

# Technologie du gaz

*GPP*



Dr. Redjeb

Département de génie de procédés et pétrochimie

Université El Oued

# Table des matières



<b>Objectifs</b>	3
<b>I - Application des concepts thermodynamiques dans l'industrie des gaz</b>	4
1. Rappel .....	4
2. Systèmes de liquéfaction .....	6
2.1. Les échangeur de chaleur .....	6
2.2. Machines à expansion .....	8
2.3. Exercice : Exercice 1 .....	9
2.4. Exercice : Exercice 2 .....	9
3. Cycles de liquéfaction .....	9
3.1. Cycle (Expansion libre à travers une valve) .....	10
3.2. Cycle de Linde .....	10
3.3. Cycle de Claude .....	12
3.4. Cycle de Kapitsa .....	13
3.5. Cycle Cascade .....	14
3.6. Exercice : Exercice 3 .....	15
<b>Solutions des exercices</b>	16
<b>Références</b>	17

# Objectifs

**Les objectifs de ce cours selon les niveaux cognitifs de Bloom sont :**

**Au niveau des connaissances**, l'étudiant sera en mesure d'identifier les différents types de gaz et leur applicabilité, ainsi que les méthodes utilisées pour leur traitement et leur séparation.

**En termes de compréhension**, l'étudiant sera capable d'expliquer le principe de fonctionnement des différentes technologies utilisées pour le traitement et la séparation des différents gaz industriels.

**En termes d'application**, l'étudiant sera capable de compléter et d'interpréter les courbes thermodynamiques liées au fonctionnement de ces technologies.

**En termes d'analyse**, l'étudiant sera en mesure d'examiner la faisabilité des technologies étudiées pour des applications spécifiques

**En termes de synthèse**, l'étudiant sera capable de construire différents schémas de configuration et schématiques pour ces technologies.

**En termes d'évaluation**, l'étudiant sera évalué afin de confirmer qu'il acquiert les connaissances requises du cours.

# Application des concepts thermodynamiques dans l'industrie des gaz



## 1. Rappel

### 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<sub>2</sub>, Ar) ou de composés (par exemple, HCl, CO<sub>2</sub>) 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 »

### Exemple : 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

### Complément : 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 sont 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.

