

## Chapitre 3 :

4<sup>ème</sup> Séance

# Procédés de liquéfaction des gaz permanents

---

## 4. Procédé de liquéfaction Linde-Hampson

### 4.1. Principe

Il s'agit d'un processus de liquéfaction des gaz, en particulier pour la séparation de l'air. **William Hampson** et **Carl von Linde** ont déposé indépendamment des brevets du cycle en 1895 : **Hampson** le 23 mai 1895 & **Linde** le 5 juin 1895.

Le **cycle Linde-Hampson (LH)** a introduit le refroidissement régénératif\*, un système de refroidissement à réaction positive. La disposition de l'échangeur de chaleur permet une différence de température absolue pour dépasser une seule étape de refroidissement et atteindre les basses températures nécessaires à la liquéfaction des gaz fixes.

Le **cycle Linde-Hampson (LH)** ne diffère du **cycle Siemens\*\*** que dans l'étape d'expansion. Alors que le cycle Siemens fait travailler le gaz à l'extérieur pour réduire sa température, le **cycle Linde-Hampson (LH)** repose uniquement sur l'**effet Joule - Thomson** (Voir Chapitre 2) ; ceci a l'avantage que le côté froid de l'appareil de refroidissement n'a pas besoin de pièces mobiles.

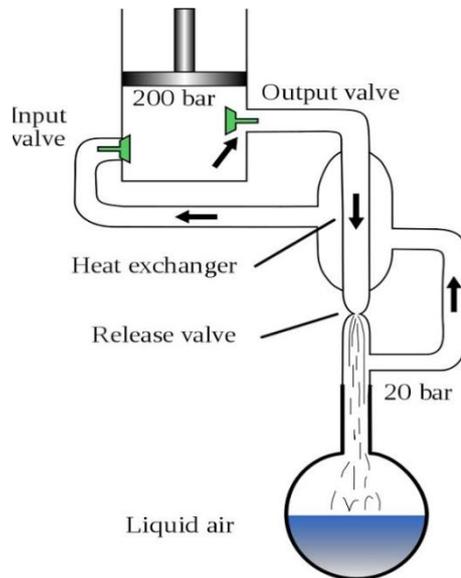
Le cycle de refroidissement se déroule en plusieurs étapes :

- 1) Le gaz est comprimé, ce qui ajoute de l'énergie externe au gaz, pour lui donner ce dont il a besoin pour parcourir le cycle. Le brevet américain de Linde donne un exemple avec la basse pression latérale de 25 atm standard (370 psi, 25 bar) et la haute pression latérale de 75 atm standard (1100 psi, 76 bar).
- 2) Le gaz à haute pression est ensuite refroidi en immergeant le gaz dans un environnement plus frais; le gaz perd une partie de son énergie (chaleur). L'exemple de brevet de Linde donne un exemple de saumure à 10 °C.
- 3) Le gaz à haute pression est en outre refroidi avec un échangeur de chaleur à contre-courant ; le gaz plus froid sortant du dernier étage refroidit le gaz allant au dernier étage.
- 4) Le gaz est encore refroidi en faisant passer le gaz à travers un orifice Joule-Thomson (détendeur); le gaz est maintenant à la pression la plus basse.  
Le gaz à basse pression est maintenant à son niveau le plus froid dans le cycle actuel.  
Une partie du gaz se condense et devient un produit de sortie.
- 5) Le gaz à basse pression est redirigé vers l'échangeur de chaleur à contre-courant pour refroidir le gaz chaud, haute pression, entrant.

---

\* Le refroidissement régénératif est une méthode de refroidissement des gaz dans laquelle le gaz comprimé est refroidi en lui permettant de se dilater et de prendre ainsi la chaleur de l'environnement. Le gaz détendu refroidi passe ensuite à travers un échangeur de chaleur où il refroidit le gaz comprimé entrant.

- 6) Après avoir quitté l'échangeur de chaleur à contre-courant, le gaz est plus chaud qu'il ne l'était à son plus froid, mais plus froid qu'il ne l'avait commencé à l'étape 1.
- 7) Le gaz est renvoyé au compresseur, mélangé au gaz d'appoint entrant chaud (pour remplacer le produit condensé), et renvoyé au compresseur pour faire un autre voyage à travers le cycle (et devenir encore plus froid).



