

## CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

### 2. 1 Généralités sur la liquéfaction des gaz

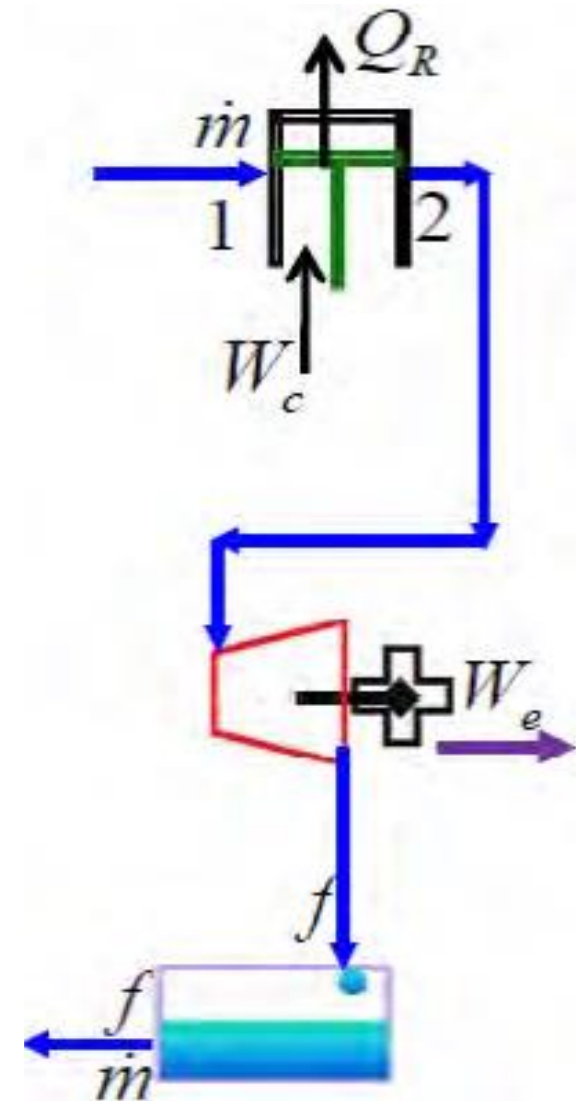
**La liquéfaction des gaz concerne la réfrigération à des températures inférieures à  $-150^{\circ}\text{C}$ . La réfrigération à ces basses températures présente beaucoup d'intérêt dans les secteurs alimentaire, médical, vétérinaire, industriel et de la physique.**

## CHAPITRE 2 : PROCÉDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

### 2.2 Système thermodynamique idéal

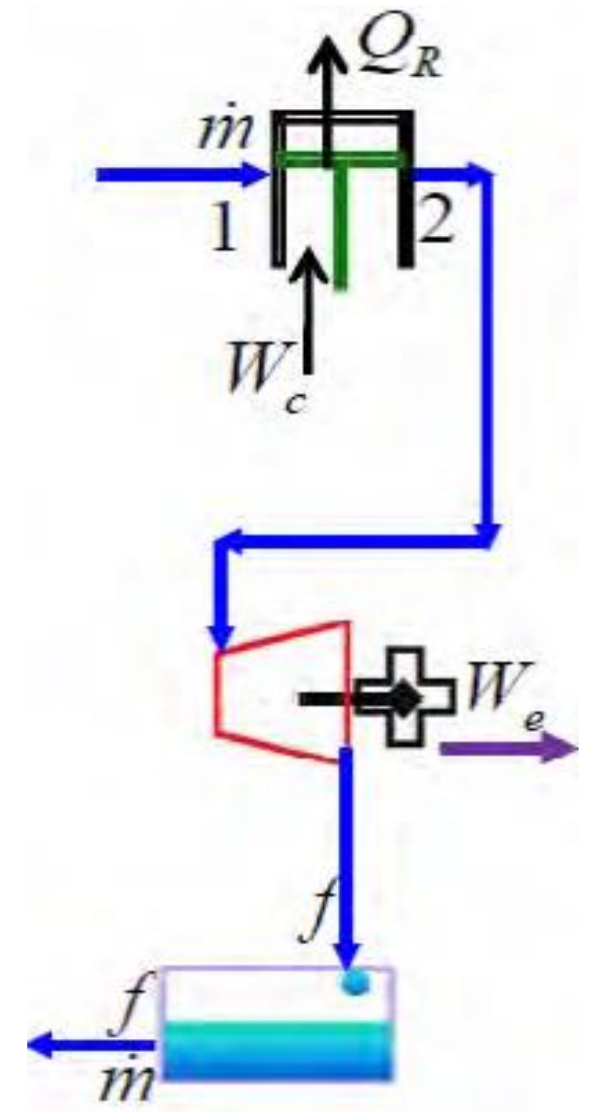
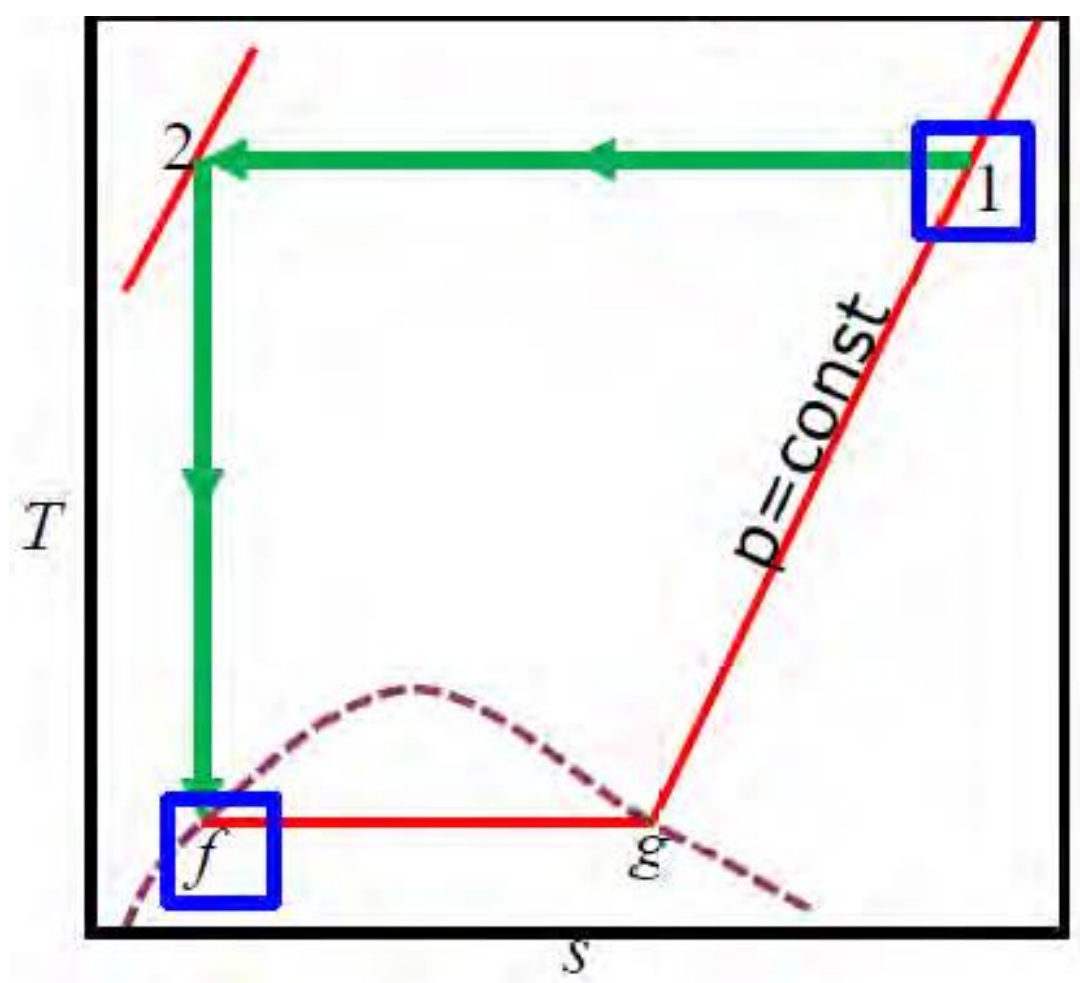
Les caractéristiques principales de ce système sont les suivantes:

- Tout le gaz qui est comprimé, se liquéfie.
- Tous les procédés sont de nature idéale et il n'y a pas de chute de pression irréversible.
- Le processus de compression et de détente est isotherme et isentropique respectivement.



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

2.2. Système thermodynamique idéal



L'état initial 1 du gaz détermine la position du point f.

