** et de **l'hydrogène**. Cette réaction nécessitait un niveau de température relativement élevé pouvant atteindre 850 °C.

Chapitre II: Production du gaz de synthèse



La réaction de production de **gaz de synthèse** est fortement endothermique et nécessite donc beaucoup d'énergie thermique. L'énergie thermique nécessaire est couverte par la récupération de la chaleur associée à la production de **synthèse** mais peut également être fournie par la combustion d'une partie du gaz naturel.

Oxydation partielle

Une autre voie de base utilisable pour la production de **gaz de synthèse** est le procédé d'oxydation partielle, l'équation de cette réaction peut être donnée comme suit :



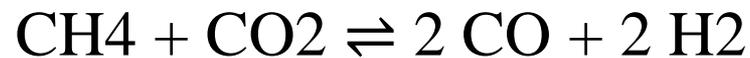
Contrairement à la réaction précédente, cette réaction est légèrement exothermique.

Chapitre II: Production du gaz de synthèse

Il est nécessaire de mentionner que la plupart des usines modernes qui utilisent l'oxydation partielle utilisent de **l'oxygène** pur au lieu de l'air afin d'éviter la nécessité d'un processus de séparation supplémentaire pour l'azote du **gaz de synthèse**, ce qui entraîne des frais supplémentaires liés à la séparation et la purification de l'oxygène de l'air.

Reformage à sec

Une autre méthode permet l'obtention du **gaz de synthèse** représenté dans le reformage à sec, ce procédé consiste à faire réagir du méthane et du **dioxyde de carbone** en l'absence de vapeur d'eau pour produire le **gaz de synthèse**, la réaction associée à ce procédé est donnée comme suit :



Cette réaction est plus endothermique que celle associée au reformage à la vapeur.

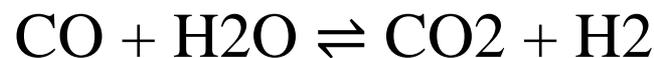
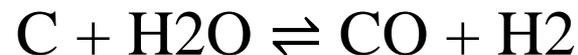
Chapitre II: Production du gaz de synthèse

Cependant, il existe une méthode supplémentaire présentée dans la combinaison du **reformage à la vapeur** et de **l'oxydation partielle**, comme un moyen d'améliorer le processus global et de mieux contrôler la composition du gaz de synthèse produit.

Production de gaz de synthèse

2- À partir de charbon

Le procédé consiste en la conversion du charbon en **gaz de synthèse** est appelé **gazéification**, et c'est une combinaison d'oxydation partielle et de traitement à la vapeur, les réactions associées à ce procédé se présentent comme suit :



Chapitre II: Production du gaz de synthèse

Selon la composition du charbon utilisé, le traitement ainsi que les conditions de conception peuvent varier. De plus, en raison du manque **d'hydrogène** dans ce procédé, une réaction de conversion gaz-eau a lieu (troisième réaction) comme moyen d'améliorer le rapport **H/CO**.

De plus, il est nécessaire de mentionner que, contrairement au gaz naturel, le **gaz de synthèse** produit à partir du charbon nécessite généralement une **purification** supplémentaire, comme moyen de protéger les catalyseurs sensibles contre l'empoisonnement.

3- Biomasse

ce processus est presque similaire au processus de gaz de synthèse à partir du charbon. Dans ce processus, la biomasse doit d'abord être séchée et pulvérisée à une teneur en humidité ne dépassant pas 15 à 20 % en poids. De plus, ce processus se compose de deux étapes, la première étape se réfère à la pyrolyse, ou distillation destructive, dans laquelle la biomasse séchée est chauffée jusqu'à 400-600°C en l'absence d'oxygène pour empêcher une combustion complète, ce processus conduit à la libération de **monoxyde de carbone**, de **dioxyde de carbone**, **d'hydrogène**, de méthane ainsi que d'eau et de goudrons volatils.

