

**CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES**

**CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES  
(02 semaines)**

- 1.1 Détente Joule-Thomson, détente isentropique, processus échappement...
- 1.2 Notion de température d'inversion d'un gaz
- 1.3 Courbe d'inversion d'un gaz (diagramme (T, P))
- 1.4 Coefficient isenthalpique d'étranglement
- 1.5 Coefficient isentropique d'étranglement

**CHAPITRE 2 : PROCEDES DE LIQUEFACTION DES GAZ (04 semaines)**

- 2. 1 Généralités sur la liquéfaction des gaz 2.1.1 Importance et utilisation des gaz liquéfiés 2.1.2 Historique des expériences sur les gaz 2.2 Liquéfaction par détente Joule-Thomson 2.2.1 Procédé de Linde 2.2.2 Procédé de Linde avec refroidissement préalable du gaz de travail 2.2.3 Procédé de Linde à étranglement double

**CHAPITRE 3 CYCLES CRYOGENIQUES A DETENTE DES GAZ DANS LES DETENDEURS  
(02 semaines)**

- 3.1 Détente des gaz dans les détendeurs au niveau initial de température (à la sortie du compresseur)
- 3.2 Branchement du détendeur au niveau intermédiaire de température
- 3.3 Branchement du détendeur au niveau inférieur de température (sortie évaporateur)

**CHAPITRE 4 CYCLES CRYOGENIQUES COMBINES (02 semaines)**

- 4.1 Combinaison de la détente isenthalpique et de la détente isentropique sur un même procédé
- 4.2 Avantages du cycle combiné

## 1.1 Définition

**Cryogénie : (*Kruos (grec) = Froid,***

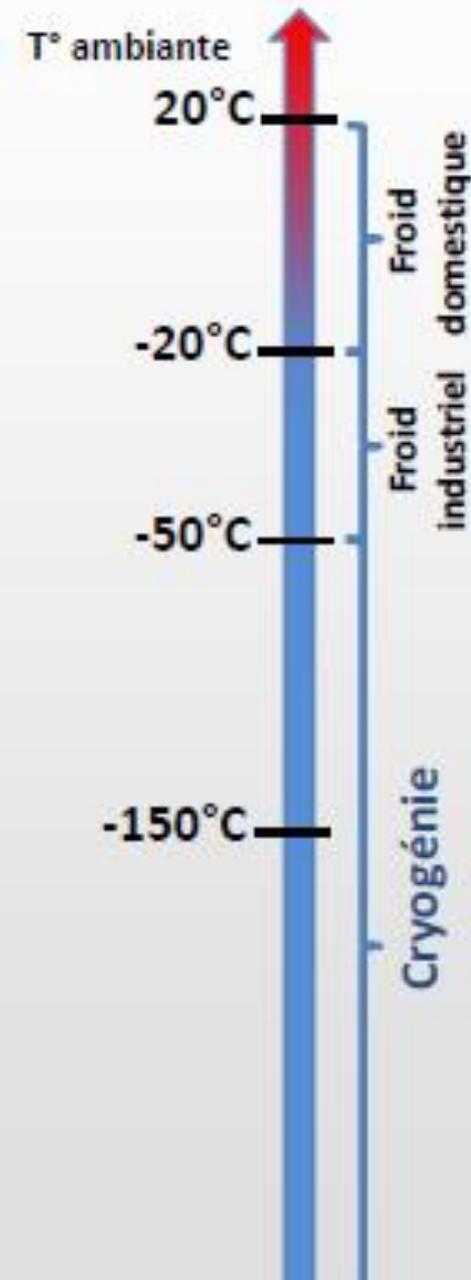
***Genesis (grec) = Engendrer, produire***

***Cette discipline s'intéresse à l'étude des très basses températures :***

**Comment les produire, les maintenir et les utiliser.**

**C'est une technologie associée à la production de très basses températures inférieures à 123 K.**

**$0K (-273^{\circ}C) < \text{Températures cryogéniques} < 120K (-150^{\circ}C)$**



## 1. 2. Applications

### 1. 2.1. Applications Spatiales

#### A. Propulsion des fusées

Les moteurs cryogéniques sont alimentés par des propulseurs cryogéniques.

- L'hydrogène liquide est utilisé comme carburant pour propulser la fusée.
- L'oxygène liquide est utilisé comme oxydant

#### B. Refroidissement des capteurs infrarouges (IR) Simulation spatiale

## Applications Médicales

La cryothérapie est une technique nouvelle dans laquelle les tissus nuisibles sont détruits en les congelant à une température cryogénique.

Cette technique permet un séjour hospitalier plus court, moins de perte de sang et un petit temps de récupération.

Il est généralement utilisé chez les patients atteints de cancer localisé de la prostate et du rein, des troubles de la peau. etc.



## Conservation des cellules (Cryochirurgie)

Les systèmes sont développés pour préserver les cellules sanguines, les cellules plasmatiques, les organes humains et les organes des animaux aux températures cryogéniques



## Conservation des aliments

Préserver les aliments à basse température est une technique bien connue.

Le refroidissement des aliments marins, de la viande, des produits laitiers pour une conservation prolongée est obtenu grâce à l'utilisation de LN<sub>2</sub>.



## Applications – Industrie du gaz

Le transport de gaz à travers le monde se fait à l'état liquide (Liquéfaction). Cela se fait en stockant le liquide à la température cryogénique.

L'utilisation de gaz inertes dans l'industrie du soudage a entraîné une demande accrue de production de gaz dans le passé récent.

Cryogènes comme LOX, LH2 sont utilisés dans la propulsion de fusée tandis que LH2 est considéré pour l'automobile

transport



Séparation



stockage



## Applications – Supraconductivité

RMN, IRM  
Maglev Locomotion  
Transformateur et générateurs

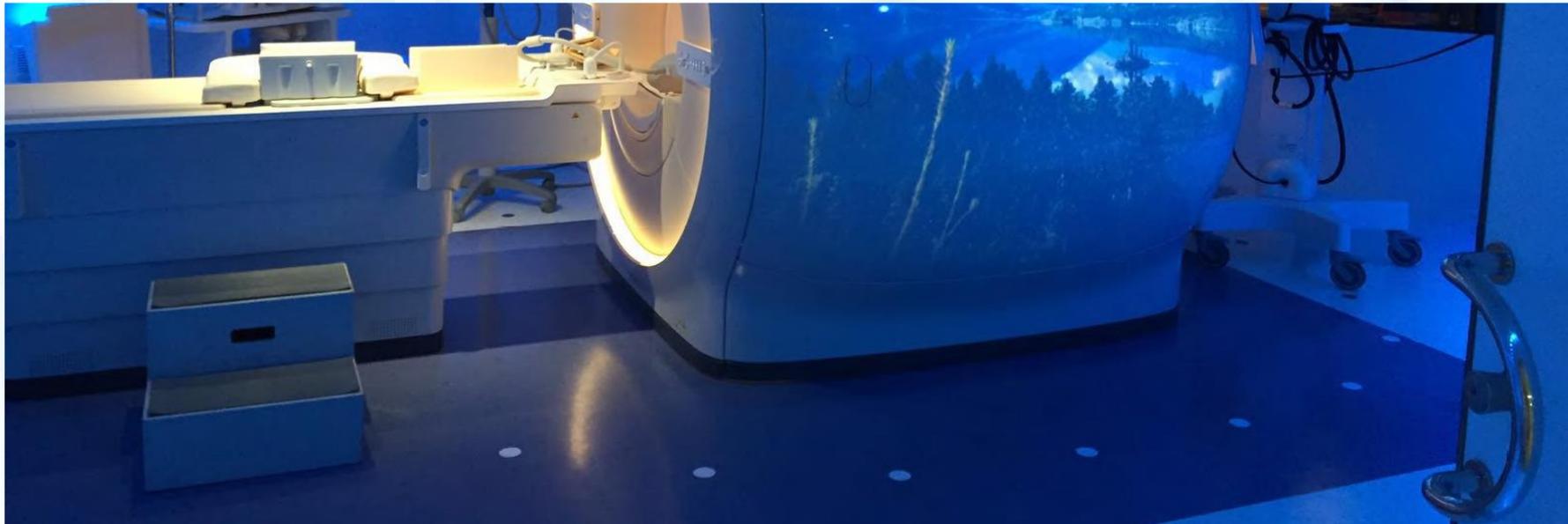
NMR (Nuclear Magnetic  
Resonance) est  
utilisé par l'industrie  
pharmaceutique pour  
étudier la structure moléculaire



**CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES**

**Les machines IRM (imagerie par résonance magnétique) sont utilisées pour la numérisation corporelle.**

**Les aimants du scanner RMN et IRM sont refroidis par l'hélium liquide.**



## **Applications – Recherche**

**Le CERN est une organisation européenne de recherche nucléaire fondée en 1954.**

**Il se compose d'un accélérateur de particules avec quatre détecteurs.**

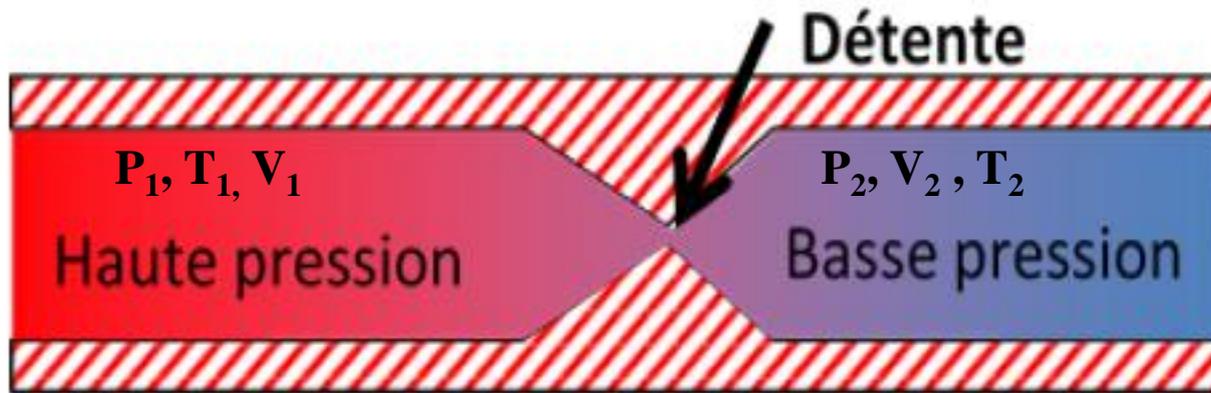
**Tous les systèmes magnétiques (SC) et ses accessoires sont conservés à 1,9 K à l'aide de l'hélium liquide.**

## 1.2 Détente Joule-Thomson

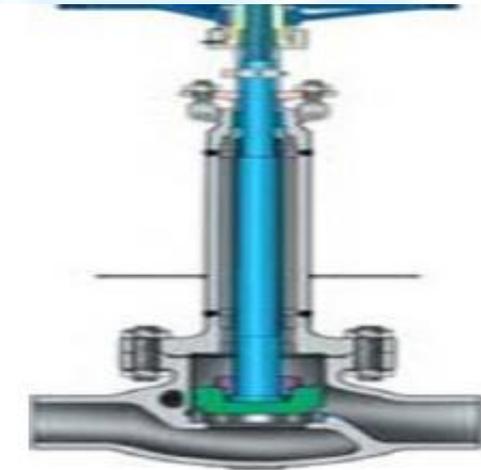
- L'effet Joule-Thomson,(Joule-Kelvin) est un phénomène lors duquel la température d'un gaz diminue lorsque ce gaz subit une expansion adiabatique
- L'expérience de Joule-Thomson (système ouvert, ou le régime permanent.)
- Un gaz subit une expansion adiabatique de  $(P_1, T_1, V_1)$
- La chute de pression est produite par la traversée d'une paroi poreuse.
- L'état de sortie du gaz est caractérisé par les  $P_2, V_2$  et  $T_2$ .



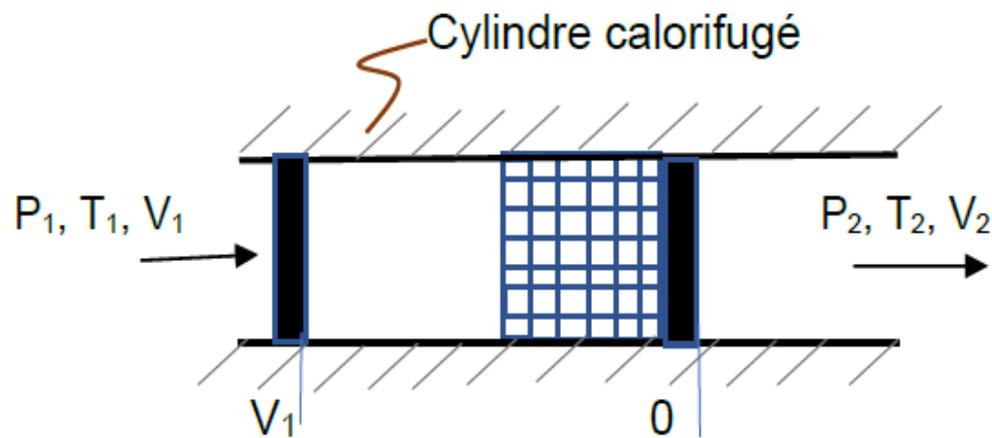
**CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES**