CHAPITRE 2 : PROCÉDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

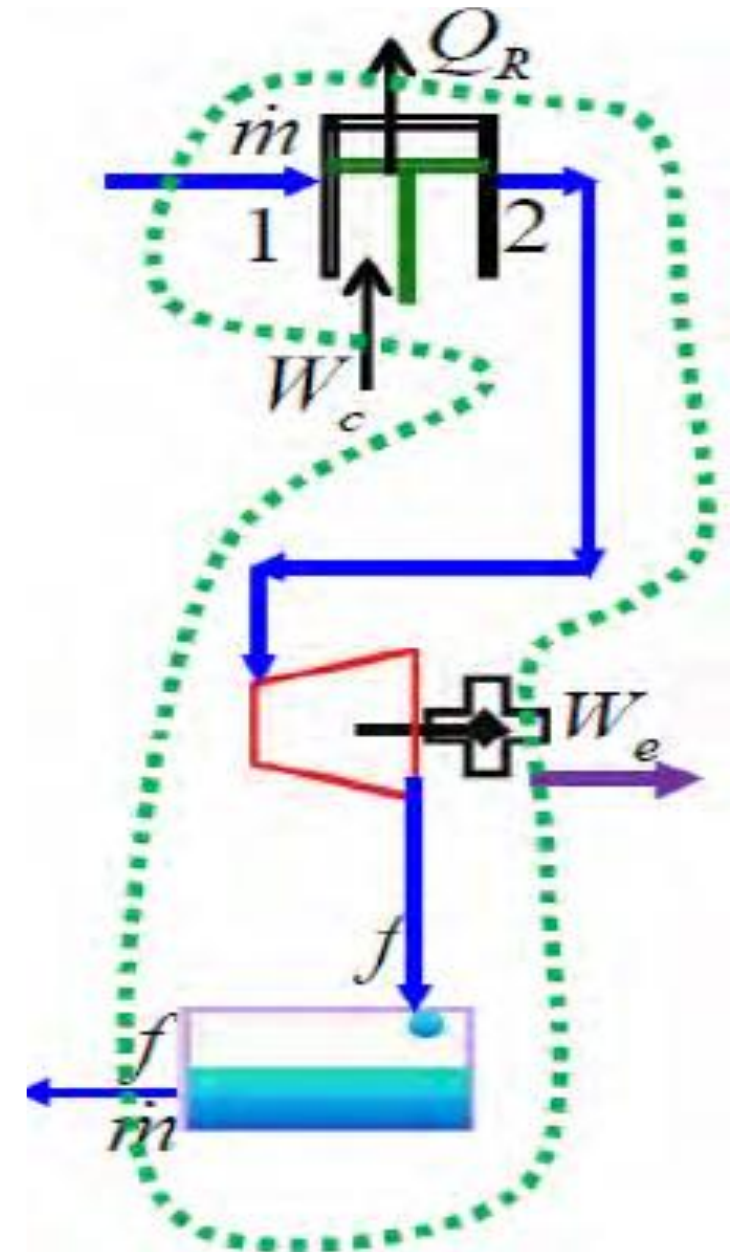
2.2. Système thermodynamique idéal

C'est un système thermodynamique ouvert car le fluide de travail circule à travers le système.

Considérons un volume de contrôle pour ce système comme indiqué sur la figure.

1ere loi de la thermodynamique est appliqué pour analyser le système.

Les changements dans les vitesses et les niveaux de référence sont supposés négligeables.



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

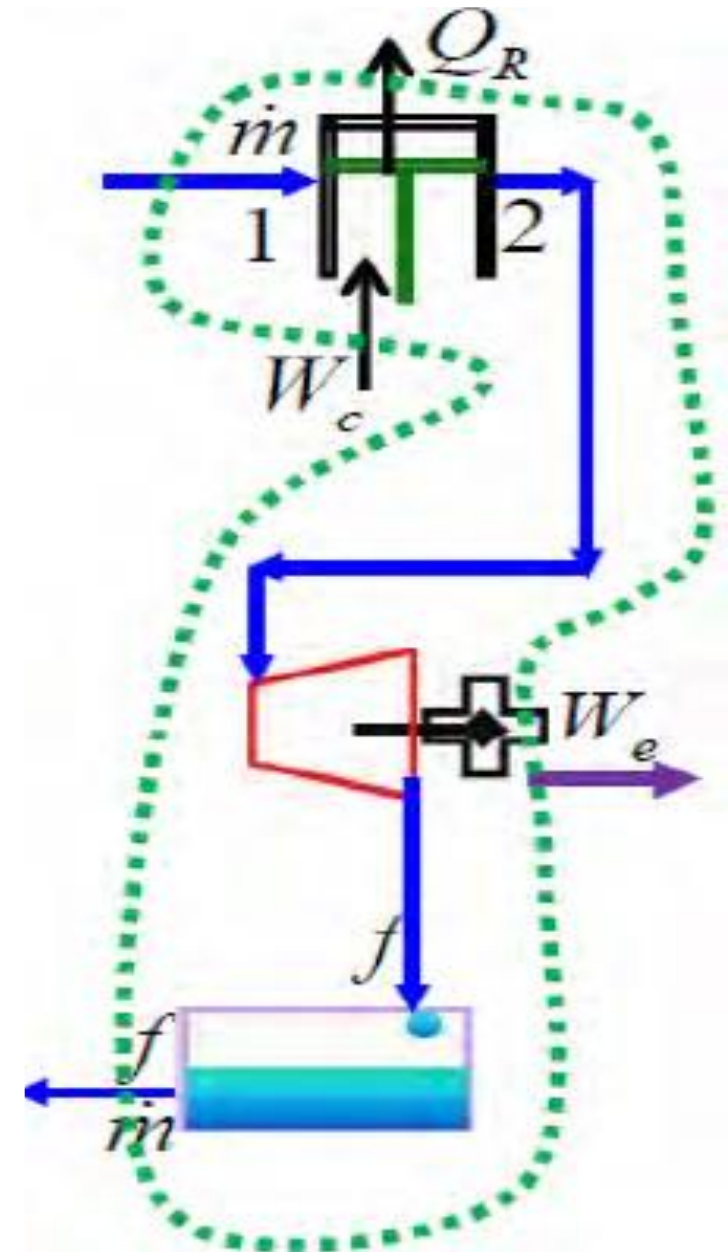
2.2. Système thermodynamique idéal

Les quantités entrant et sortant du système sont données ci-dessous.

Entr.	Sortie
$m_1$ en 1	$Q_R$
$W_c$	$W_e$
	$m_1$ en f

$$E_{in} = E_{out}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + W_c = Q_R + W_e + \dot{m}_f h_f$$



CHAPITRE 2 : PROCÉDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

2.2. Système thermodynamique idéal

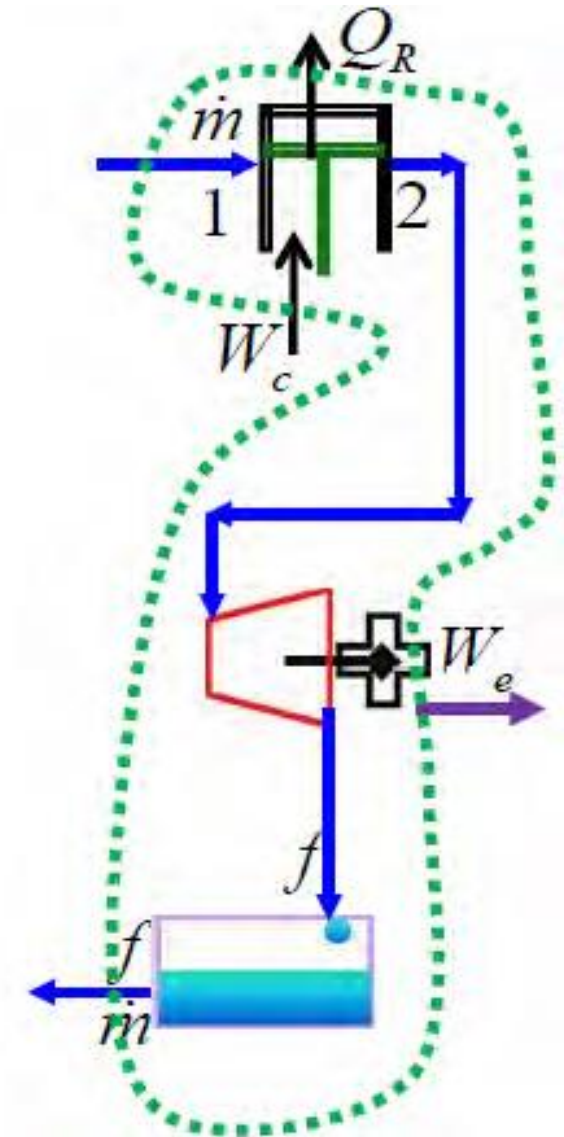
Le travail que nous produisons par la turbine est négligeable par rapport aux autres termes.

$$\dot{m}_1 h_1 + W_c = Q_R + \cancel{W_e} + \dot{m}_f h_f$$

La réécriture de l'équation précédente donne

$$Q_R - W_c = \dot{m}_1 (h_1 - h_f)$$

Le processus de compression est supposé être isotherme.