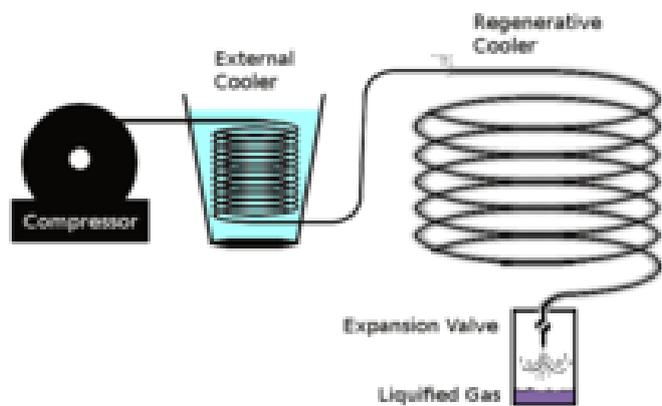
### Cycle Linde - Hampson

Ce diagramme n'inclut pas le refroidisseur externe, ne met pas en surbrillance l'échangeur de chaleur à contre-courant ou montre une rétention importante

(Source :

<https://www.youtube.com/watch?v=YGUOCVCZqk8>)

Dans chaque cycle, le refroidissement net est supérieur à la chaleur ajoutée au début du cycle. À mesure que le gaz passe plus de cycles et se refroidit, il devient plus difficile d'atteindre des températures plus basses au détenteur.



### Croquis du cycle Hampson-Linde

Ce croquis ne montre pas la régénération (Gaz renvoyé au compresseur)

(Source : <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/e/e0/HampsonLinde.png/220px-HampsonLinde.png>)

\*\* Le **cycle Siemens** est une technique utilisée pour refroidir ou liquéfier les gaz.

Un gaz est comprimé, ce qui entraîne une augmentation de sa température en raison de la relation directement proportionnelle entre la température et la pression.

Le gaz comprimé est ensuite refroidi par un échangeur de chaleur et décomprimé, ce qui donne un gaz (éventuellement condensé) plus froid que l'original à la même pression.

**Carl Wilhelm Siemens** a breveté le **cycle Siemens** en 1857.

(Source : [https://translate.google.com/translate?hl=fr&sl=en&tl=fr&u=https%3A%2F%2Fen.m.wikipedia.org%2Fwiki%2FHampson%E2%80%93Linde\\_cycle&prev=search](https://translate.google.com/translate?hl=fr&sl=en&tl=fr&u=https%3A%2F%2Fen.m.wikipedia.org%2Fwiki%2FHampson%E2%80%93Linde_cycle&prev=search))

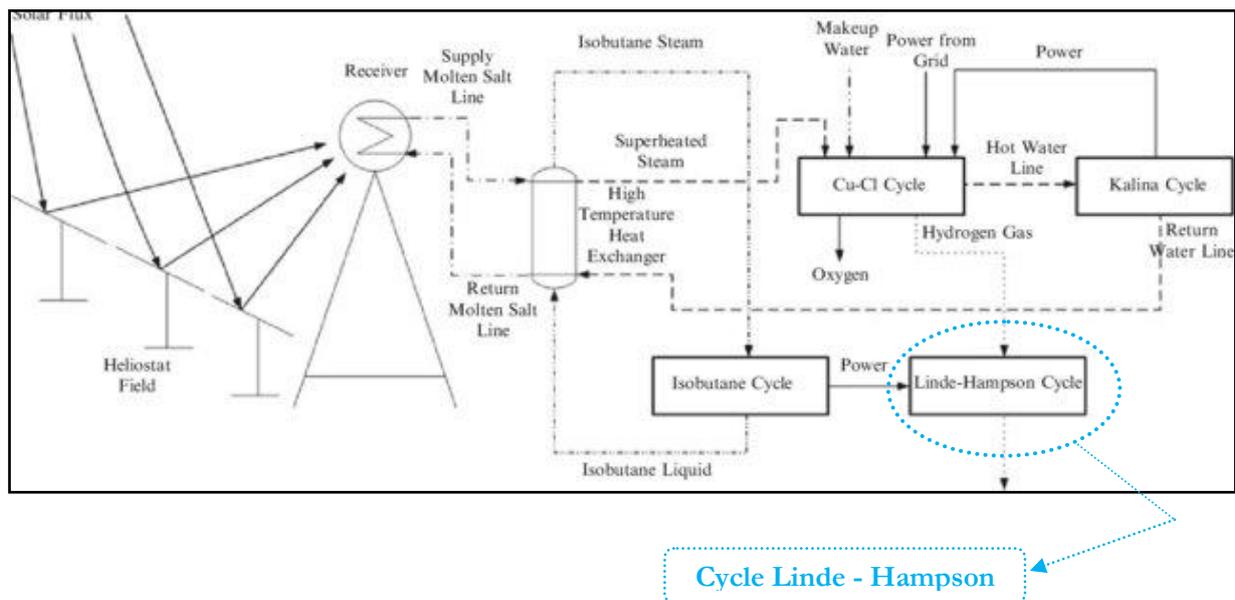
## 4.2. Exemples d'application

### ➤ Exemple 1 :

(Ref : Ratlamwala, T. A. H., & Dincer, I. (2014). Energy and Exergy Analyses of an Integrated Solar Based Hydrogen Production and Liquefaction System. Progress in Exergy, Energy, and the Environment, 99–110. doi:10.1007/978-3-319-04681-5\_9)

L'exemple 1 concerne une étude sur des analyses énergétique et exergétique d'un système intégré avec champ d'héliostat, cycle Cu – Cl, cycle Isobutane et **système Linde – Hampson (LH)**.