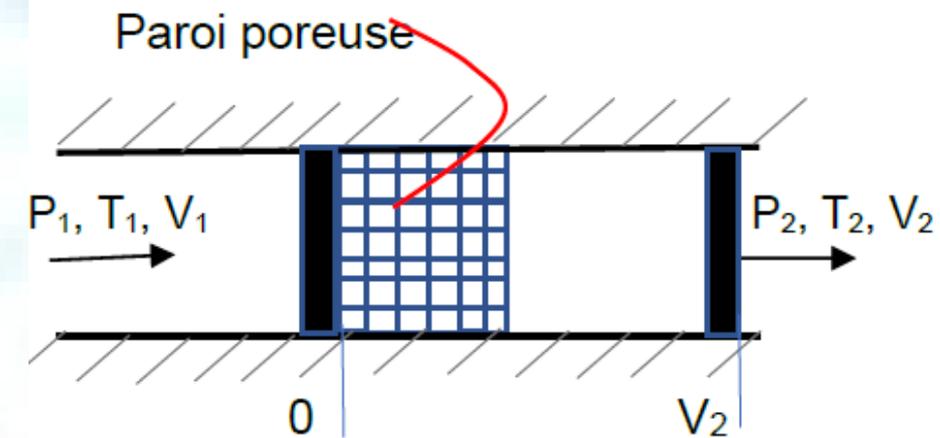
**Orifice de detente**



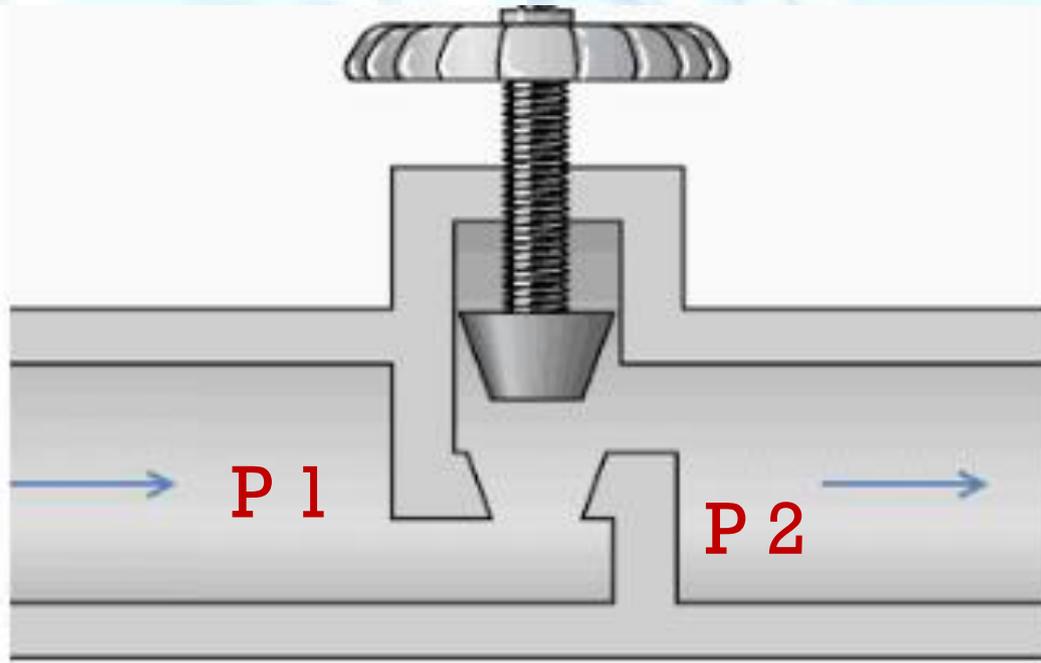
**Vanne à volant utilisé pour la detente**



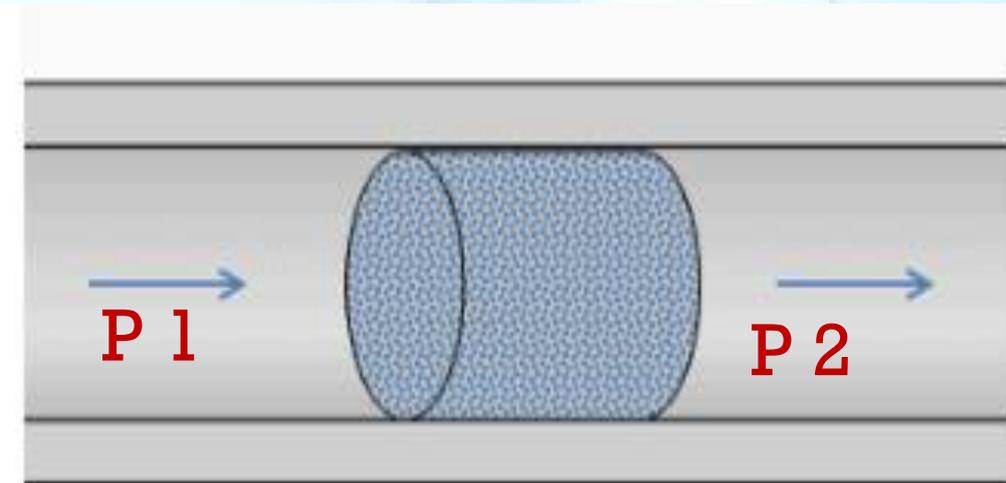
$$P_1 > P_2$$



CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES



partially open valve



porous plug

$$P_1 > P_2$$

- **Ecoulement stationnaire,**
- **Détente isentropique,**
- **Expansion adiabatique (vanne de détente calorifugé)  $Q=0$**

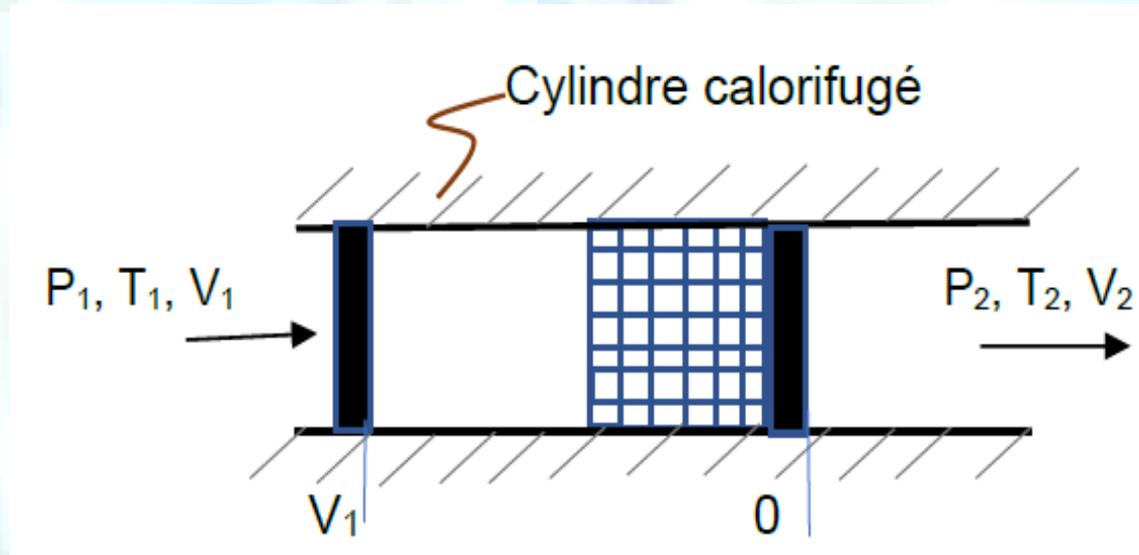
*L'Energie interne  $\Delta U = Q + W=0$*

**Nous avons deux travaux (compression  $P_1$  et détente  $P_2$ )**

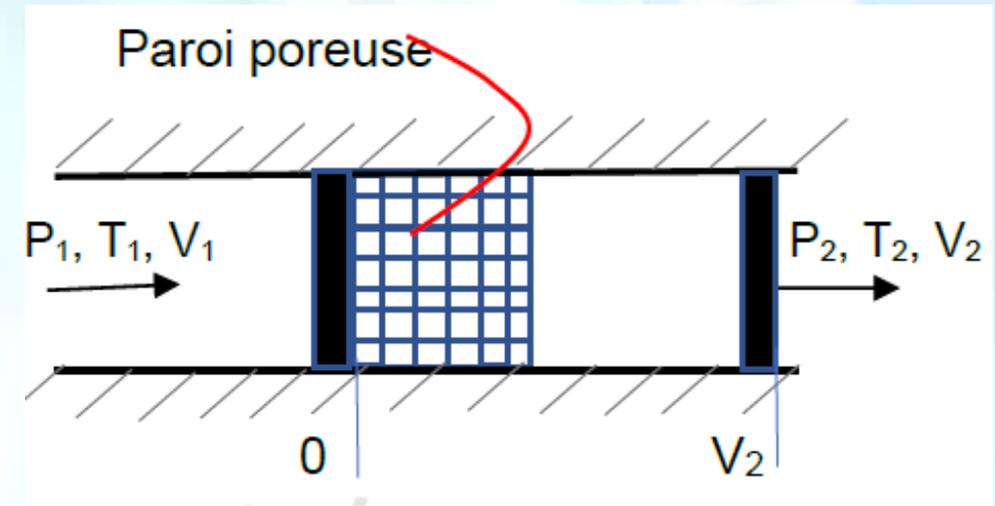
**Donc l'énergie devient**

$$\Delta U = W_1 + W_2 \quad \text{puisque } Q=0$$

**CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES**



**Avant expansion**



**Après expansion**

$$W_1 = - \int_{v_1}^0 P_1 dv = -P_1 \int_{v_1}^0 dv \Rightarrow W_1 = P_1 V_1 > 0$$