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

2. 1 Généralités sur la liquéfaction des gaz

Systeme thermodynamique idéal

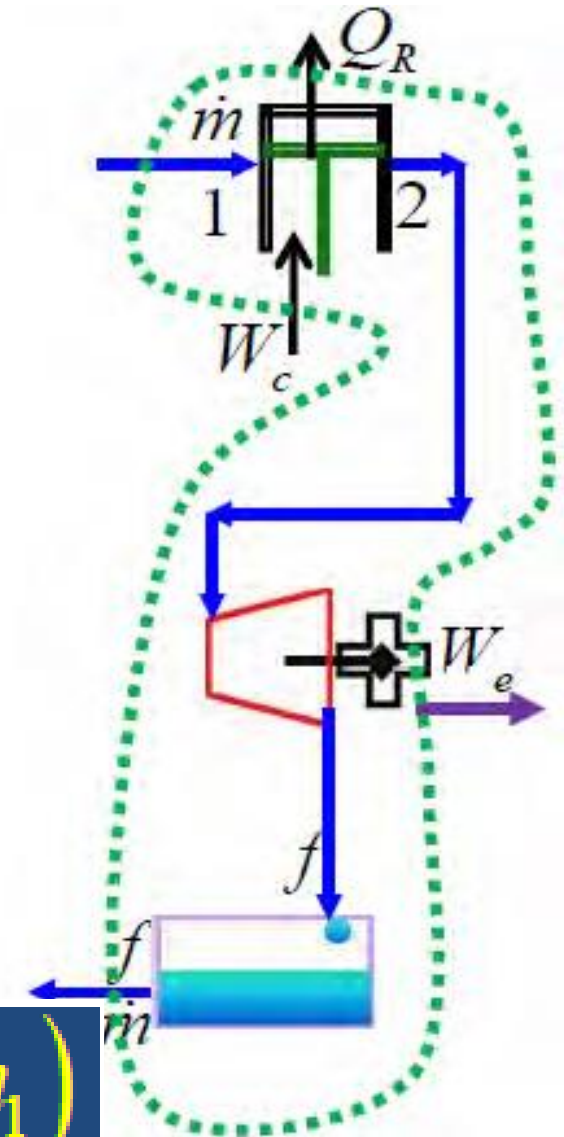
Par conséquent, de la deuxième loi de la thermodynamique, nous pouvons écrire

$$Q_R = \dot{m}_1 T_1 (s_2 - s_1)$$

En outre, le processus d'expansion est un processus isentropique. Par conséquent,  $s_2 = s_f$ .

Par substitution

$$W_c = \dot{m}_1 T_1 (s_f - s_1) - \dot{m}_1 (h_f - h_1)$$



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

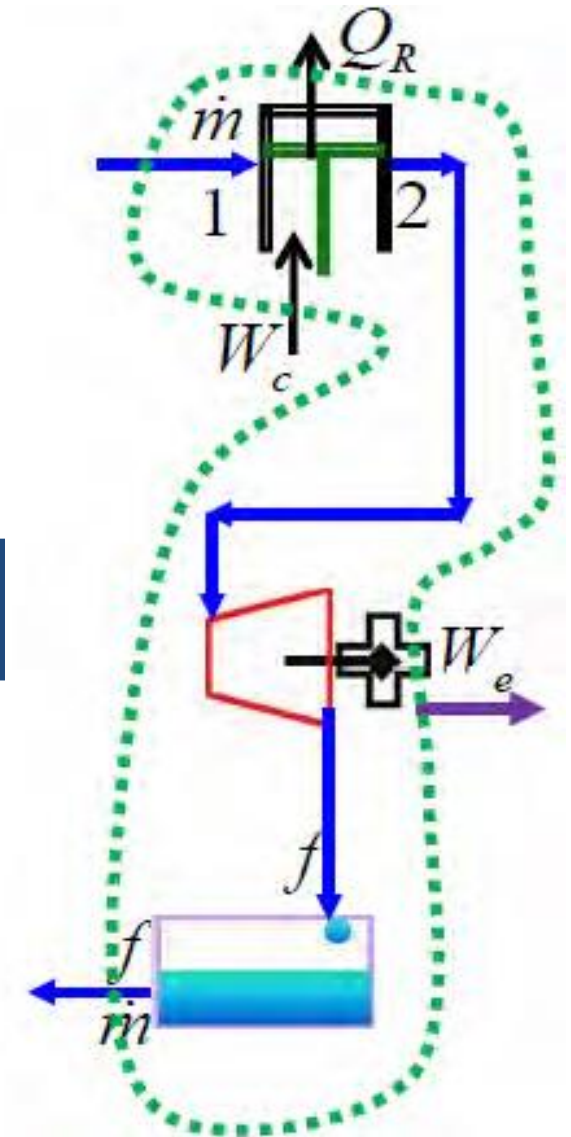
2.2. Système thermodynamique idéal

Ce travail de compression entre dans le système.  
 Par conséquent, la valeur est exprimée en  
 quantité négative.

$$-W_c = \dot{m}_1 T_1 (s_1 - s_f) - \dot{m}_1 (h_1 - h_f)$$

Travail requis par unité de masse du gaz  
 compressé :

$$-\frac{W_c}{\dot{m}_1} = T_1 (s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$





CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

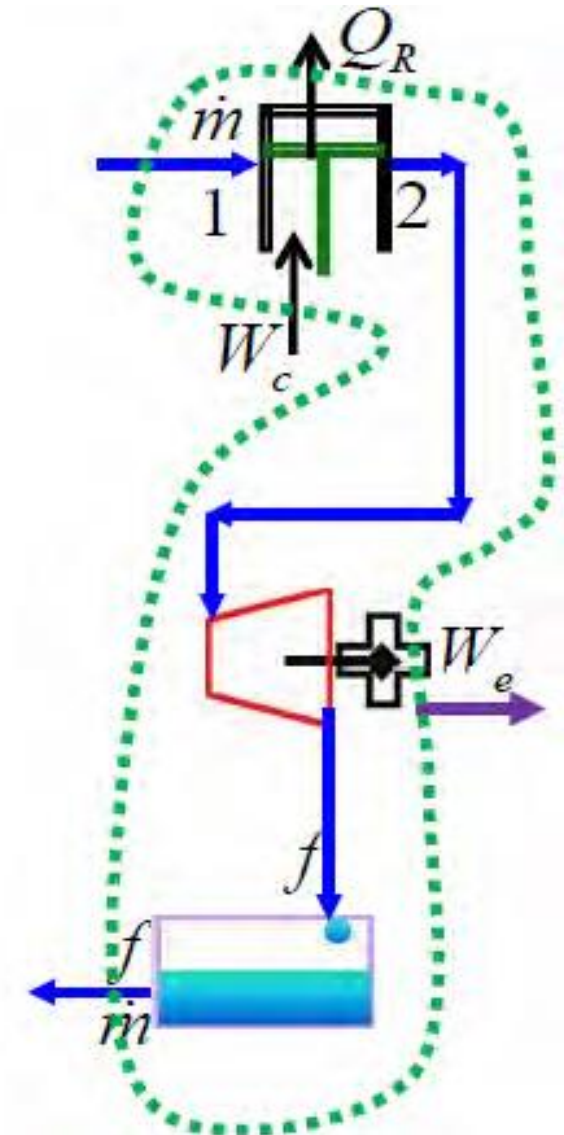
2.2. Système thermodynamique idéal

Comme dans un système idéal, la masse de gaz comprimé est identique à la masse de gaz liquéfiée,  $m_1 = m_f$ .

Le travail requis par unité de masse du gaz liquéfié est donné par :

$$\frac{W_c}{\dot{m}_f} = T_1 (s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$

Le travail requis par unité de masse du gaz dépend de l'état initial du gaz.



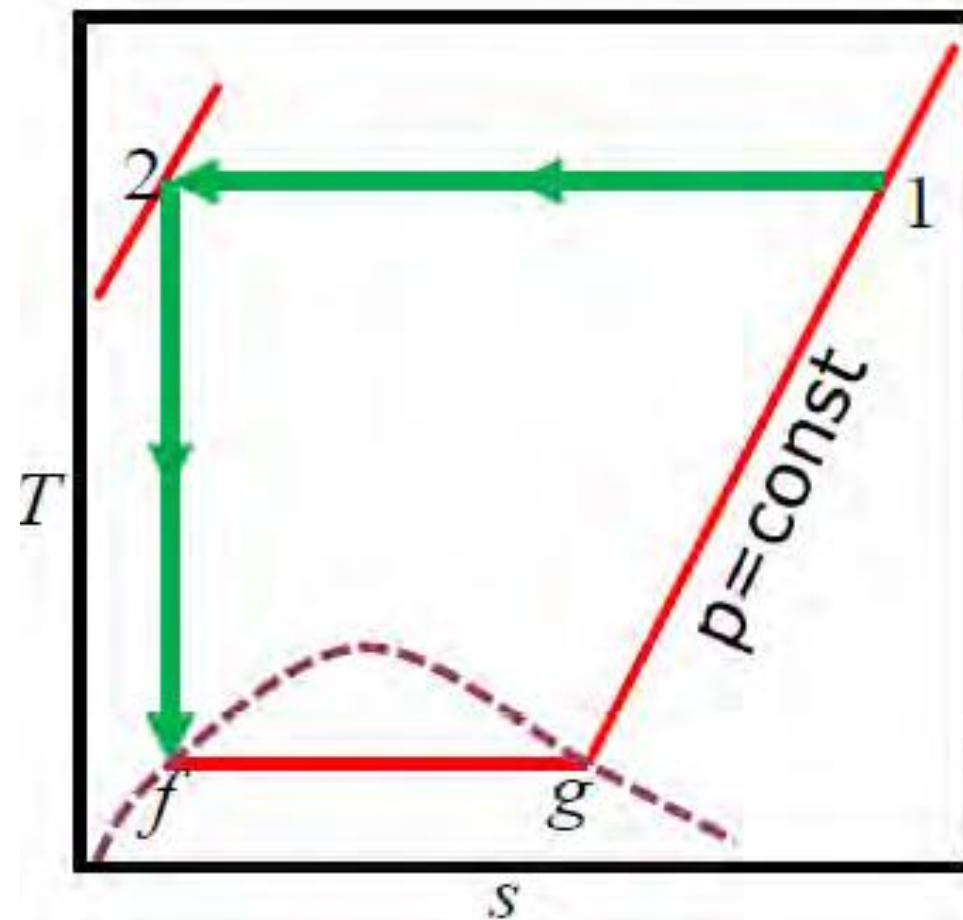
## 2.2. Système thermodynamique idéal

### Exemple

Déterminer l'exigence de travail idéal pour la liquéfaction de l'azote à partir de 1 bar de pression et 300 K.?