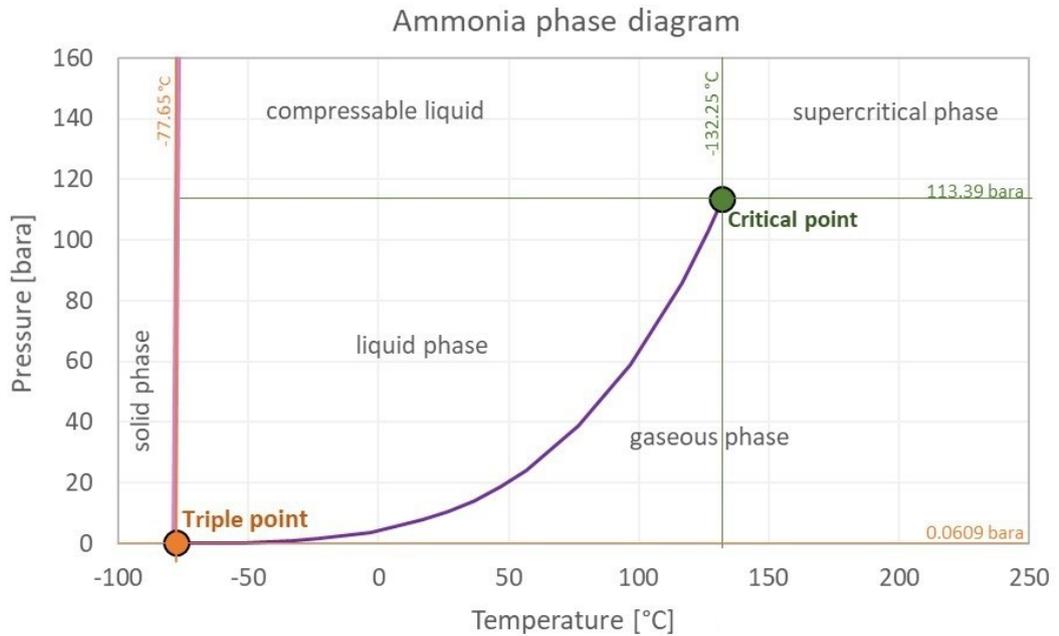


Figure 1. Diagramme de phase de l'Ammoniac

D'autre part, il existe de nombreux autres gaz dont les températures critiques sont inférieures à l'ambiante, dans lesquels la méthode de liquéfaction typique n'est pas suffisante, ce type de gaz sont appelés gaz permanents\*, dans lequel 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 ils ont appelé les systèmes de liquéfaction, dans laquelle ils sont basés sur la cryogénie « la production des basses températures ».

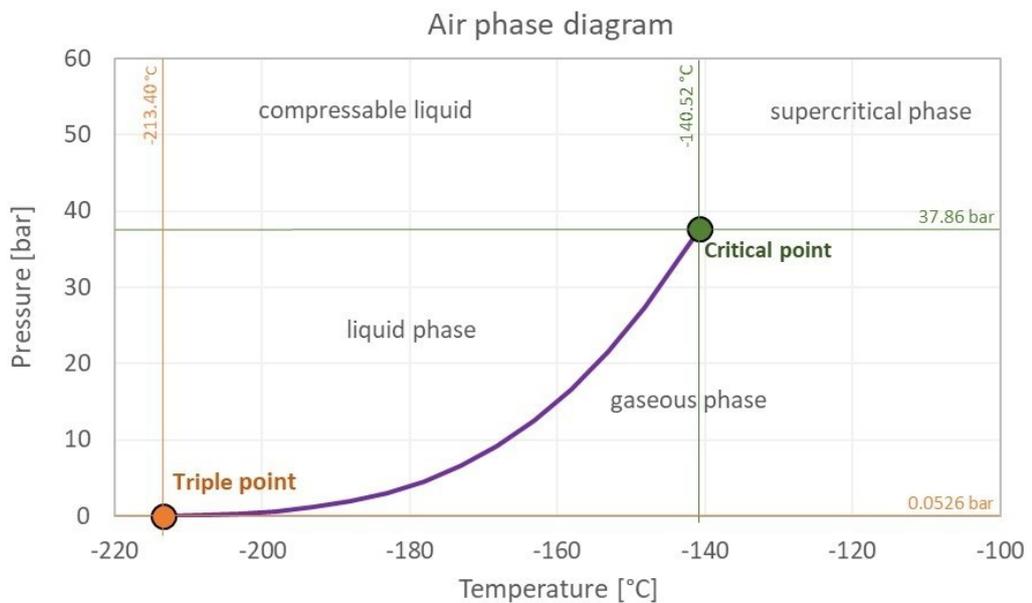


Figure 2. Diagramme de phase de l'Air

Pour plus d'informations sur la cryogénie vous consultez ce document :

[cf. Introduction to cryogenics]

## 2. 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. Or seule une méthode basique de liquéfaction qui consiste à augmenter la pression est suffisante.

Par conséquent, si le gaz est classé dans la catégorie des gaz permanents, il faut 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.

### 2.1. Les échangeur 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.

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, comme le montre la Figure 3, et leur explication est présentée dans Tableau 1.