**Travail reçu**

$$W_2 = - \int_0^{v_2} P_2 dv = -P_2 \int_0^{v_2} dv \Rightarrow W_2 = -P_2 V_2 < 0$$

**Travail cédé**

CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES

$$\Delta U = P_1V_1 - P_2V_2 = U_2 - U_1 \Rightarrow U_2 + P_2V_2 = U_1 + P_1V_1$$

$H_2 \qquad H_1$

$$H_2 = H_1 \Rightarrow dH = 0 \Rightarrow H = cte$$

**Dans le cas d'un Gaz Parfait ,  
 l'énergie interne ne dépendant  
 que de la température , on en  
 déduit que la détente de Joule  
 Thomson d'un gaz parfait est  
 une détente « isotherme » :**

(EI)	$\xrightarrow{\text{DJT}}$ d'un gaz parfait	(EF)
$P_1$ $H_1$ $T_1$	$H_{GP} = H(T)$	$P_2 < P_1$ $H_2 = H_1$ $T_2 = T_1$

CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES

Dans le cas d'un Gaz Parfait , l'énergie interne ne dépendant que de la température , on en déduit que la détente de Joule Thomson d'un gaz parfait est une détente « isotherme » :

Expérimentalement , on mesure une légère variation de la température, qui correspond soit à un refroidissement , soit à un réchauffement en fonction des conditions initiales (P1 , T1)

(EI)	$\xrightarrow{\text{DJT}}$ d'un gaz parfait	(EF)
$P_1$ $H_1$ $T_1$	$H_{GP} = H(T)$	$P_2 < P_1$ $H_2 = H_1$ $T_2 = T_1$

(EI)	$\xrightarrow{\text{DJT}}$ d'un gaz réel	(EF)
$P_1$ $H_1$ $T_1$	$H = H(T, P)$	$P_2 < P_1$ $H_2$ $T_2 \neq T_1$ $ T_2 - T_1  \ll T_1$

## 1.2 Notion de température d'inversion d'un gaz

**Lorsqu'un gaz subit une expansion adiabatique, sa température peut**

**Soit augmenter**



**Soit diminuer**



**En fonction des conditions de température et de pression initiales**

**Pour une pression donnée, un gaz possède une température d'inversion de Joule-Thomson**

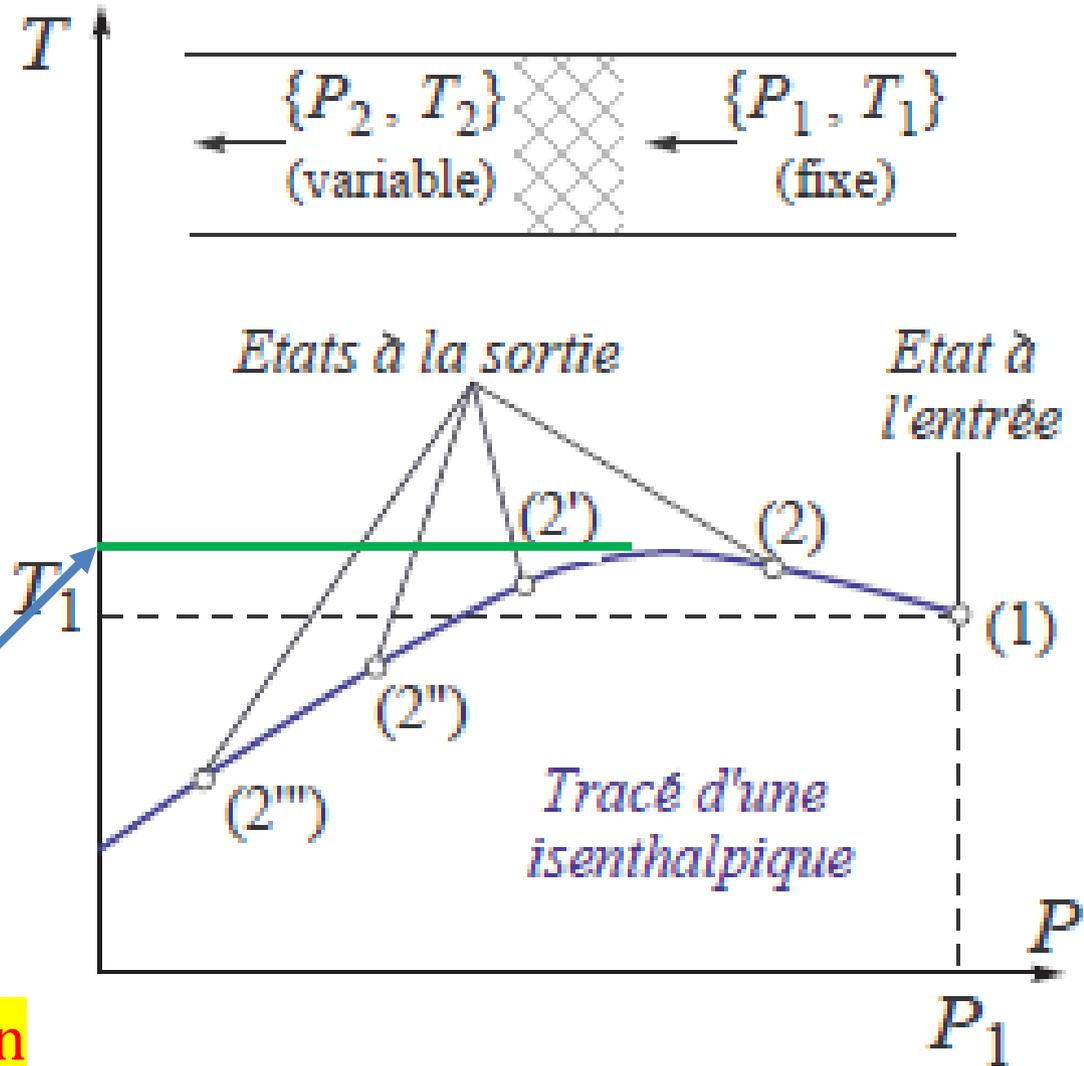
**Au-dessus de laquelle l'expansion fait augmenter la température**

**Et au-dessous de laquelle elle fait diminuer la température du gaz.**

## 1.2 Notion de température d'inversion d'un gaz

Pour savoir si la température d'un fluide augmente ou diminue à la suite d'une DJT, il faut tracer les courbes correspondant à une enthalpie ( $h=Cte$ ) constante dans le diagramme (T, P)