#### Étape 1

Le schéma T-s pour un cycle thermodynamique idéal est tel que montré



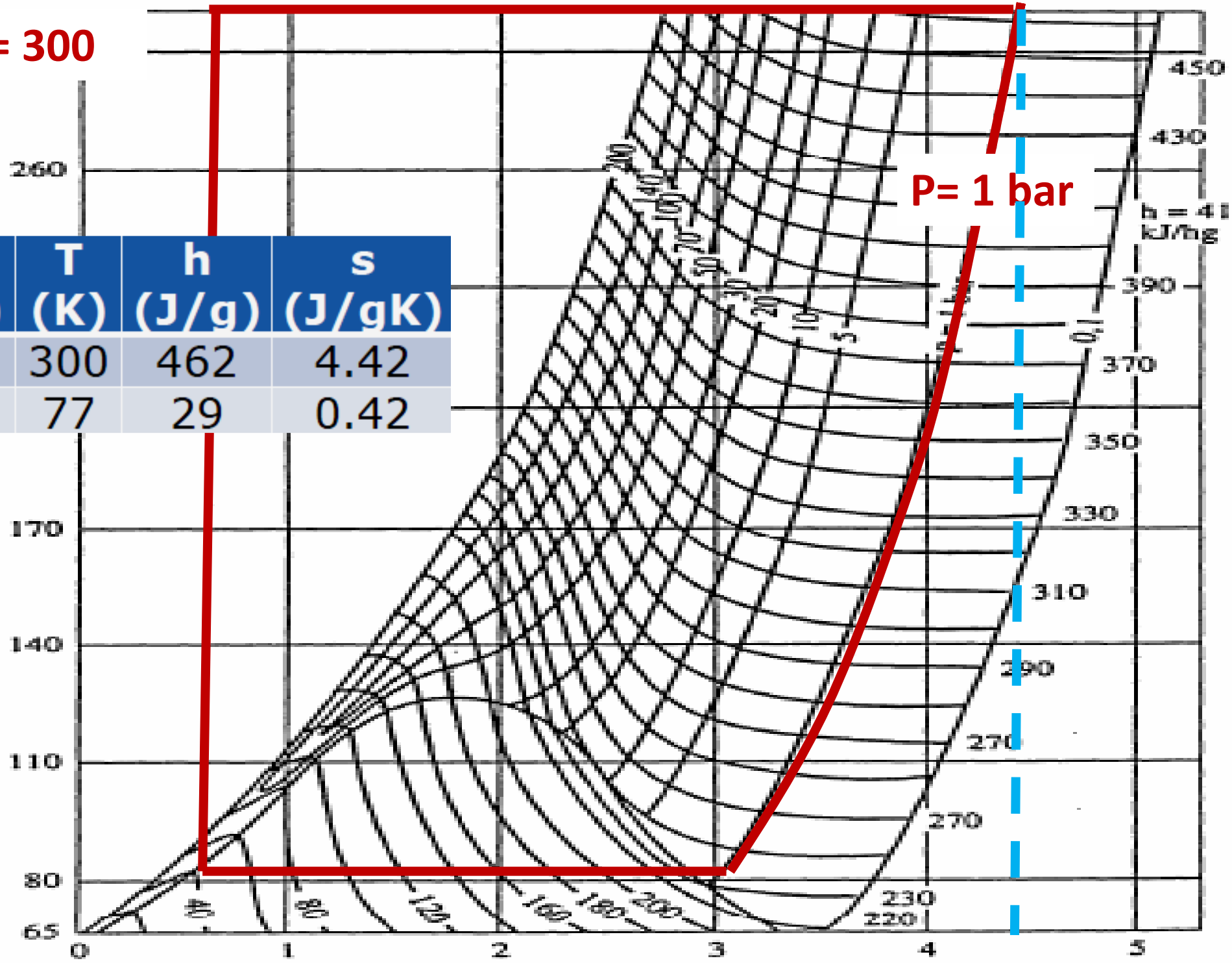
**T = 300**

**P = 1 bar**

**h = 410  
kJ/kg**

	<b>p (bar)</b>	<b>T (K)</b>	<b>h (J/g)</b>	<b>s (J/gK)</b>
1	1	300	462	4.42
f	1	77	29	0.42

Température (°C)



Entropie massique  $s$  (kJ/kg.K)

Diagramme de l'azote.

CHAPITRE 2 : PROCÉDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

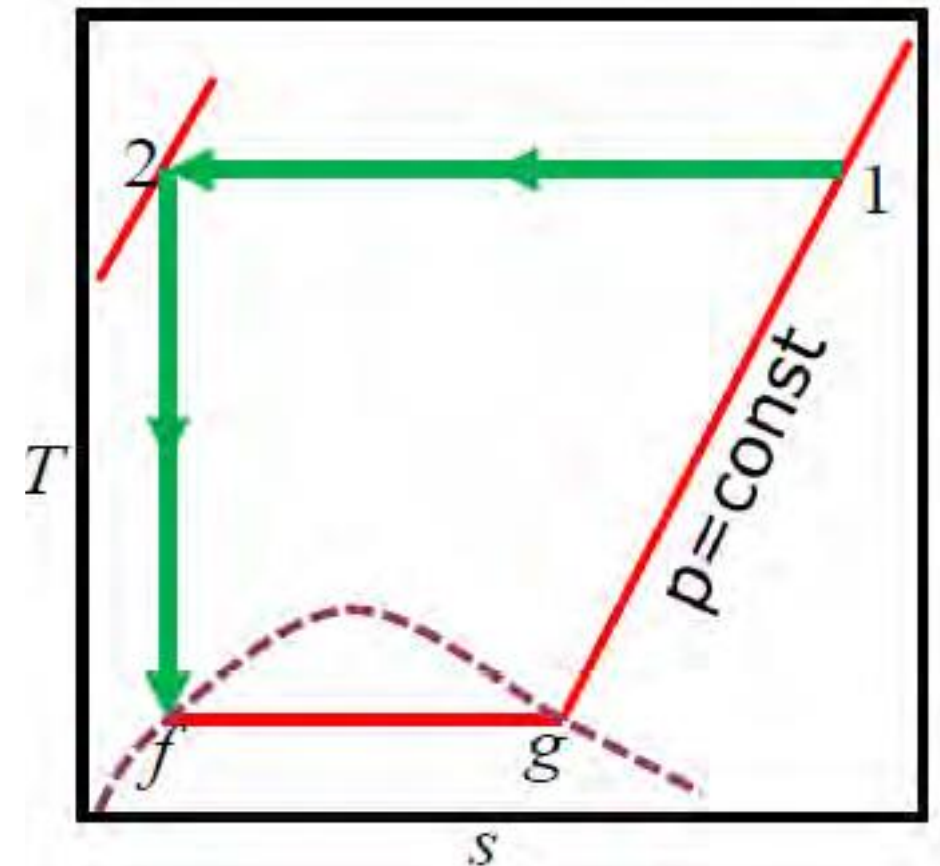
Étape 2

Les propriétés de l'état à différents points sont

	p (bar)	T (K)	h (J/g)	s (J/gK)
1	1	300	462	4.42
f	1	77	29	0.42

$$-\frac{\dot{W}_i}{\dot{m}_f} = T_1 (s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$

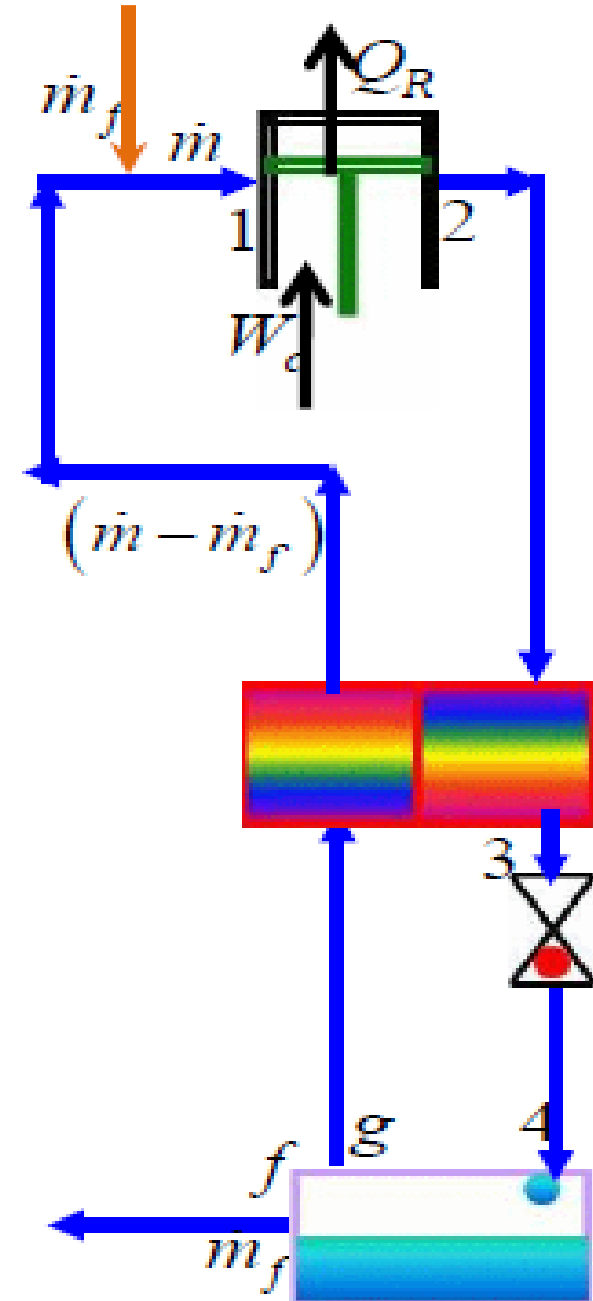
$$= 300(4.42 - 0.42) - (462 - 29) = 767 \text{ J / g}$$