Chapitre II: Production du gaz de synthèse

De plus, une réaction supplémentaire à une température comprise entre 1 300 et 1 500 °C a lieu pour la biomasse restante en présence **d'oxygène** afin de produire principalement du **monoxyde de carbone**. Après cela, le gaz de synthèse produit à partir de la pyrolyse et de la conversion du charbon de bois est purifié

Introduction

Comme mentionné précédemment dans le chapitre précédent, le gaz de **synthèse** est défini comme un gaz avec **H₂** et **CO** comme principaux composants du carburant. Le gaz de synthèse brut peut également contenir des quantités importantes de **CO₂** et de **H₂O**. Étant donné que le gaz de synthèse est généralement utilisé à des pressions plus élevées pour synthétiser des produits chimiques et des carburants, certains contenus doivent généralement être minimisés dans le gaz de synthèse.

Purification de l'hydrogène

Parmi les techniques de production de **l'hydrogène** au stade industriel, les deux procédés de vaporeformage et d'oxydation partielle (Voir Chapitre 2) donnent en produit de sortie un mélange de gaz contenant de **l'hydrogène** mais aussi du **monoxyde de carbone** et du **dioxyde de carbone**. Afin d'obtenir de l'hydrogène pur, il est nécessaire de rajouter une étape de purification.

Purification après vaporeformage

Après l'étape de vaporeformage et de **Water Gas Shift**, il reste de l'ordre de 1% de monoxyde de carbone et entre 16 et 20% de dioxyde de carbone. Les étapes de purifications suivantes consistent en :

La diminution de la teneur en dioxyde de carbone : le dioxyde de carbone peut être éliminé par des procédés chimiques utilisant les éthanolamines ou les carbonates :

Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

- La **monoéthanolamine** (MEA) a été longtemps utilisée avant d'être remplacée par la **méthyl-diéthanolamine** (MDEA). Le principe de la purification réside dans l'adsorption du dioxyde de carbone dans la MDEA (liquide dans les conditions de température et de pression du procédé). Cette technique permet d'atteindre des **puretés** en dioxyde de carbone de l'ordre de 0,1 vol% (1000 ppm).

Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

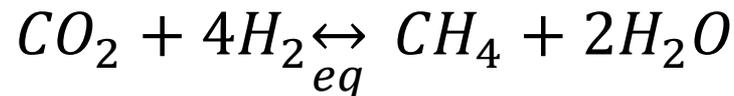
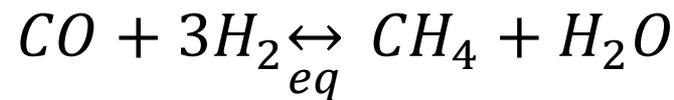
- Dans le cas des **carbonates**, le dioxyde de carbone est dissout à chaud dans une solution de **carbonate de potassium**. Les optimisations successives du procédé permettent actuellement d'atteindre des taux de dioxyde de carbone résiduaire de 0,005vol% (50 ppm).

Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

La diminution des teneurs résiduelles en **monoxyde et dioxyde de carbone** : pour obtenir des puretés d'hydrogène encore plus élevées, le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone résiduelles peuvent être éliminés par une étape de méthanation ou par adsorption sélective des impuretés sur des lits de tamis moléculaire (PSA, Pressure Swing Adsorption).

Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

- La purification par **méthanation** consiste à faire réagir le monoxyde ou le dioxyde de carbone avec l'hydrogène selon les équations Eq.1 et Eq.2 :



Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

Cette réaction a lieu en présence d'un catalyseur nickel entre 300 et 340°C. Les teneurs résiduelles en **monoxyde de carbone** et en **dioxyde de carbone** sont inférieures à 0,001 vol% (10 ppm).

Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

- La purification par **adsorption sélective** est basée sur le principe de l'adsorption des impuretés sur des lits de tamis moléculaire.

Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

L'opération a lieu à température ambiante et sous une pression de **20 à 25 bars**. La pureté finale de l'hydrogène est de l'ordre de **99,9999 vol%**. La régénération du tamis moléculaire est obtenue en diminuant la pression au-dessus du lit (d'où la **désignation de PSA** pour **Pressure Swing Adsorption**) ou en augmentant la température (TSA, Thermal Swing Adsorption). Il est à noter que les procédés PSA sont plus rapides que les procédés TSA.

Purification après oxydation partielle

Dans le cas de la technologie Shell, la **purification** de **l'hydrogène** se fait selon les étapes suivantes :

- Désulfuration
- Conversion du monoxyde de carbone
- Méthanation ou PSA

Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

Dans le cas de la technologie **Texaco** la **purification** de **l'hydrogène** se fait selon les étapes suivantes :

- Conversion du monoxyde de carbone
- Désulfuration
- Méthanation ou PSA

Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

Dans les deux cas, l'étape de **purification par PSA** n'est pas nécessairement précédée d'une étape de **décarbonatation** comme dans le cas du vaporeformage.

Chapitre III: Séparation du gaz de synthèse

Dans les deux cas, l'étape de **purification par PSA** n'est pas nécessairement précédée d'une étape de **décarbonatation** comme dans le cas du vaporeformage.

Comparaison des rendements des procédés

Pour les différentes techniques évoquées ci-dessus, les rendements de récupération de l'**hydrogène** et sa pureté ne sont pas les mêmes.

Le Tableau suivant donne la **pureté des gaz** récupérés en sortie de procédé ainsi que le rendement global (à partir du gaz de synthèse) :

	Vaporeformage + méthanation	Vaporeformage + PSA	Oxydation partielle (Procédé Texaco)	Oxydation partielle (Procédé Shell)
Pureté de H ₂	95 à 98%	99,9%	99,9%	99,9%
Rendement*	~ 98%	85 à 90%	85 à 88%	85 à 88%

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Introduction

Après la production des gaz industriels, les producteurs sont confrontés à un autre **défi** dans leur **stockage**, leur **expédition** et leur transport, dans lequel la sélection des méthodes appropriées dépend directement des **exigences** spécifiques des consommateurs, où de nombreuses possibilités peuvent être adoptées à cet effet. A titre d'exemple, les consommateurs peuvent recevoir les gaz industriels soit à l'état **gazeux** sous forme de gaz comprimés soit à l'état **liquide** généralement **cryogénique**.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

De plus, dans le cas où la quantité requise par le consommateur est inférieure à **10 tonnes** par jour, les gaz sont généralement **livrés** dans des **bouteilles**, des **cylindres** ou dans des camions spécialement conçus, dans lesquels différentes tailles sont disponibles à cet effet. En revanche, si la quantité requise est très **importante**, l'approvisionnement peut être effectué via des **installations** dédiées ou des systèmes de **canalisations**. Le tableau suivant donne un aperçu des possibilités actuellement pertinentes d'approvisionnement en gaz industriel.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Tableau 1. Possibilités d'approvisionnement avec certains gaz industriels

Forme	N ₂	O ₂	Ar	H ₂	CO	CO ₂	He	Ne	Kr	Xe
Gazeux	Bidons de gaz comprimé	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Bouteilles de gaz comprimé	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Faisceaux de bouteilles	×	×	×	×	×	×			
	Remorques à gaz comprimé				×	×		×		
	Système de canalisation	× ^{*(2)}	× ^{*(2)}		× ^{*(2)}		× ^{*(2)}			
Liquide	Pichets cryogéniques	×	×	×	×		×			
	Camion-citerne	×	×	×	×	×	×			
	Wagon-citerne	×	×	×			×			