Température d'inversion



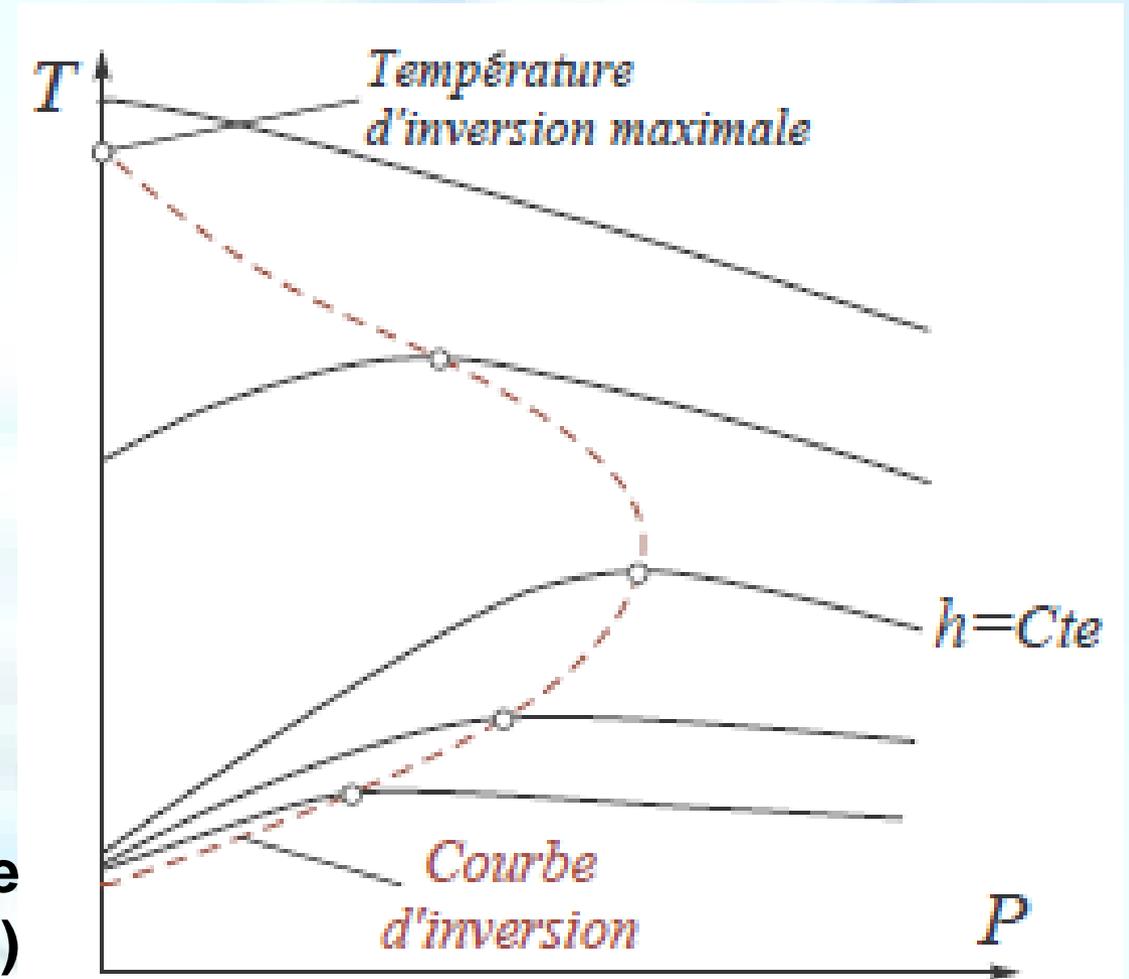
## 1.2 Notion de température d'inversion d'un gaz

Certaines des courbes isenthalpiques passent par un maximum, c'est à dire un point où la pente est nulle :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = 0.$$

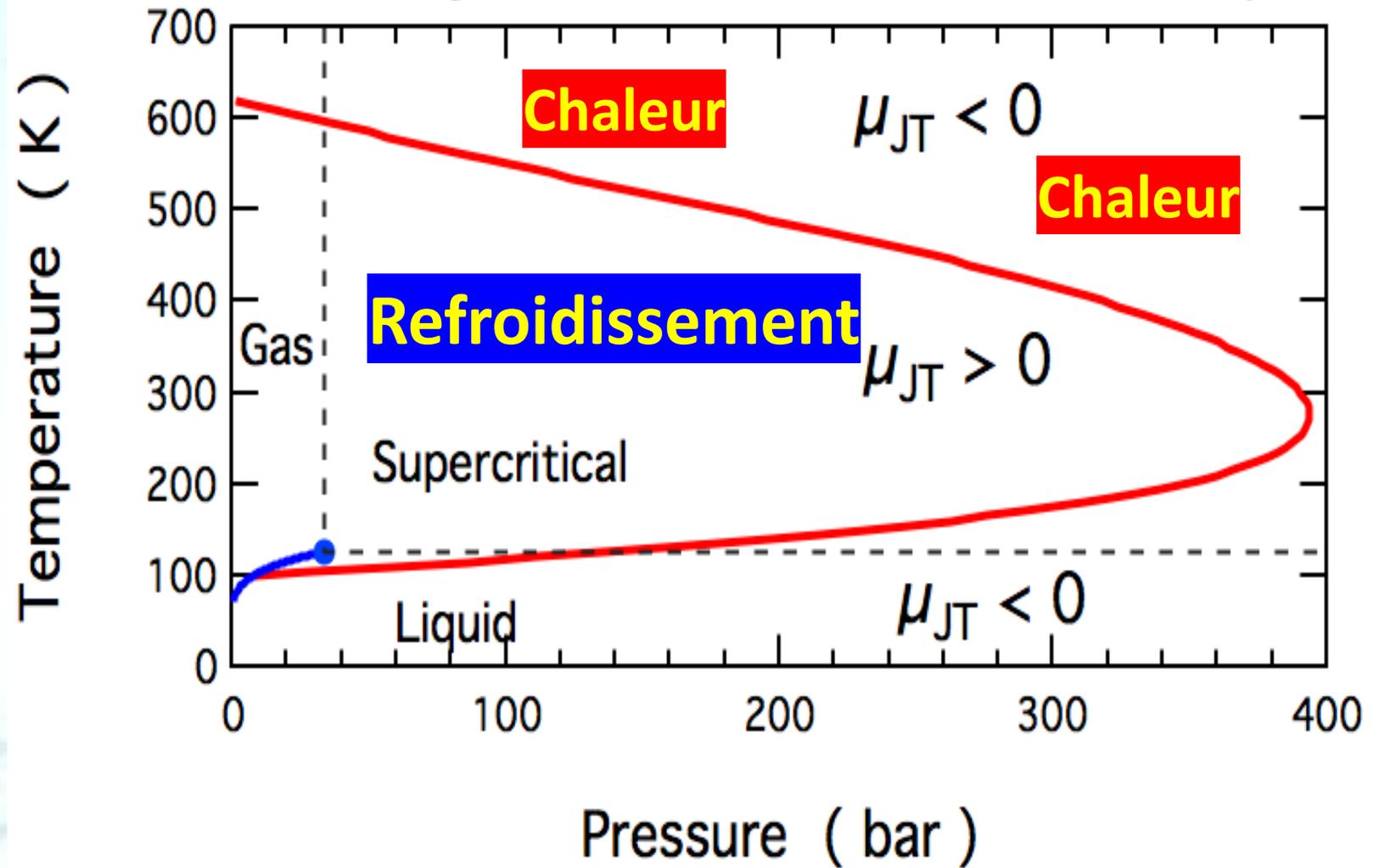
La courbe en pointillé qui relie ces points maximaux est appelée la « courbe d'inversion » » et la température en ces points, la « température d'inversion »

La température au point où la courbe d'inversion intercepte l'ordonnée  $P = 0$  ) est appelée la « température d'inversion maximale ».