## 2.3 Cycle de Linde –Hampson

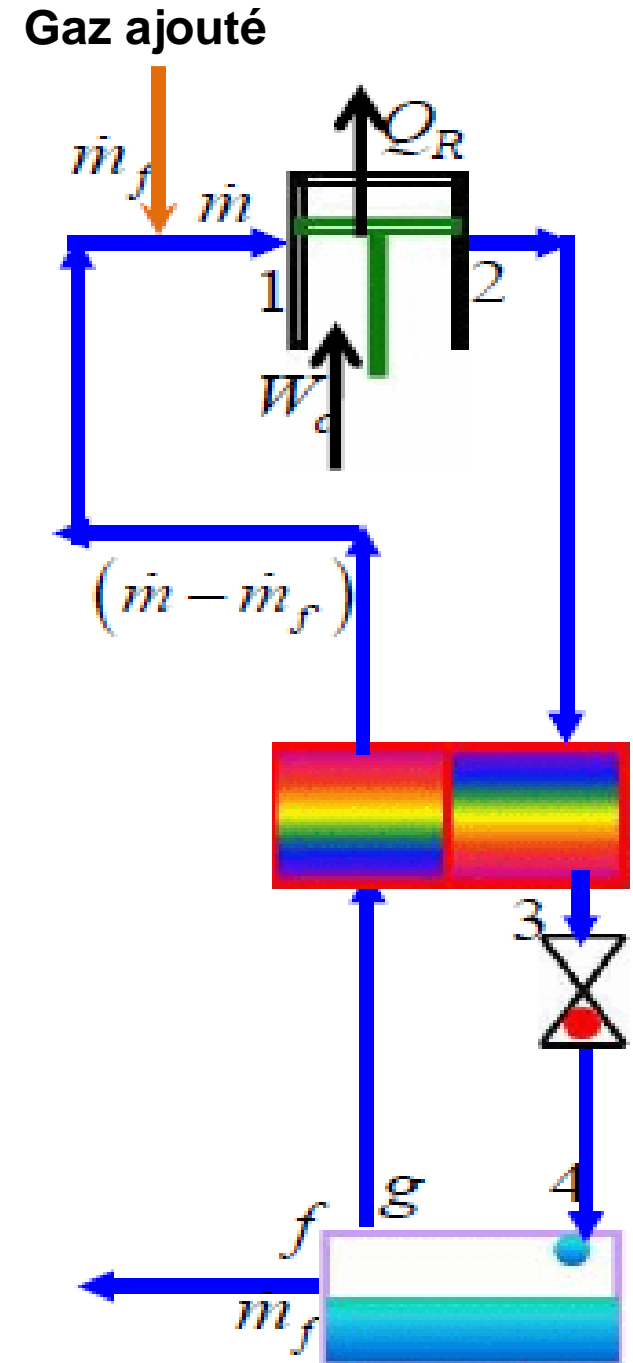
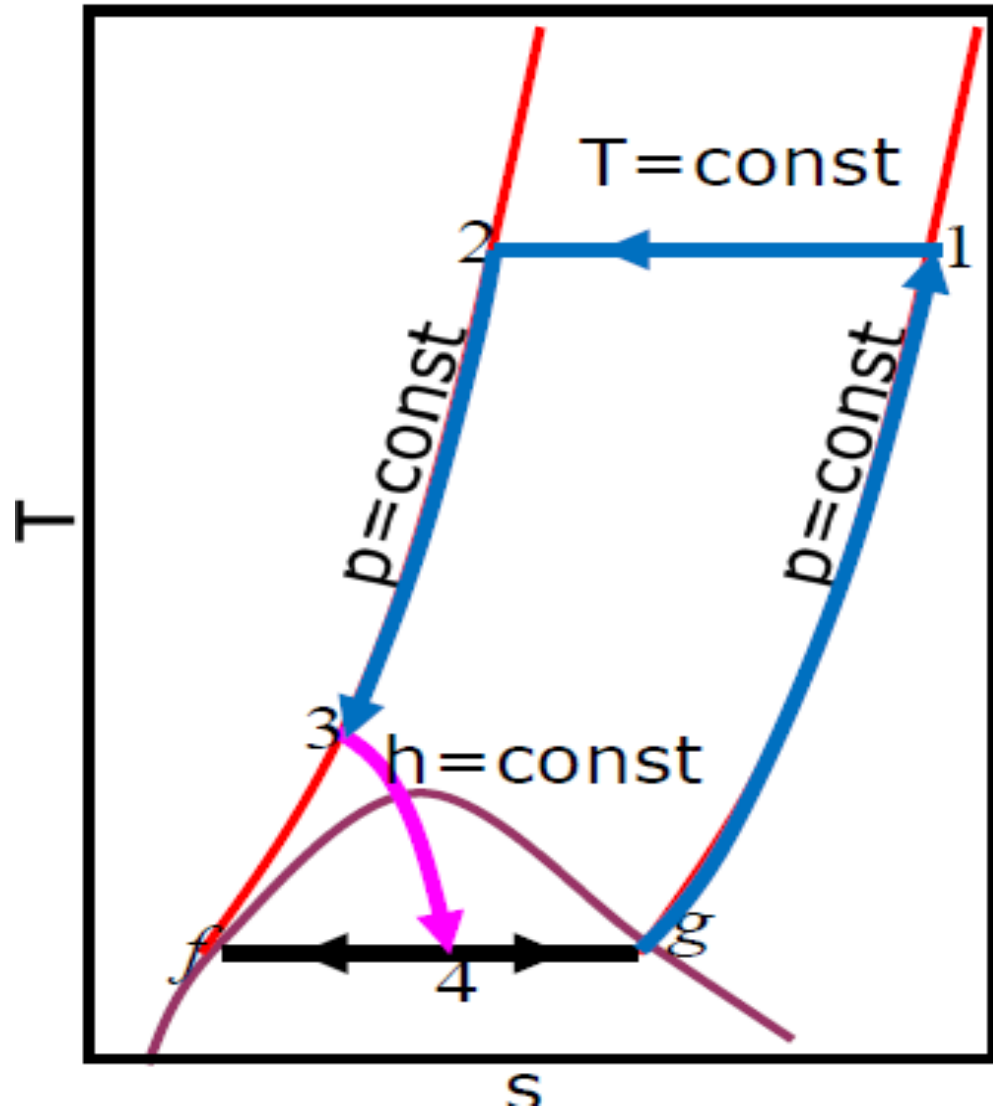
- Le processus d'échange de chaleur est un processus isobarique et il est utilisé pour conserver le froid dans le système.
- C'est-à-dire que le flux de gaz (2→3) est refroidi par le flux de gaz (g →1).
- Le dispositif d'extension J -T est utilisé pour le changement de phase du courant de gaz vers le courant liquide en abaissant la température.

Gaz ajouté



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

2.3 Cycle de Linde –Hampson



## 2.3 Cycle de Linde –Hampson

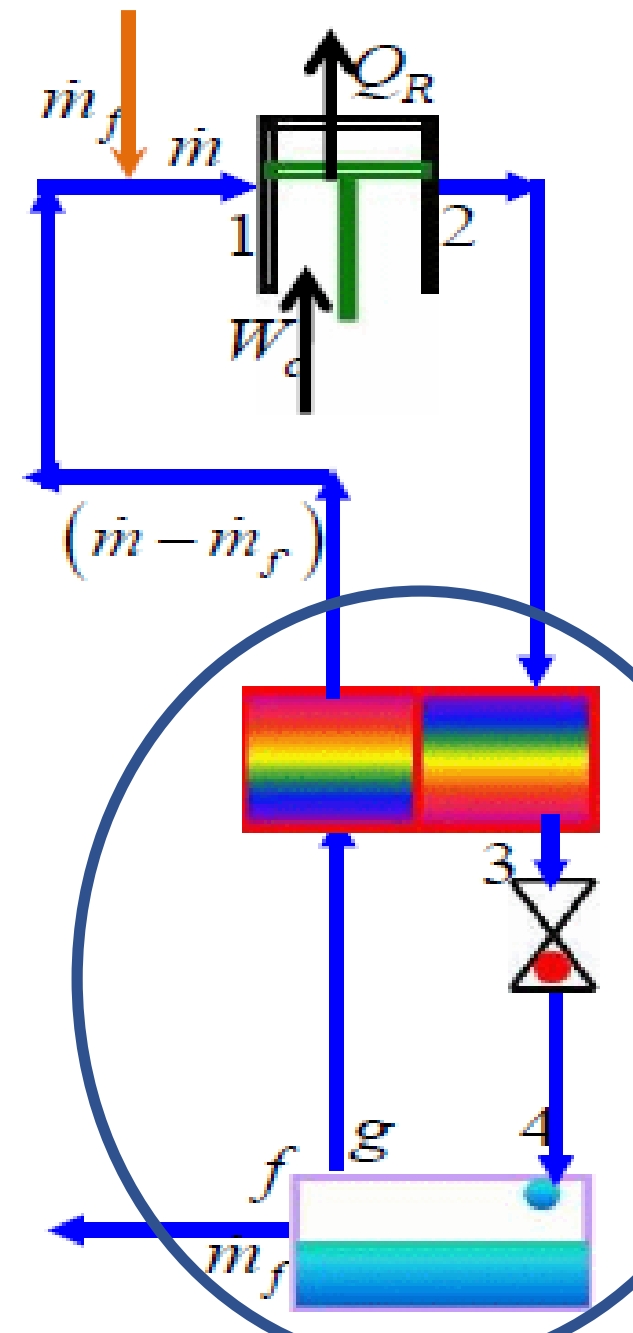
Considérons un volume de contrôle pour ce système comme indiqué sur la figure.