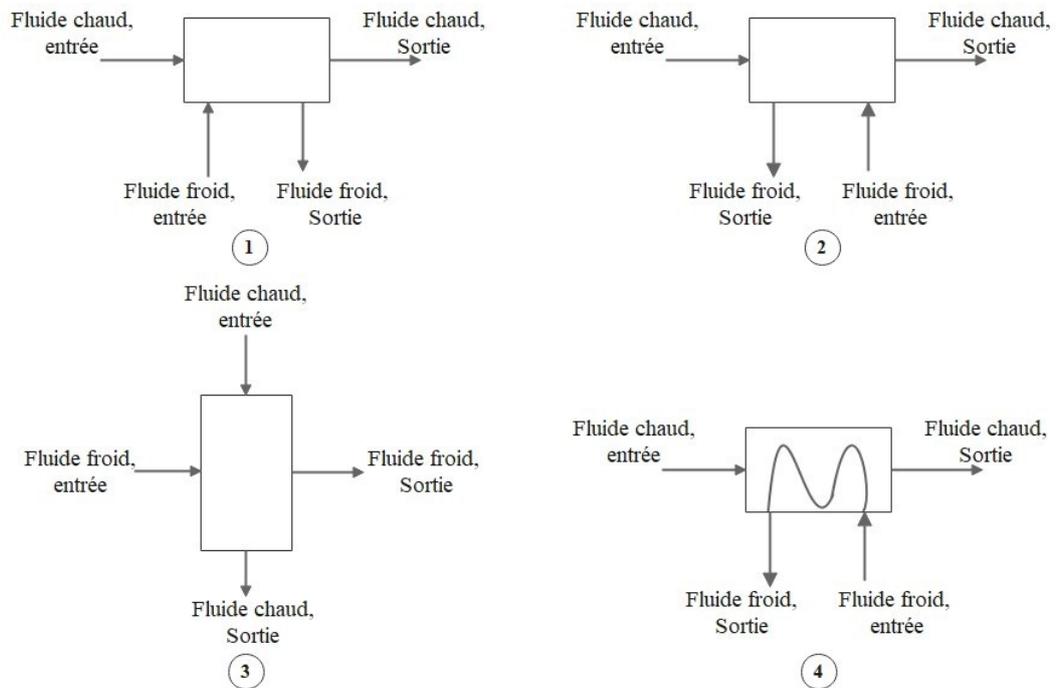


Figure 3. Types de configuration de chemin d'écoulement à travers l'échangeur de chaleur

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.

Tableau 1. Chemin d'écoulement à travers l'échangeur de chaleur

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 utilisés dans les systèmes cryogéniques de liquéfaction*

En fait, il existe deux échangeurs de chaleur couramment utilisés, le premier se réfère aux échangeurs à tube enroulé dans une coque (Figure 4), 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.

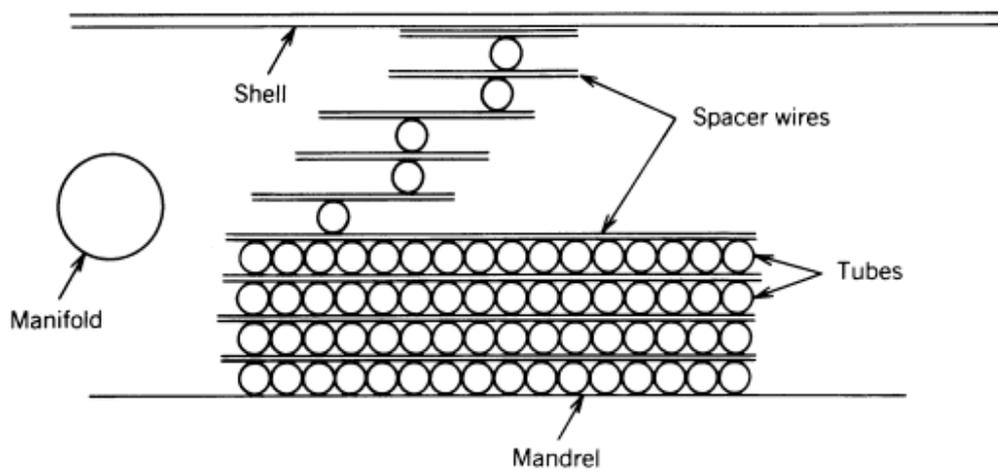


Figure 4. Section d'un échangeur à tube enroulé dans une coque

Le deuxième type d'échangeurs de chaleur couramment utilisés est l'échangeur à plaques et ailettes (Figure 5, 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 pied cube de volume d'échangeur