*⁽¹⁾ Liquéfié sous pression

*⁽²⁾ Réseaux localement limités

Source : Livre Industrial Gases Processing

Stockage de gaz industriels

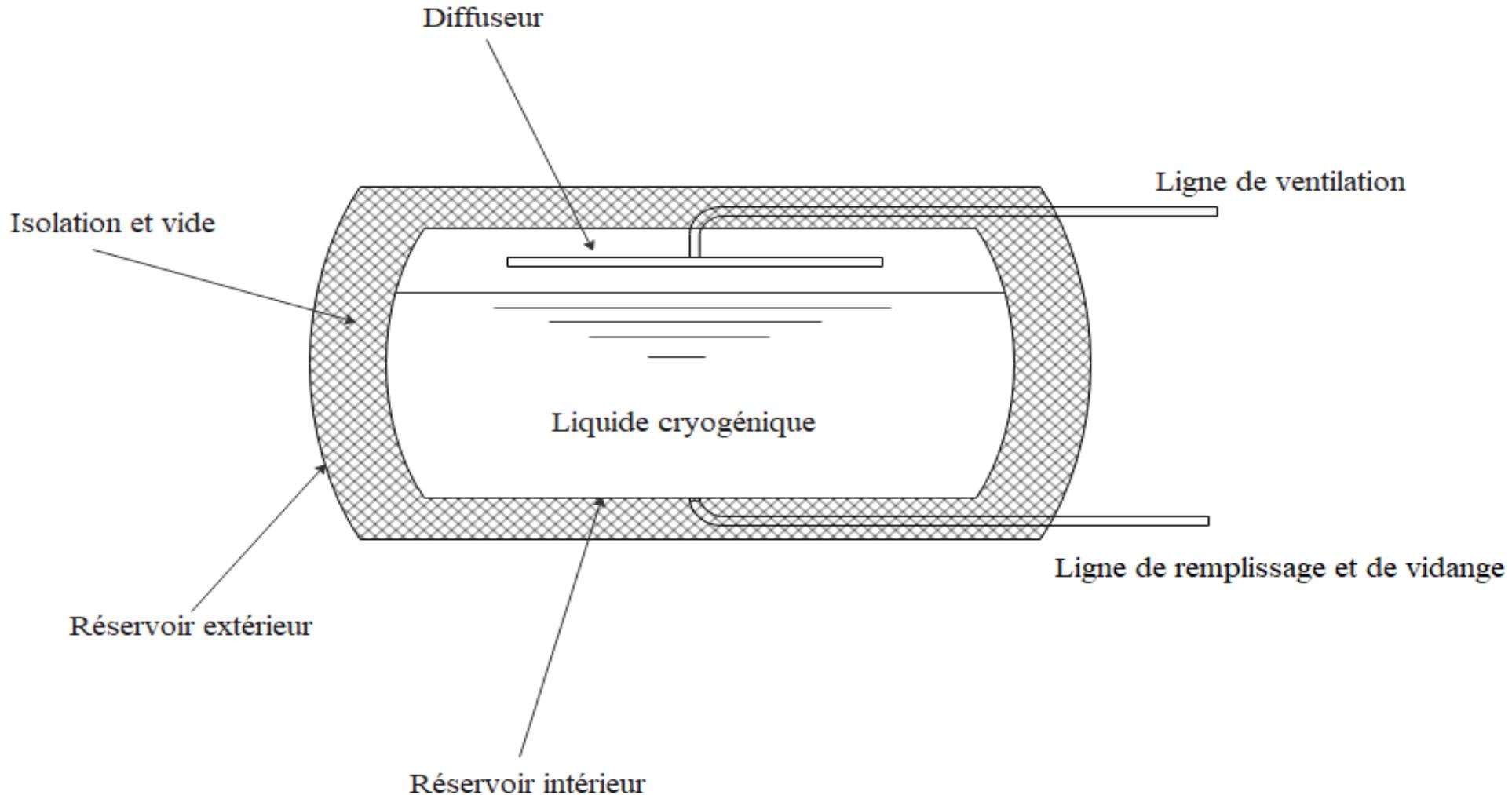
Stockage liquide

Habituellement, les gaz industriels commandés avec de **faibles** quantités sont **liquéfiés** et **stockés** dans des **réservoirs** de stockage **cryogéniques**, d'une manière qui rend possible leur **expédition** sur la route, ce procédé permet au consommateur de stocker sa quantité sous forme **liquide** au point **d'utilisation** jusqu'à ce qu'il en ait besoin, dans lequel le produit liquéfié peut être retiré du **stockage** et **vaporisé**, puis utilisé.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Depuis 1896, le **réceptif** de **stockage** à double paroi a été inventé, par James Dewar, dans lequel il se compose d'un réceptif intérieur contenant le produit **liquide**, en plus d'un **réceptif** extérieur ou enveloppe à vide contenant le vide poussé nécessaire à l'assurance de l'isolation, et la prévention de l'infiltration de vapeur d'eau ou d'air. La figure suivante montre un dessin de la coupe transversale d'un vase de Dewar, dans lequel ses principaux éléments sont présentés.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels



Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Comme le montre la figure, la ligne de **remplissage** et de **vidange** est placée au fond du réservoir, comme moyen de transfert de fluide dans et hors du **réservoir**. Le liquide peut être éliminé par un procédé de **pressurisation supplémentaire** utilisant un gaz de pressurisation ou une