Il renferme l'échangeur de chaleur, le dispositif J -T et le récipient à liquide.

La 1ère loi de la thermodynamique est appliquée pour analyser le système.

Les changements dans les vitesses et les niveaux de référence sont supposés négligeables.

Gaz ajouté



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

### 2.3 Cycle de Linde –Hampson

Les quantités entrant et sortant de ce volume de contrôle sont

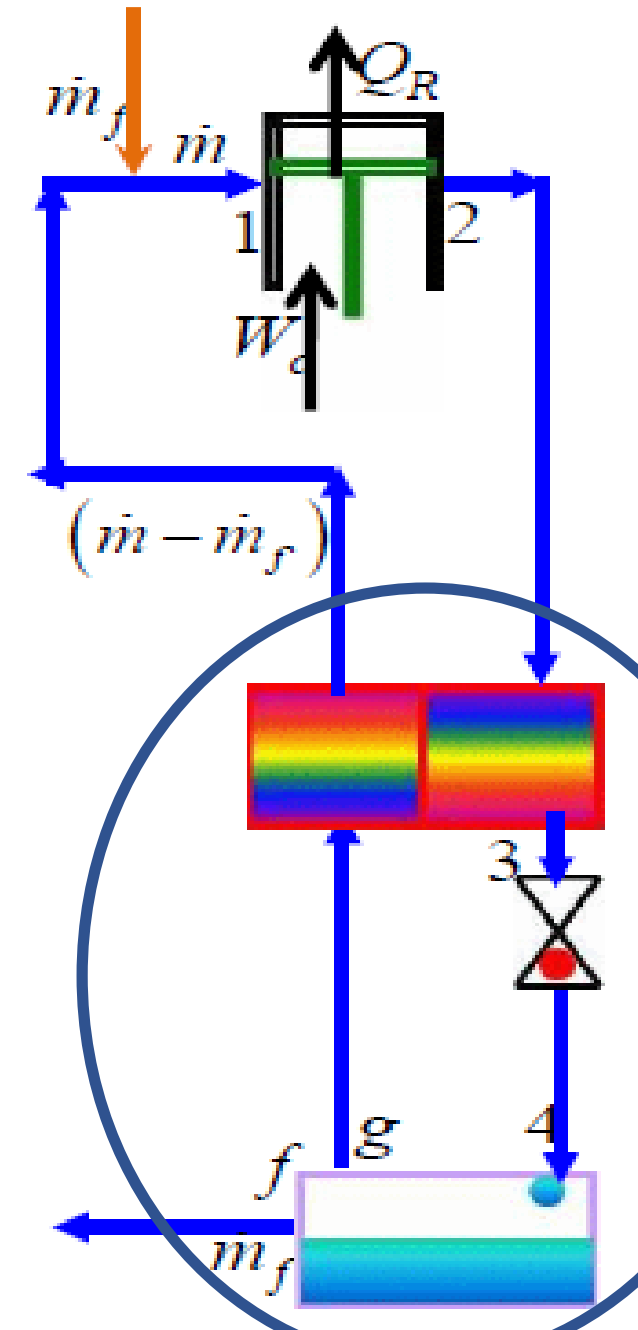
IN	OUT
$\dot{m}$ pt 2	$(\dot{m} - \dot{m}_f)$ pt 1
	$\dot{m}_f$ pt f

Le 1er Principe donne lieu :

$$E_{in} = E_{out}$$

$$\dot{m}h_2 = (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 + \dot{m}_f h_f$$

Gaz ajouté





CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

2.3 Cycle de Linde –Hampson

Réorganisons les termes .

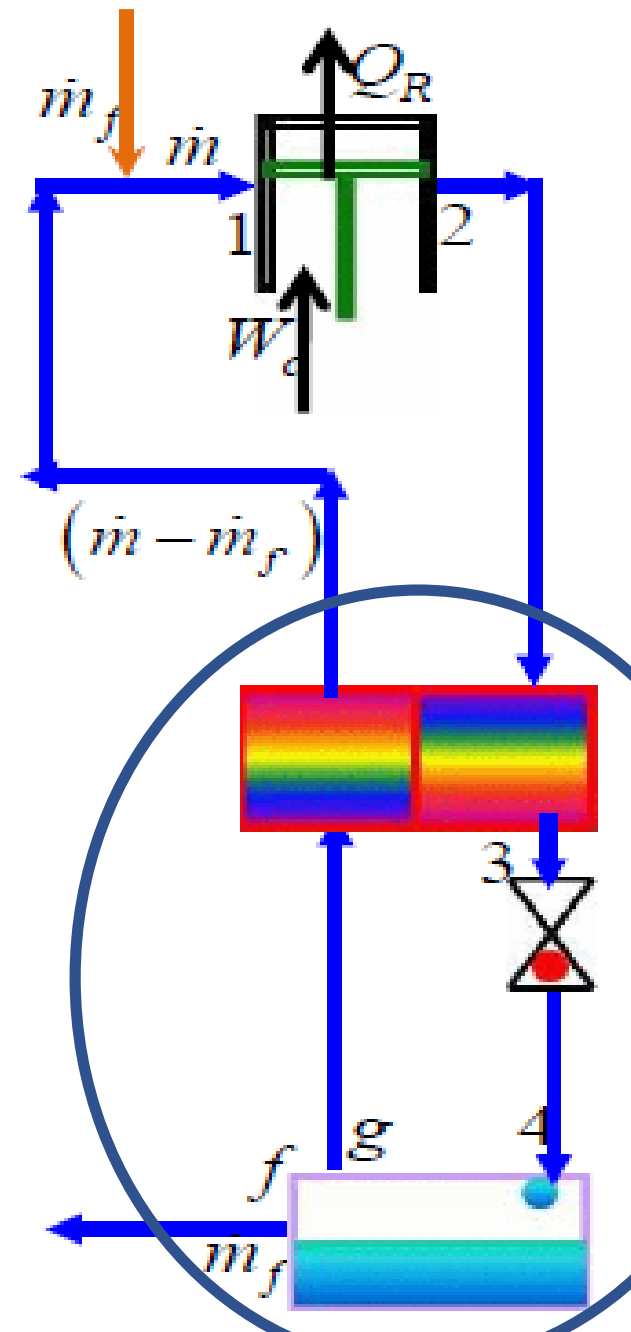
$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \left( \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right)$$

La fraction du gaz liquéfié est donnée par :

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = y = \left( \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right)$$

y dépend des conditions initiales et de la pression de compression.

Gaz ajouté



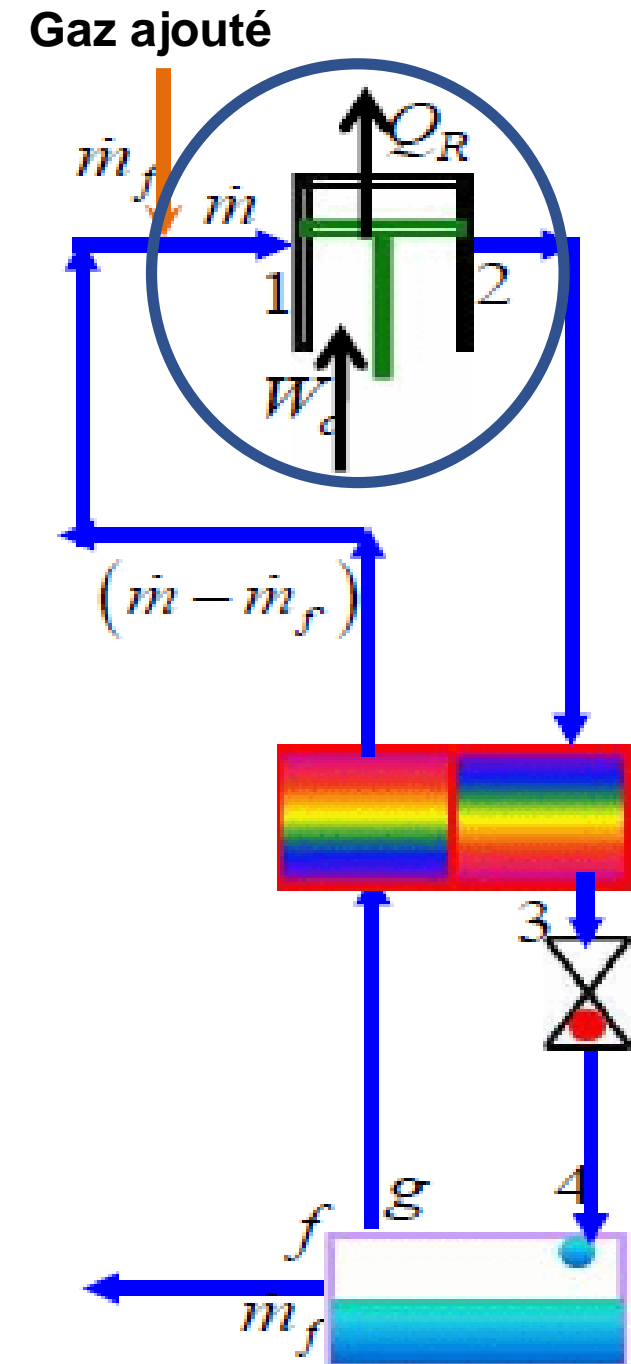
CHAPITRE 2 : PROCÉDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

### 2.3 Cycle de Linde –Hampson

Le travail nécessaire pour un cycle de Linde- Hampson peut être calculé en considérant un volume de contrôle entourant le compresseur.