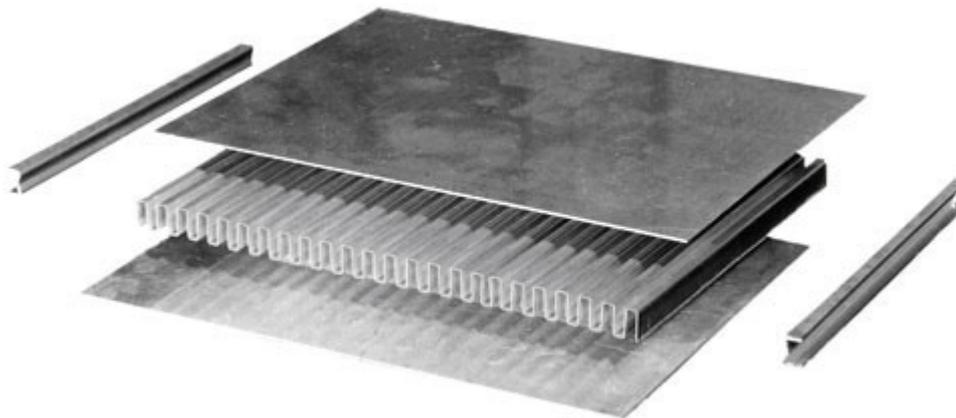


Figure 5. Échangeur à plaques et ailettes

## 2.2. 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.



Figure 6. (a). Valve de Joule Thomson, (b). Turbine cryogénique

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, Joule Thomson Valve, ainsi que les turbines, Figure 6 illustre des images réelles pour une valve de Joule Thomson et une turbine cryogénique.

Vous pouvez également consulter la vidéo suivante pour comprendre son principe de fonctionnement.

### 2.3. Exercice : Exercice 1

[solution n°1 p.16]

Les gaz permanents sont :

- liquéfiés par augmentation de pression à température ambiante
- liquéfiés à l'aide de systèmes cryogéniques
- liquéfiés en utilisant les deux méthodes

### 2.4. Exercice : Exercice 2

[solution n°2 p.16]

Il existe deux échangeurs de chaleur couramment utilisés, qui sont :

## 3. 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 listés comme suit \* :

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

### 3.1. 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 refroidisseur 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. Figure 7 montre le schéma de base de ce cycle.

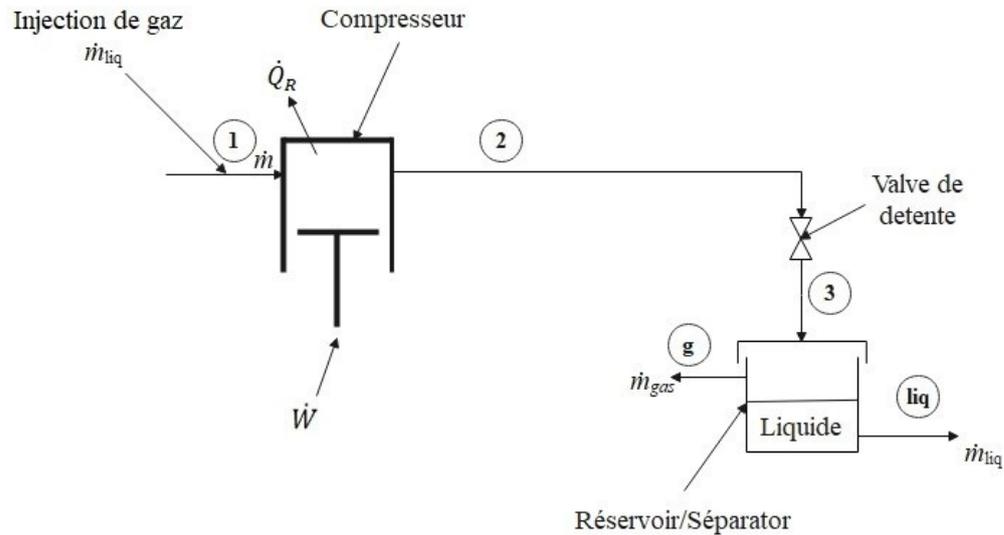


Figure 7. Cycle (Expansion libre à travers une valve)

### 3.2. Cycle de Linde

Le cycle de Linde est le plus simple de tous les 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. 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 est illustré à la figure 8 et la représentation du cycle dans le diagramme T-s à la figure 9.