Le Schéma du système intégré est représenté sur la figure ci-dessous :



**Le Cycle Linde – Hampson (LH) :** (Voir figure ci-dessous)

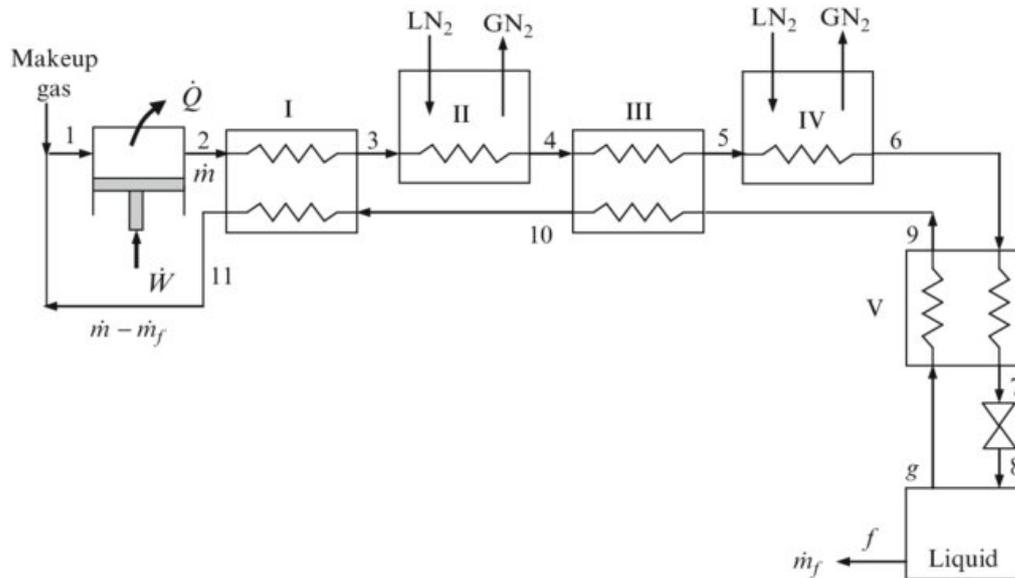
Le système utilise l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène en utilisant le cycle Cu – Cl et plus tard le **liquéfié** en utilisant le **cycle Linde – Hampson (LH)**.

L'énergie produite par le cycle d'isobutane est fournie au cycle de **Linde – Hampson (LH)** pour liquéfier l'hydrogène produit par le cycle Cu – Cl.

Dans le **système LH**, le gaz d'appoint est mélangé à l'hydrogène gazeux provenant du cycle Cu – Cl et le mélange à l'état 1 est comprimé à l'état 2 de 101 kPa à 10 MPa.

La chaleur est rejetée du gaz comprimé vers un liquide de refroidissement. Le gaz haute pression est refroidi à l'état 3 dans un échangeur de chaleur à contre-courant régénératif (I) par le gaz non condensé, et est encore refroidi par écoulement à travers deux bains d'azote (II et IV) et deux échangeurs de chaleur régénératifs (III et V) avant étranglé à l'état 8, où il s'agit d'un mélange liquide-vapeur saturé.

Le liquide est collecté comme sortie souhaitée pour une utilisation ultérieure et la vapeur est acheminée à travers la moitié inférieure du cycle.



### Schéma du cycle Linde – Hampson (LH)

(Source :

[https://www.researchgate.net/publication/271015170\\_Energy\\_and\\_Exergy\\_Analyses\\_of\\_an\\_Integrated\\_Solar\\_Based\\_Hydrogen\\_Production\\_and\\_Liquefaction\\_System/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/271015170_Energy_and_Exergy_Analyses_of_an_Integrated_Solar_Based_Hydrogen_Production_and_Liquefaction_System/figures?lo=1))

#### ➤ Exemple 2 :

(Ref: Lerou, P. P. P. M., Jansen, H., Venhorst, G. C. F., Burger, J. F., Veenstra, T. T., Holland, H. J., Brake, H.J.M. ter., Elwenspoek, M., and Rogalla, H. (2005). Progress in Micro Joule-Thomson Cooling at Twente University. Cryocoolers 13, 489–496. doi:10.1007/0-387-27533-9\_62)

Dans l'exemple 2, un cycle Linde-Hampson (Figure ci-dessous) est présenté. En effet, le gaz est mis sous pression à l'aide d'un compresseur (1 - 2).