pompe à liquide. De plus, la ligne d'évent de vapeur est située presque dans la partie supérieure du réservoir, afin de permettre **l'évacuation** de la vapeur qui peut se former à partir des fuites de chaleur. Cette ligne peut également être utilisée pour le procédé de pressurisation expliqué à l'étape précédente afin de forcer le liquide **hors** du réservoir.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

De plus, un diffuseur est inclus dans le but de répartir le gaz de pressurisation dans la vapeur, un procédé conduit à la prévention de la **condensation indésirable** du gaz de pressurisation chaud par la surface froide du liquide.

De plus, selon la littérature, il existe différents produits **d'isolation** pouvant être utilisés, à titre d'exemple ;

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

- Pour les gaz dont la température d'ébullition est supérieure à 70 K (ex. N₂, O₂, Ar) ; généralement, une isolation sous vide de poudre de perlite est utilisée.
- Pour les gaz dont le point d'ébullition est inférieur à 70 K (par exemple H₂, He, Ne) ; la super-isolation s'est imposée. Celui-ci se compose d'un certain nombre de doubles couches de feuille d'aluminium et de feuille d'isolation dans le vide poussé.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Remarque : la conception spécifique des réservoirs cryogéniques leur permettait d'être remplis de liquide jusqu'à **90%** de leur volume, les 10% restants étant dédiés à **l'espace** vapeur pour permettre **l'évaporation** due aux fuites de chaleur.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Vaporisation