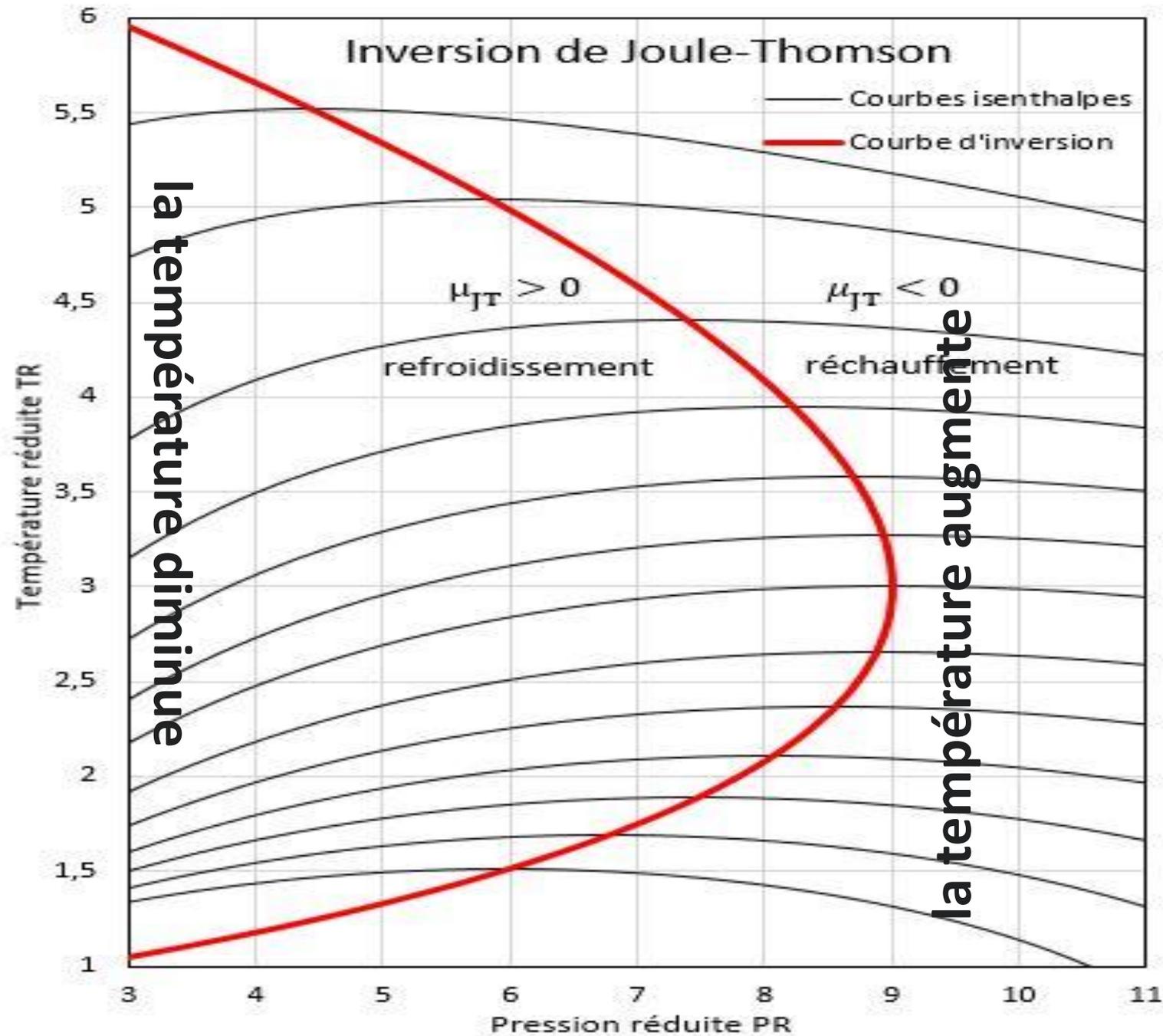
### 1.3 Courbe d'inversion d'un gaz (diagramme (T, P))

Signe du coefficient Joule–Thomson, pour N<sub>2</sub>

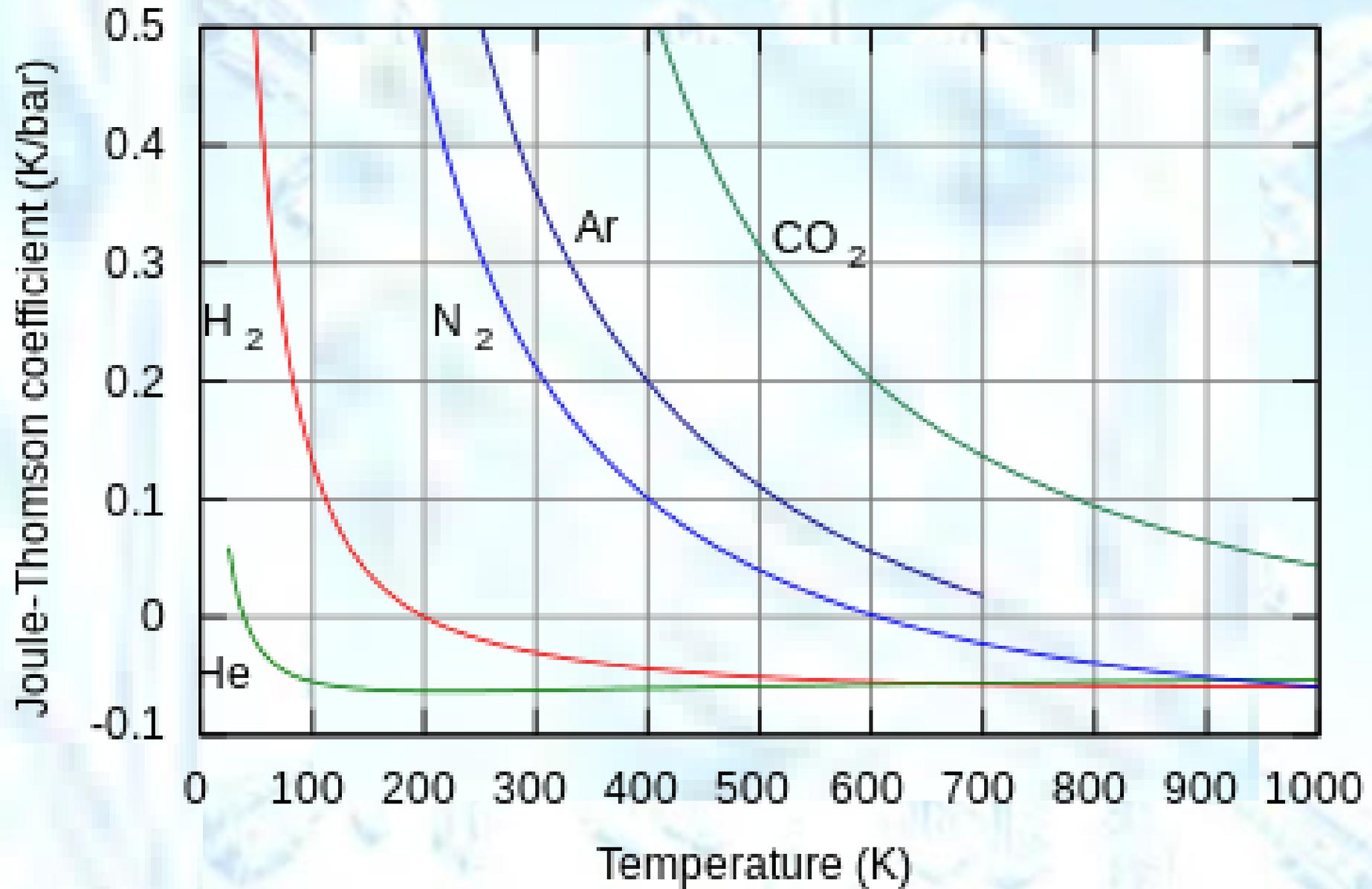


gaz-liquide

CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES



CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES



Coefficient de Joule-Thomson pour différents gaz à la pression atmosphérique.