Après compression, le gaz s'écoule du compresseur à travers un échangeur de chaleur à contre-courant (CFHX) vers une restriction de débit (2 - 3).

Grâce à cette restriction, le gaz subit une expansion isenthalpique vers le côté basse pression et change généralement sa phase en liquide (3 - 4).

En absorbant la chaleur de son environnement, le liquide s'évapore (4 - 5) et la vapeur produite retourne à travers le CFHX en absorbant la chaleur du côté chaud à haute pression (5 - 1). Une fois que le gaz a atteint le compresseur, il peut être à nouveau comprimé, fermant le cycle.

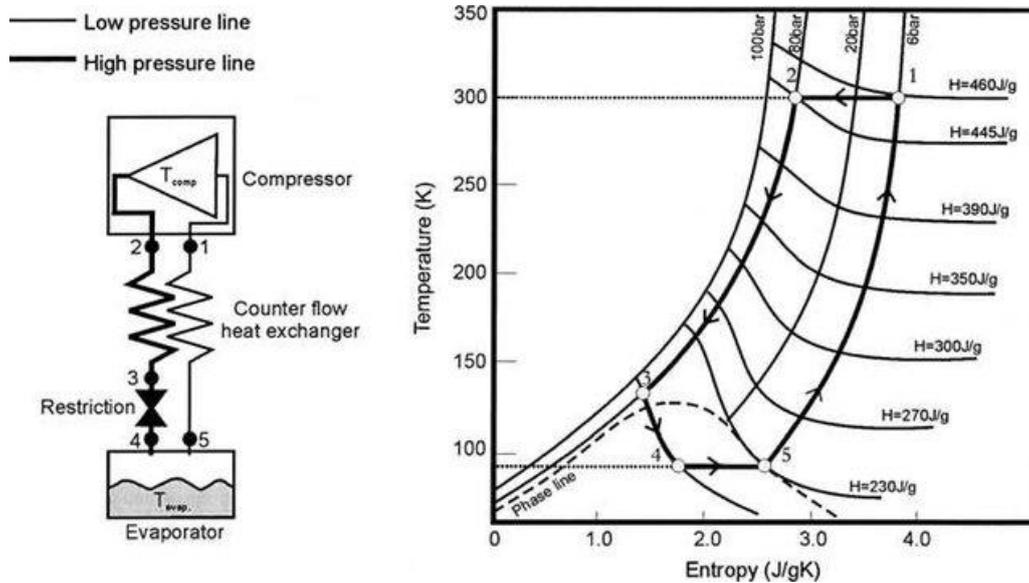
Dans certaines applications, le dispositif à refroidir présente une très faible dissipation ou aucune dissipation du tout. Dans ces cas, la puissance de refroidissement requise est déterminée par la charge calorifique parasite totale de l'environnement. Grâce à une conception intelligente de l'enceinte cryogénique d'un si petit appareil, la puissance de refroidissement requise peut être limitée à quelques mW seulement.

Le gaz utilisé dans un cycle Linde-Hampson (LH) en combinaison avec la basse pression choisie déterminera la température de l'étage froid. Dans la recherche d'un gaz bon marché, non

toxique et ininflammable pouvant créer une température cryogénique (environ  $T < 120$  K), l'azote est un choix évident.

La température d'ébullition de l'azote à 1 bar est d'environ 77 K.

L'échangeur de chaleur à contre-courant (CFHX) est l'une des parties les plus cruciales d'un cycle **Linde-Hampson (LH)**. Le CFHX maintient le gradient de température entre les extrémités chaudes et froides du refroidisseur. Le CFHX améliore également l'efficacité du refroidisseur en échangeant l'enthalpie entre le côté haute et basse pression.



Sur le côté gauche, un schéma de principe du cycle Linde-Hampson.  
A droite, le diagramme T-S de l'azote avec isobares et isenthalpes.  
La ligne en gras avec des chiffres représente le cycle.

(Source: [https://www.researchgate.net/publication/48340443\\_Progress\\_in\\_Micro\\_Joule-Thomson\\_Cooling\\_at\\_Twente\\_University/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/48340443_Progress_in_Micro_Joule-Thomson_Cooling_at_Twente_University/figures?lo=1))