Les quantités entrant et sortant de ce volume de contrôle sont indiquées ci-dessous.

IN	OUT
$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$
$-W_c$	$-Q_R$



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

2.3 Cycle de Linde –Hampson

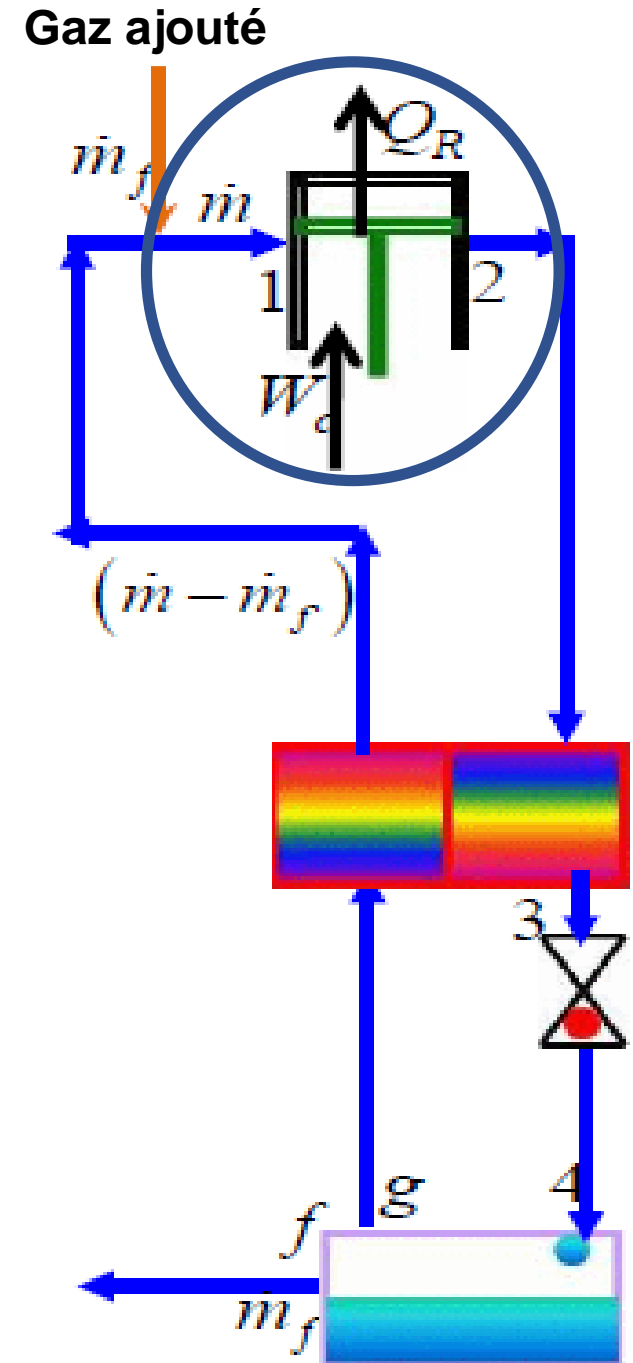
IN	OUT
$m_1$	$m_2$
$-W_c$	$-Q_R$

Le 1er principe de la thermo

$$E_{in} = E_{out}$$

$$mh_1 - W_c = mh_2 - Q_R$$

$$Q_R - W_c = m(h_2 - h_1)$$



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

2.3 Cycle de Linde –Hampson

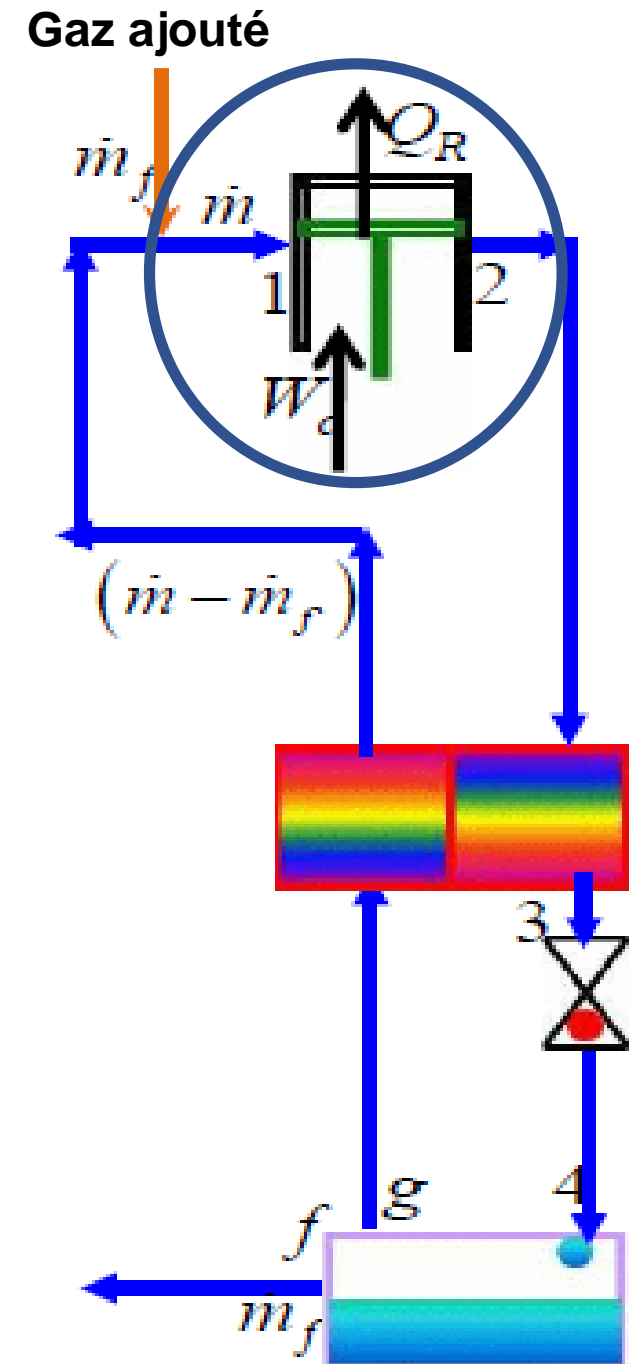
$$Q_R - W_c = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

L'expression de  $Q_R$  peut être obtenue en utilisant la 2eme loi de la thermo. pour une compression isotherme. Il est donné par,

$$Q_R = \dot{m}T_1(s_2 - s_1)$$

En combinant les équations ci-dessus, le travail requis pour une masse unitaire de gaz comprimé est

$$-\frac{W_c}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)$$



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

2.3 Cycle de Linde –Hampson

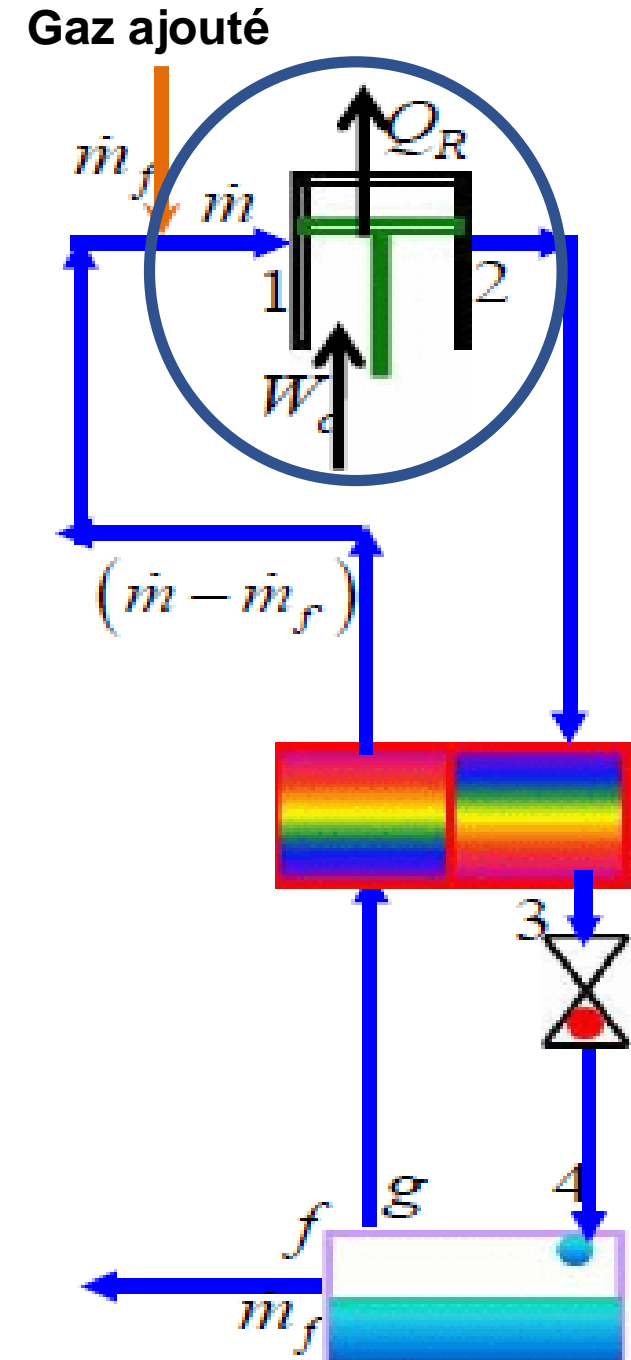
$$-\frac{W_c}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)$$