## Coefficient de Joule Thompson

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$

On appelle la pente d'une courbe isenthalpique dans le diagramme (T, P) du fluide considéré.

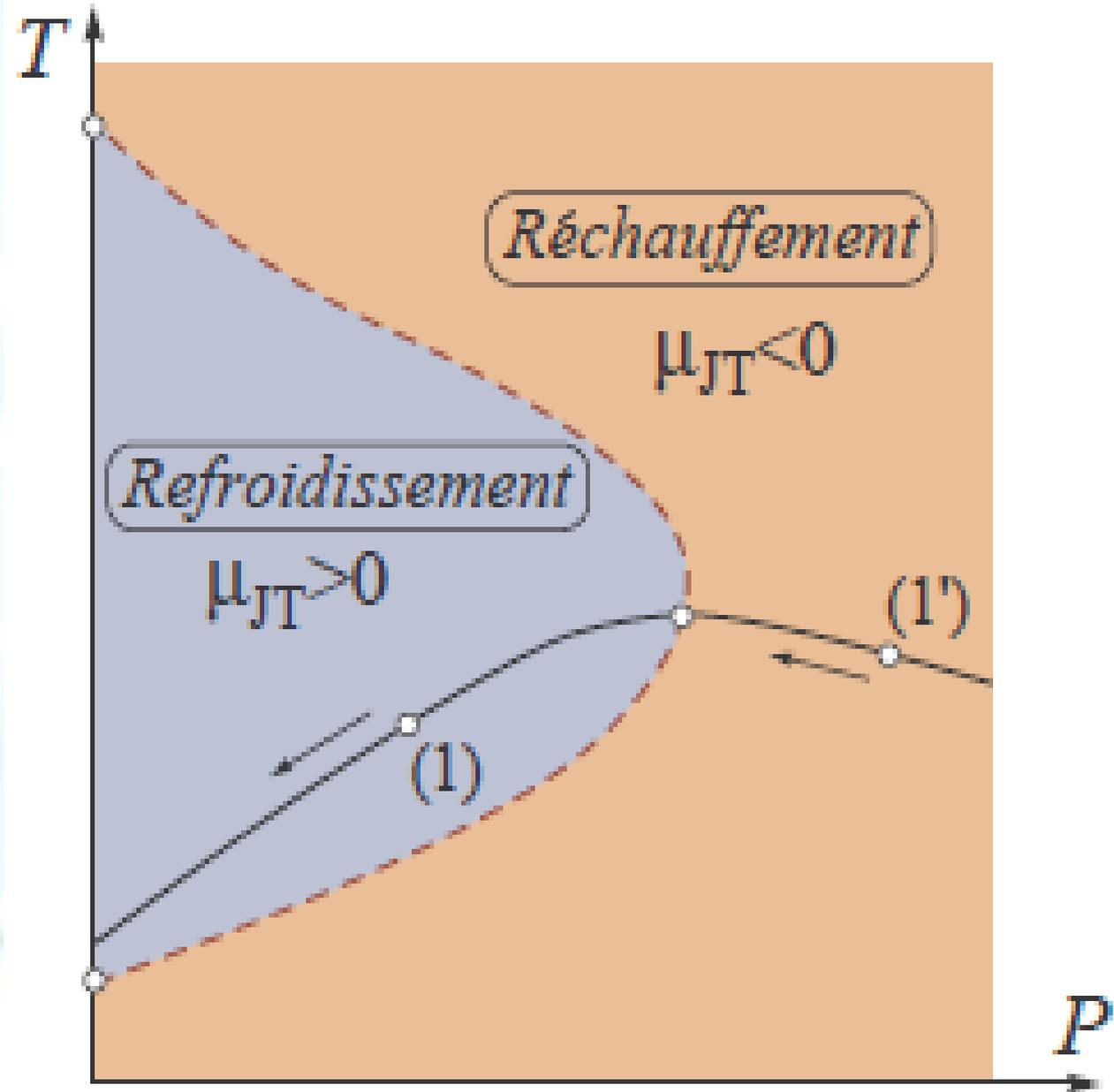
- Il mesure la variation élémentaire dT de la température que provoque une variation élémentaire dP de la pression pendant une détente élémentaire isenthalpique du fluide:
- Ainsi, pour une DJT élémentaire, lorsque:

$$\mu_{JT} \begin{cases} < 0 & : \text{la température du fluide croît} \\ = 0 & : \text{la température du fluide est constante} \\ > 0 & : \text{la température du fluide décroît} \end{cases}$$

On remarque que le coefficient de Joule Thompson (la pente d'une courbe isenthalpique) est négatif à droite de la courbe d'inversion  $\mu_{JT} < 0$  et positif à gauche  $\mu_{JT} > 0$

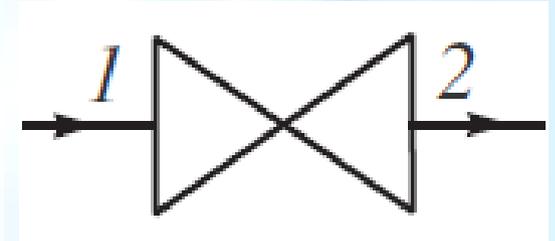
D'un point de vue pratique, puisqu'il est impossible de mesurer des changements infinitésimaux de températures et de pression, il est plus pratique de travailler avec des variations finies  $\Delta T$  et  $\Delta P$

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \approx \left( \frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_H$$



## Applications de la détente de JT

La détente de Joule Thomson est une détente isenthalpique d'un fluide quelconque, elle permet de produire une diminution de pression ou de température. Les organes associés sont appelés des détendeurs.



## Détendeur

On appelle « détendeur » les éléments qui produisent un effet Joule Thomson (détente isenthalpique d'un fluide). De tels détendeurs

Détendeur des bouteille de gaz comprimés Les gaz que l'on utilise sont souvent comprimés pour limiter le Volume de stockage . Par exemple une bouteille de butane pour l'usage domestique ou d'air pour la plongée. Dans les deux cas, le détendeur permet de ramener la pression du gaz à la pression ambiante



- Détendeur des réfrigérateurs et climatiseurs
- On utilise un détendeur pour assurer la chute de température et de pression nécessaire, de manière à ce que le fluide frigorigène prenne un transfert thermique aux aliments du congélateur.