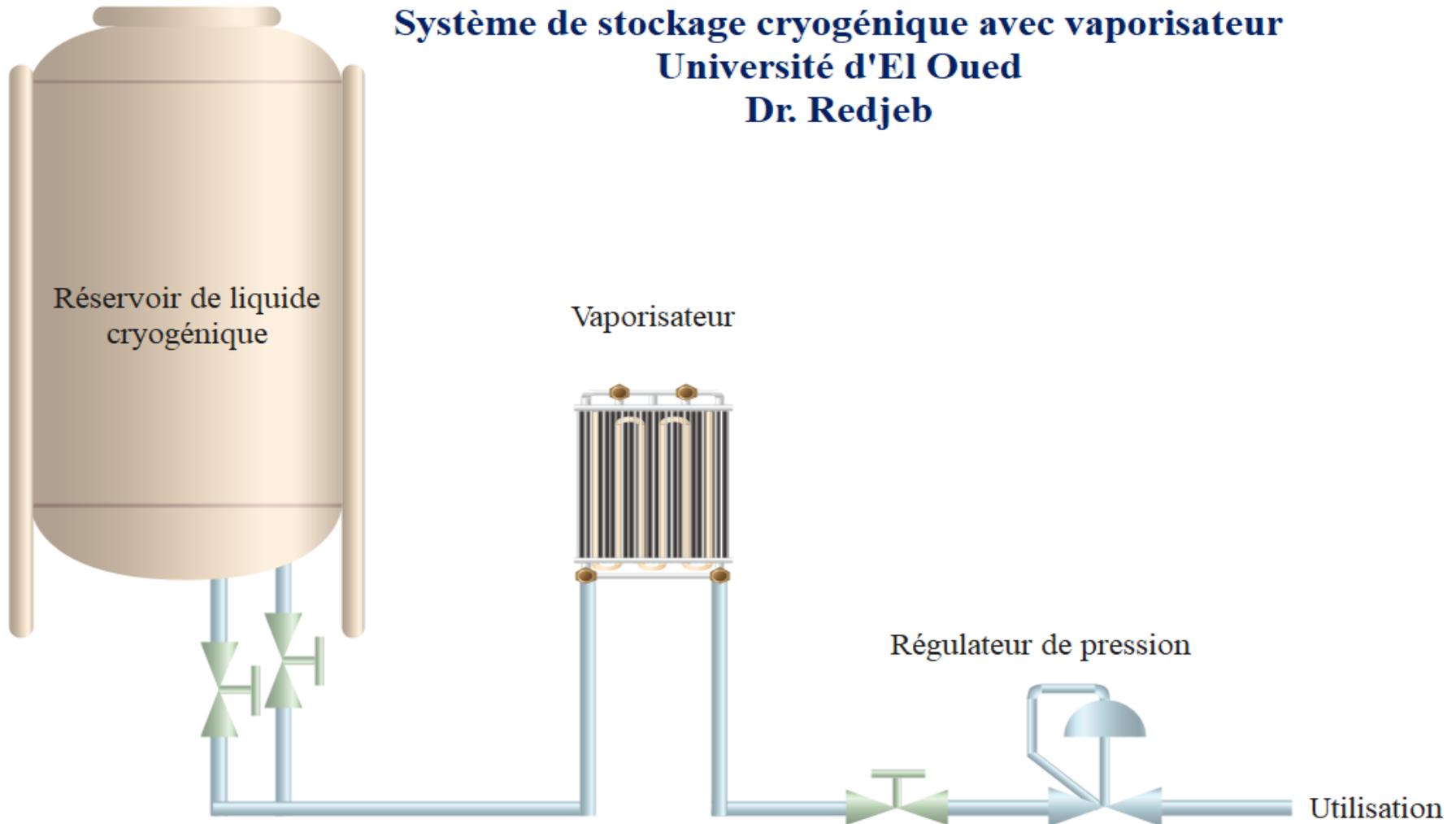
Comme mentionné précédemment, les gaz industriels sont **liquéfiés** pour être **expédiés** aux consommateurs et **stockés**, mais pour presque toutes les applications, les produits demandés doivent être à l'état **gazeux**, et pour résoudre ce problème, l'utilisation de **vaporisateurs** a lieu, comme moyen de **dissimulant** l'état des produits du **liquide** au gaz, ces **vaporisateurs** sont des échangeurs de chaleur de conception spéciale, dans lesquels ils exploitent l'air **atmosphérique** ou la vapeur ou une autre source de chaleur appropriée au liquide du côté opposé.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Système de stockage cryogénique avec vaporisateur

Université d'El Oued

Dr. Redjeb



Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Selon la figure 2, le **remplissage** du réservoir de **stockage** peut s'effectuer soit par le haut soit par le bas, tandis que la vidange peut s'effectuer par le bas à l'aide d'une patte d'étanchéité qui empêche **l'infiltration** de la vapeur dans le **réservoir**. De plus, pour le vaporisateur, il s'agit d'un échangeur de chaleur de type tube à **ailettes en serpentin**, il utilise l'air ambiant comme moyen de **vaporiser** le produit liquide froid, il comprend une vanne de **contrôle** de température comme moyen d'assurer que la **vaporisation** complète du le produit.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