La fraction massique du liquide est :

$$y = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \left( \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right)$$

En tenant compte des deux dernières équations :

$$-\frac{W_c}{\dot{m}_f} = \frac{-\frac{W_c}{\dot{m}}}{y} = -\frac{W_c}{y\dot{m}}$$



CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

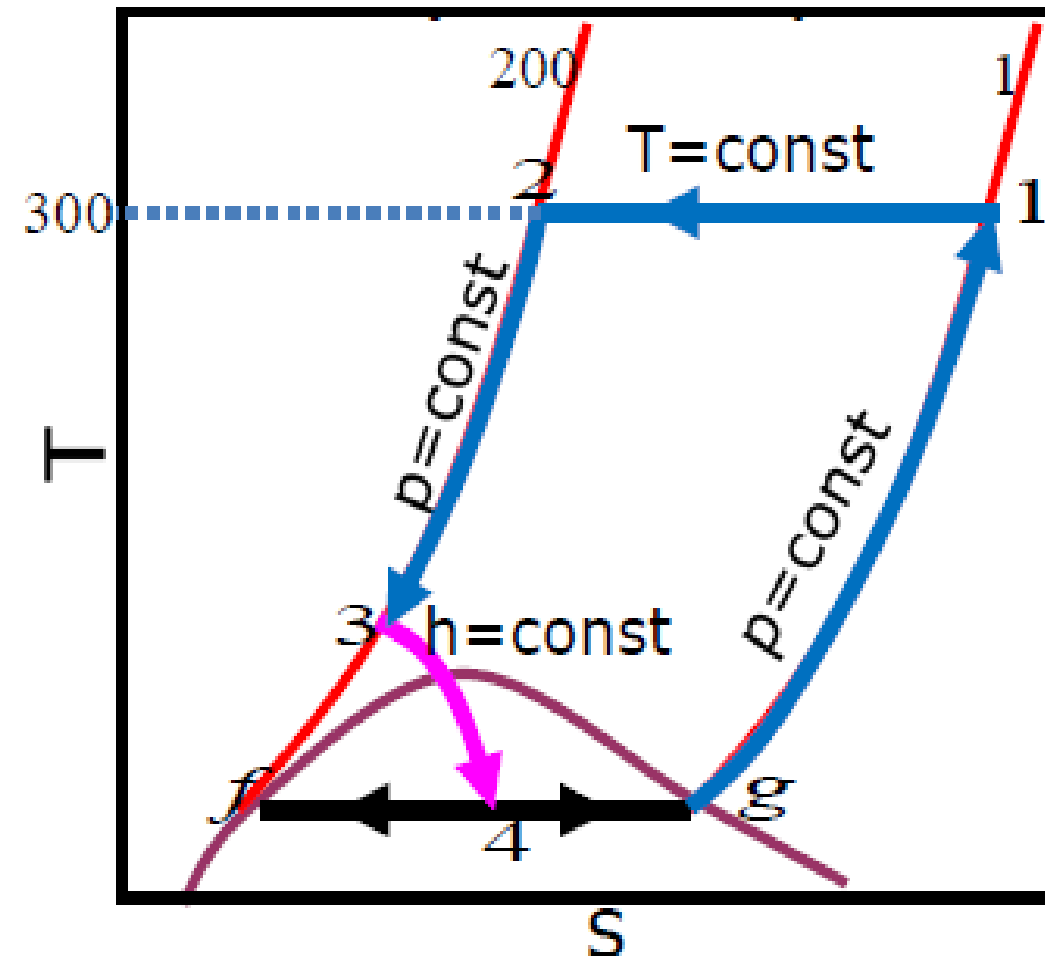
Exemple

Déterminer la fraction liquide, le travail  $W_c$  par unité de masse comprimé et travail  $W_c$  par unité de masse liquéfiée pour un cycle Linde-Hampson avec de l'air comme fluide de travail?

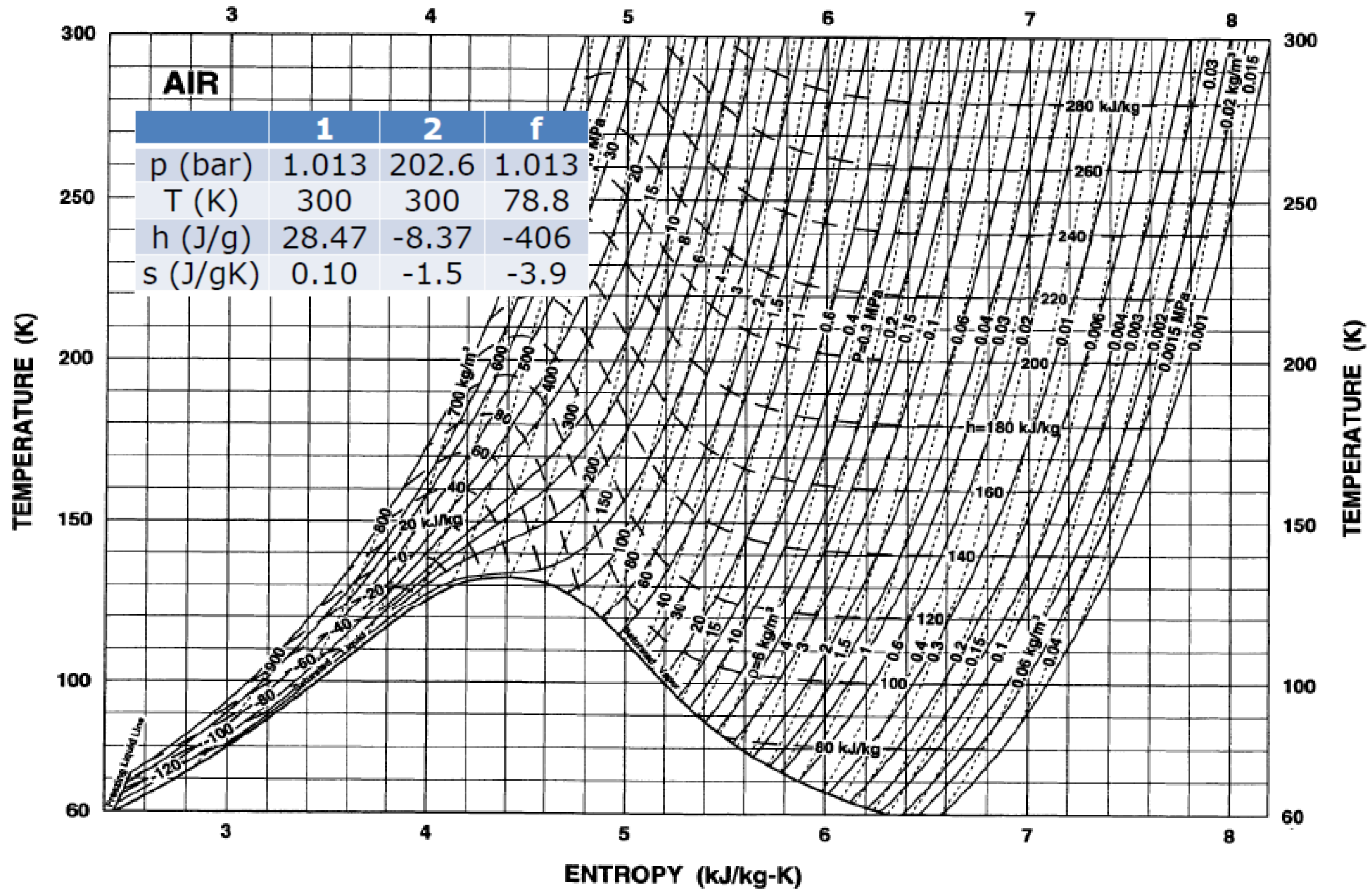
Le système fonctionne entre 1,013 bar (1 atm) et 202,6 bar (200 atm) à 300 K.

Étape 1

Le schéma T-s du cycle cycle Linde-Hampson est tel que montré ic- contre:



# ENTROPY (kJ/kg-K)



**AIR**

	1	2	f
p (bar)	1.013	202.6	1.013
T (K)	300	300	78.8
h (J/g)	28.47	-8.37	-406
s (J/gK)	0.10	-1.5	-3.9

Fig. 5.2 T-s diagram for air (T<sub>1</sub> = 60, 300 K)

CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ

$$y = \left( \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \right) = \left( \frac{28.47 + 8.37}{28.47 + 406} \right) = \left( \frac{36.84}{434.47} \right) = 0.085$$

$$-\frac{W_c}{\dot{m}} = 300(0.1 + 1.5) - (28.47 + 8.37) = 443.16 \text{ J / g}$$





**CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ**

$$\frac{W_c}{\dot{m}} = 443.16$$

$$y = 0.085$$

$$\frac{W_c}{\dot{m}_f} = \frac{W_c}{y\dot{m}} = \frac{443.16}{0.085} = 5213.64 \text{ J / g}$$