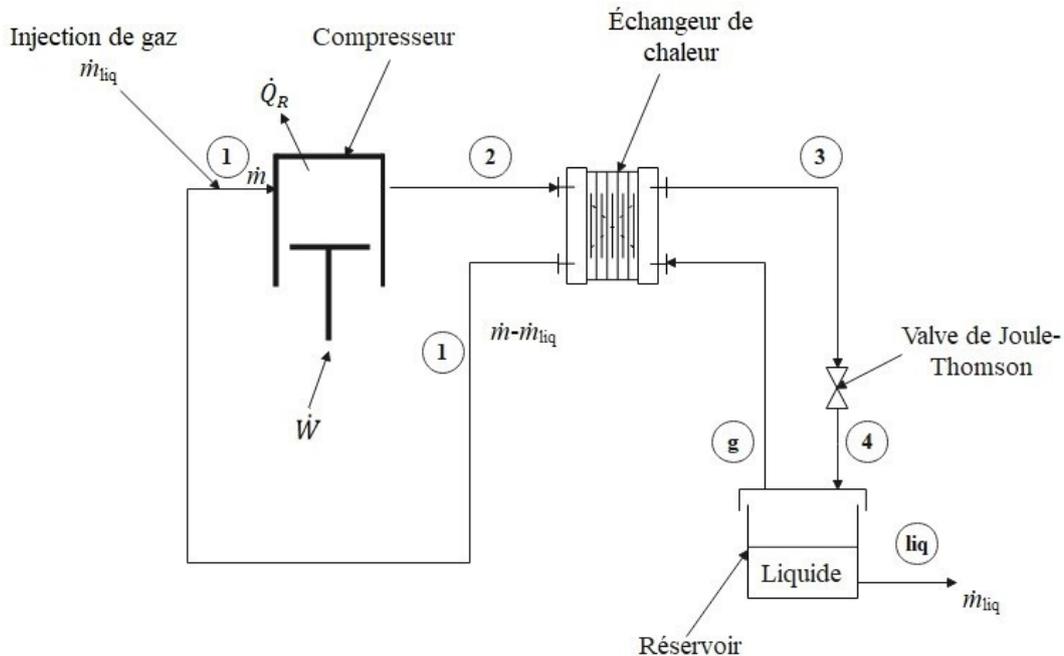


Figure 8. Cycle de Linde

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. Du point 3 au point 4, le gaz se détend à travers un détendeur jusqu'à P4. Au point 4, une partie du flux gazeux est à l'état liquide et est soutiré à la condition f (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. L'air liquide produit est très inférieur.

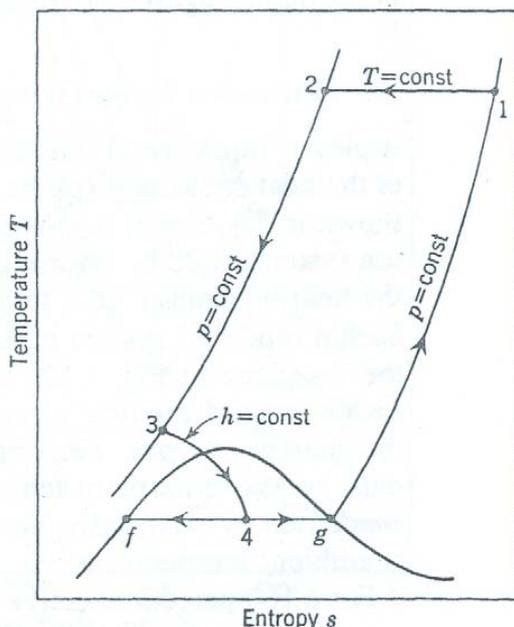


Figure 9. T-s diagramme du cycle de Linde

### 3.3. Cycle de Claude

Dans le cycle de Claude (voir Figure 10), 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.