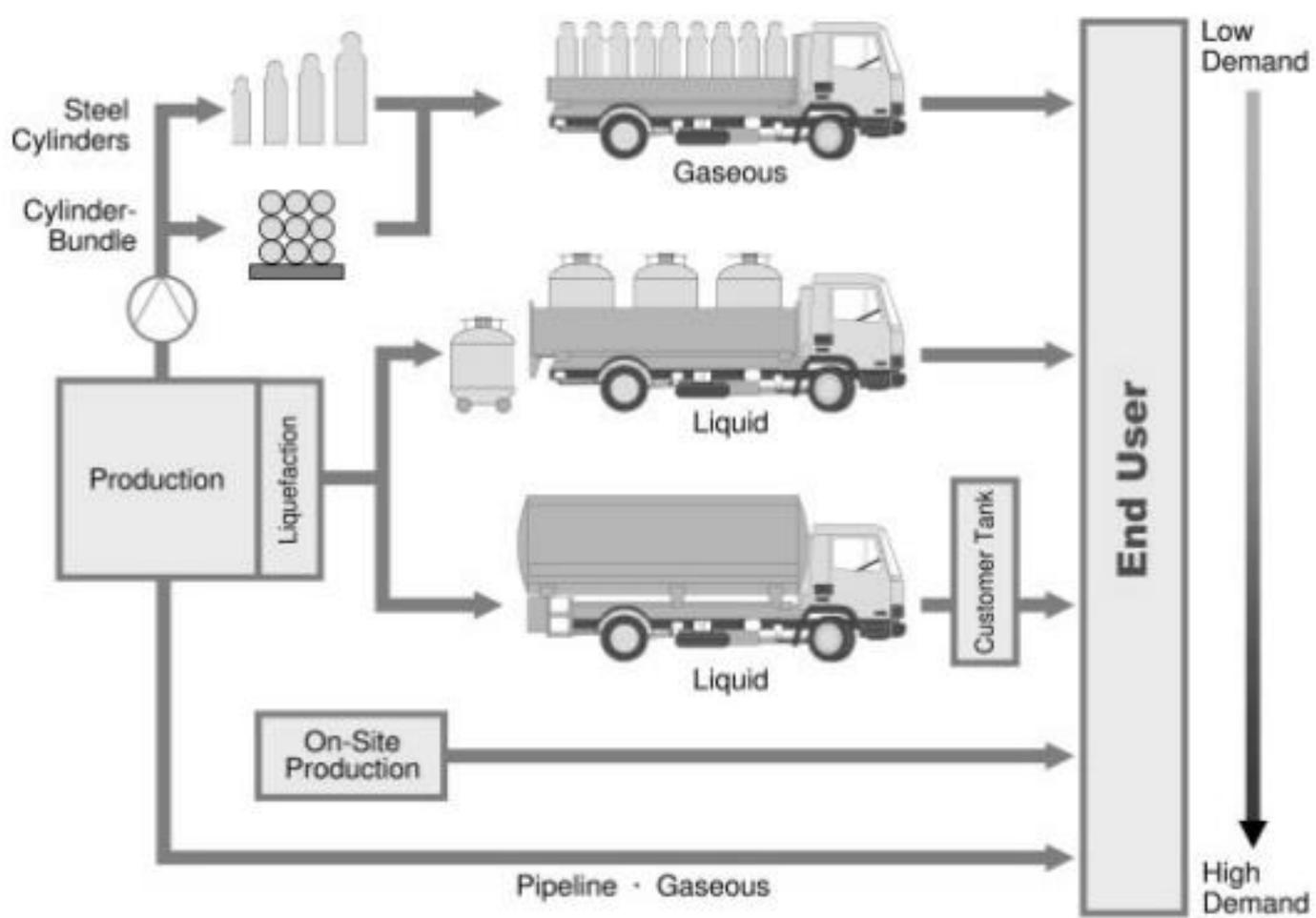
De plus, un contrôleur de **contre-pression** est utilisé pour maintenir une pression de refoulement **constante**, la figure suivante montre une vraie photo pour des réservoirs de stockage cryogéniques et des vaporisateurs atmosphériques.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels



Transport de gaz industriels

En se référant au tableau 1, il est clair qu'il existe de **nombreuses** méthodes et techniques pouvant être **utilisées** pour le transport des gaz industriels, ces méthodes peuvent être **divisées** en deux sections selon leur nature, la première est **le transport routier**, tandis que le second est **le transport par canalisation**, la figure suivante donne un aperçu général des méthodes de transport.



Product	Oxygen O ₂	Nitrogen N ₂	Argon Ar	Neon Krypton Xenon	Ne Kr Xe	Hydrogen H ₂	Helium He	Carbo- hydrides
Logistic gas			×	×	×			
Liquid	 	 	 	×	 	 	 	×

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Transport routier

Habituellement, le transport routier des gaz industriels se fait par l'utilisation de **camions** ou de **wagons**, comme par exemple, dans le cas où de petites quantités sont nécessaires, le gaz industriel peut être transporté en utilisant les **bouteilles**, les **cylindre** de gaz sous pression, tandis qu'en cas de plus grande quantité est nécessaire, il existe de nombreux types de **réservoirs** pouvant être utilisés à cette fin, tels que le **wagon-citerne monobloc**, les **wagons-citernes multi-unités** et d'autres réservoirs spécifiques (**Cargo**),

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

dans lesquels presque tous sont basés sur les procédés **cryogéniques**, où ces réservoirs sont dans le sorte de grands **réservoirs** isolés sous vide montés sur roues. La figure suivante montre plusieurs types de **réservoirs** utilisés pour le transport routier des **gaz industriels**



a. Bouteilles et cylindres



b. Wagon-citerne



Non (low) Pressure Bulk Liquid

Low-Pressure Bulk Liquid

Corrosive Cargo



Compressed Gas

Cryogenic (-130°F)

High-Pressure Tube

c. Camions citernes

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Cependant, il convient de mentionner que **l'expédition** des gaz industriels **liquéfiés** par camions et leur **stockage** dans des réservoirs **cryogéniques** jusqu'à leur utilisation sur le site du client n'est pratique que pour des **quantités** de produit relativement **faibles**, dans lesquelles une quantité maximale de **10 tonnes** par jour est recommandé d'un point de vue **économique**, là où la fourniture directe de produits **gazeux** pour de plus grandes quantités est préférable d'un point de vue **économique** pour les consommateurs.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

De plus, bien que les méthodes mentionnées soient connues pour leur **haute sécurité**, mais il faut mentionner que le transport **routier** implique **inévitablement** un certain degré de **risque**, dans lequel le risque **d'incident** est présent, un problème peut conduire à un rejet **imprévu** du produit. Ce qui, à son tour, **entraîne** des **risques** graves tels qu'un **incendie** ou une **explosion**.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Transport par canalisation

Comme mentionné précédemment, d'un point de vue **économique**, pour de grandes quantités, le **transport par canalisation** peut être considéré comme le mode **d'approvisionnement** le plus rentable et le plus fiable, dans lequel cette méthode présente de nombreux avantages, tels que la possibilité **d'augmenter** le volume requis, le **raccordement** de multiples sources de gaz, outre la **rapidité** de livraison par rapport au transport routier.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

Cependant, malgré les divers avantages qui peuvent être obtenus en utilisant le transport par **canalisation**, mais il est nécessaire de mentionner que cette méthode peut être associée à plusieurs **risques** ; par exemple :

- Risque de **perte** de confinement : dans lequel la diffusion dans l'environnement et l'atmosphère de produits **toxiques** est possible, ce qui est très dangereux pour l'environnement voire **inflammable**.

Chapitre IV: Stockage et transport des gaz industriels

- Risque d'explosion : dans lequel le risque de **rupture** de l'équipement est toujours présent.
- Risque d'incendie : dans lequel la possibilité de perte de confinement est présente, et il peut s'agir d'un fluide **inflammable**.

Ces **risques** peuvent être une cause directe de **blessures mortelles** notamment pour les opérateurs et les personnes se trouvant à proximité, ainsi que des **dommages** aux **équipements** et aux **installations utilisées** pour le procédé.

Merci !