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).

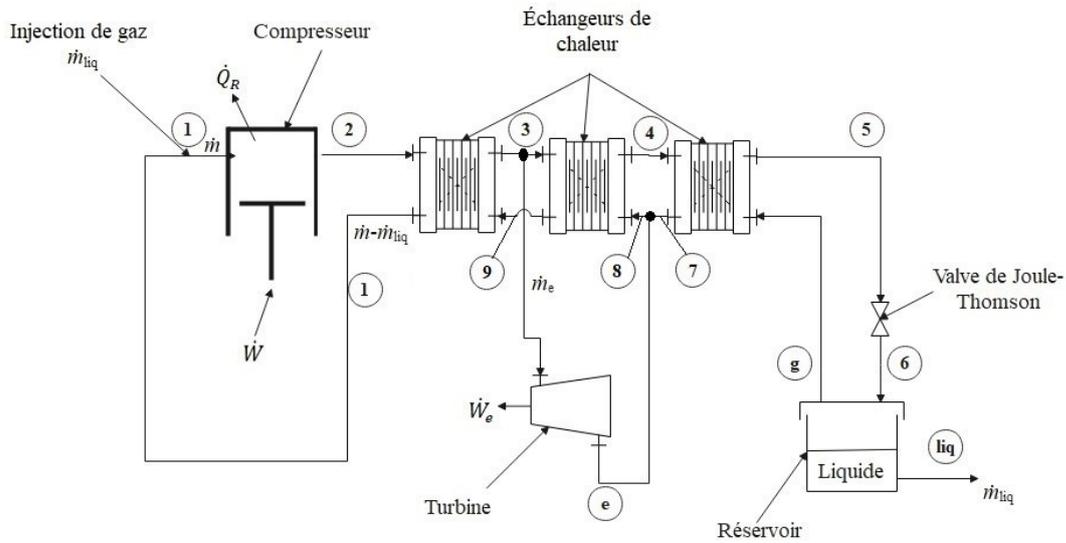


Figure 10. Cycle de Claude

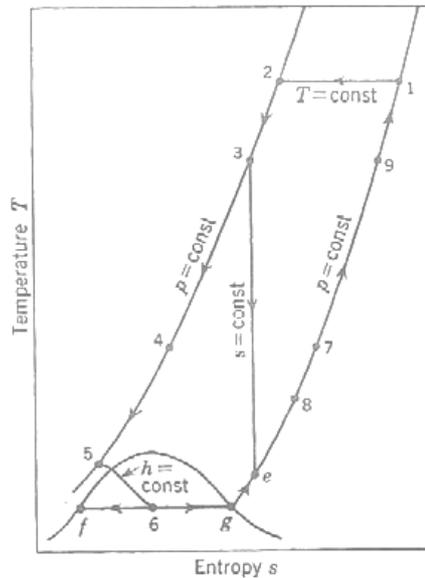


Figure 11. T-s diagramme du cycle de Claude

### 3.4. 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.

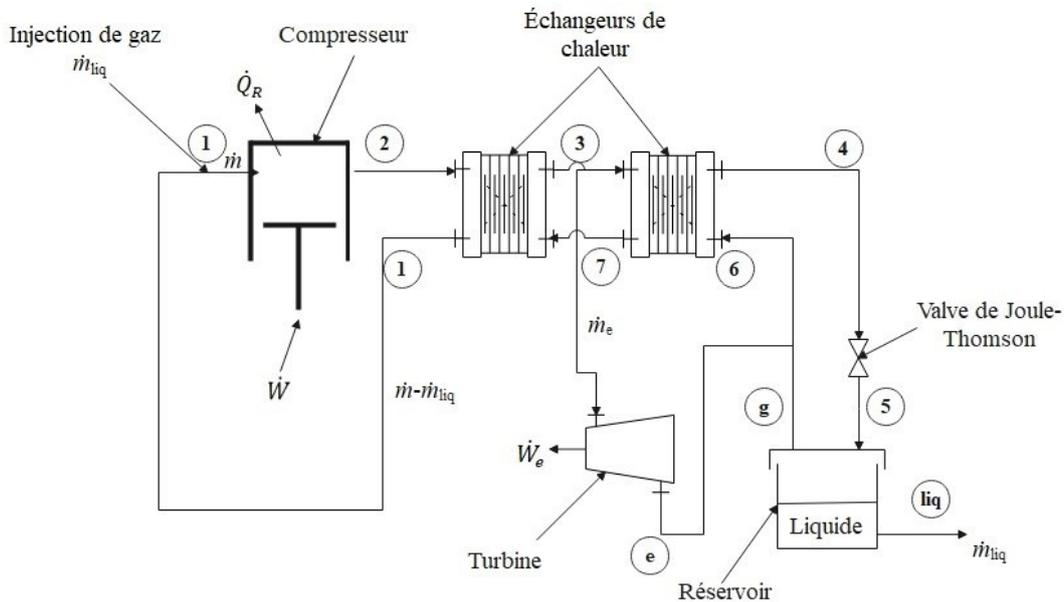


Figure 12. Cycle de Kapitsa

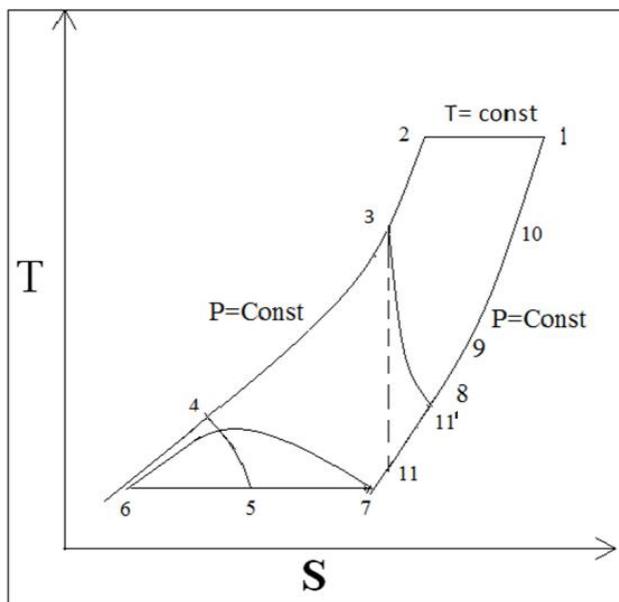


Figure 13. T-s diagramme du cycle de Kapitsa

### 3.5. Cycle Cascade

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

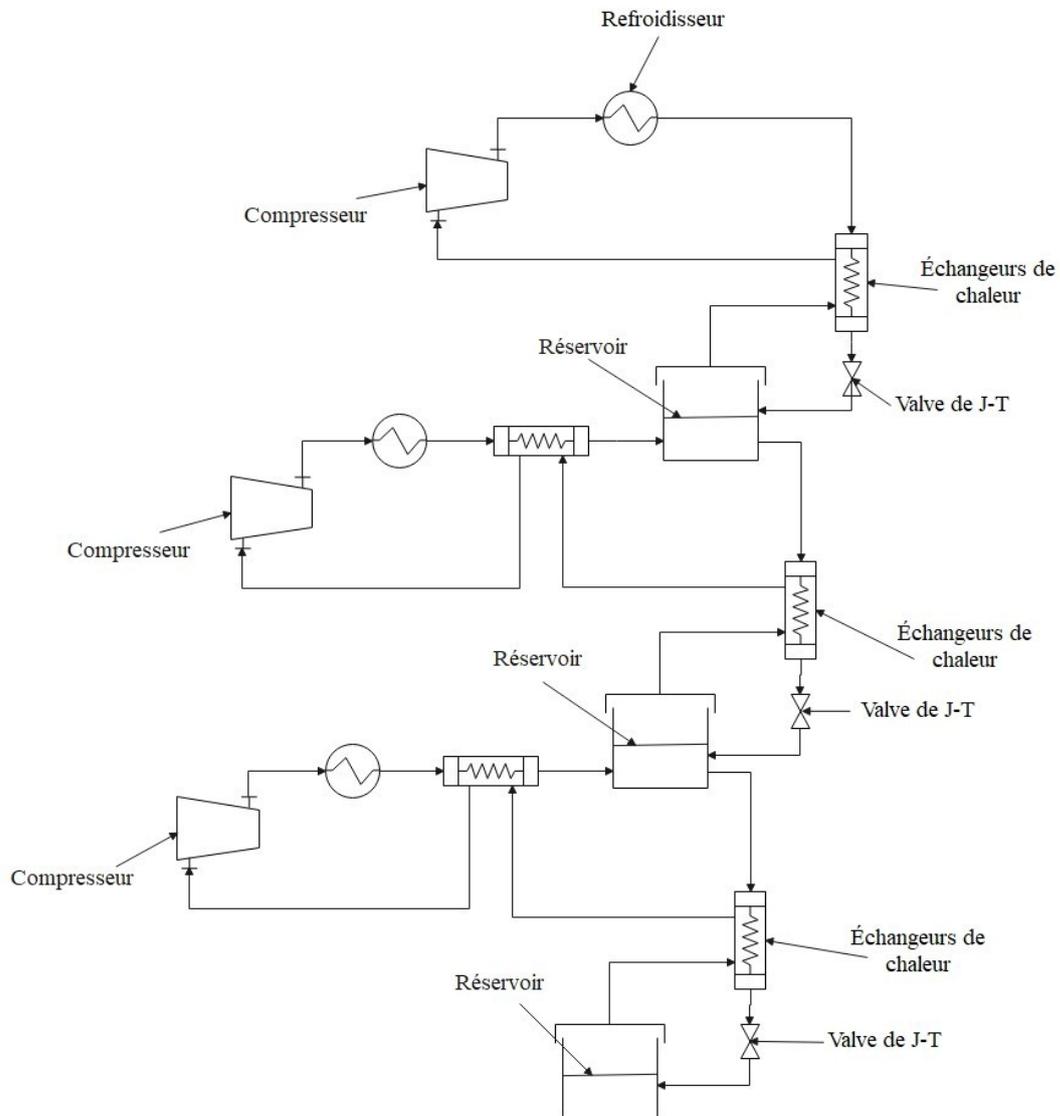


Figure 14. Cycle cascade

### 3.6. Exercice : Exercice 3

[solution n°3 p.16]

Tous les systèmes de liquéfaction, nécessitent :

- Un échangeur de chaleur
- Un compresseur
- Un réacteur
- Une pompe

# Solutions des exercices



## > **Solution n°1**

Exercice p. 9

Les gaz permanents sont :

- liquéfiés par augmentation de pression à température ambiante
- liquéfiés à l'aide de systèmes cryogéniques
- liquéfiés en utilisant les deux méthodes

## > **Solution n°2**

Exercice p. 9

Il existe deux échangeurs de chaleur couramment utilisés, qui sont :

à tube enroulé dans une coque et à plaques et ailettes

## > **Solution n°3**

Exercice p. 15

Tous les systèmes de liquéfaction, nécessitent :

- Un échangeur de chaleur
- Un compresseur
- Un réacteur
- Une pompe

# Références

- 1 Compressed Gas Association, Inc. Handbook of Compressed Gases, 3rd ed. Van Nostrand Reinhold, New York (1990)
- 2 P. PETIT, Séparation et liquéfaction des gaz, Techniques de l'Ingénieur, J 3600.
- 3 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
- 4 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)
- 5 Mechanical Engineers' Handbook: Energy and Power, Volume 4, Third Edition