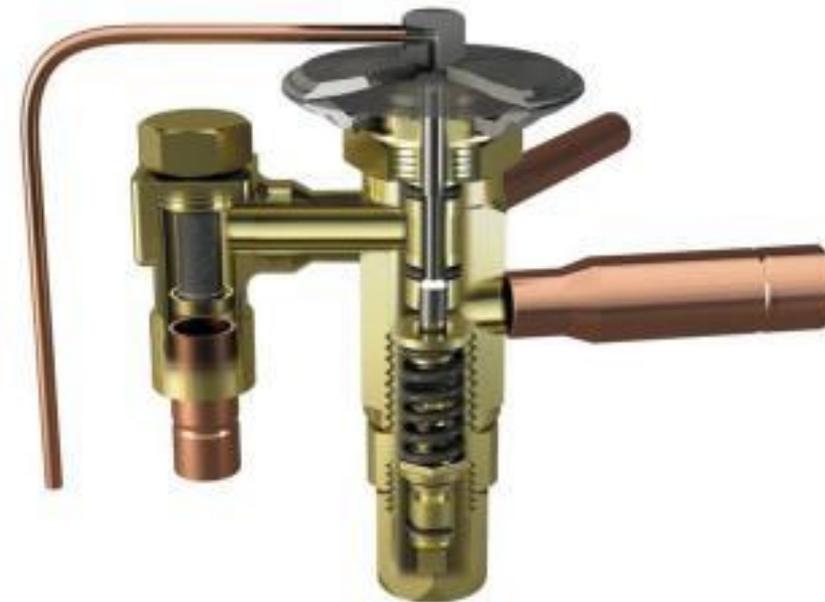
Détendeur thermostatique pour Climatiseur (fluide : R22 ou R 407c)

**CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES**

**Détendeurs bouteilles de gaz**



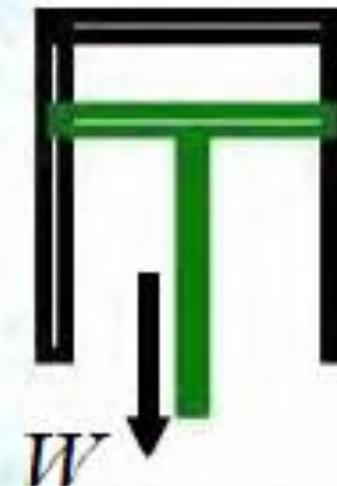
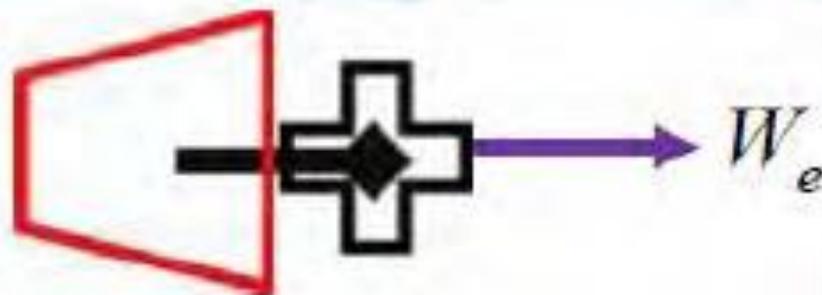
**Détendeurs thermostatiques**



## Détente isentropique

■ Les organes de détente isentropique couramment utilisés sont des turbines et moteur a pistons (alternatifs).

■ Il s'agit d'un processus de production de travail tel qu'indiqué dans les schémas.



■ Le terme  $\left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_s$  s'appelle le coefficient de détente isentropique

$$\mu_s = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_s$$

$$\mu_s = + \frac{T}{c_p} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

Pour un gaz idéal (parfait), l'équation d'état est

$$v = \frac{RT}{p}$$

La dérivation / T à P donne :

$$\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p} = \frac{v}{T}$$

Par substitution :

$$\mu_s = \frac{T}{c_p} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{T}{c_p} \left( \frac{v}{T} \right) = \frac{v}{c_p}$$

Pour un gaz idéal,  $\mu_s \neq 0$  contrairement au cas de la détente de J-T ( $\mu_{JT} = 0$ )  
Cela signifie que le gaz idéal se refroidi, lorsqu'il subit une détente isentropique.

CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX PROCESSUS D'OBTENTION DES BASSES TEMPERATURES

$$\mu_s = + \frac{T}{c_p} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

■ Le terme dérivé représente la variation du volume avec la température à pression constante.

$$\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

■ Ce terme est appelé **coefficient volumétrique** et est toujours **positif**. C'est donc le **coefficient de dilatation isentropique**.

■ Il est clair que la détente isentropique entraîne un refroidissement indépendamment de son état initial, contrairement à la détente J -T.

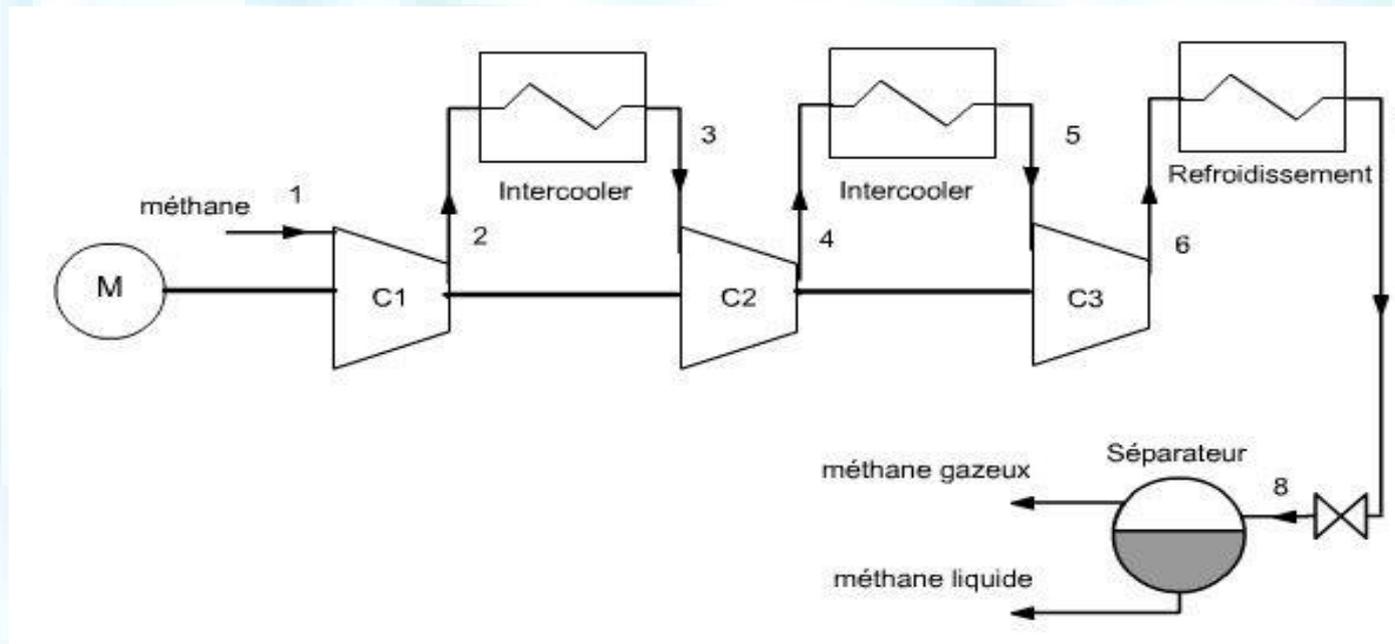
## Etude Comparative

Détente isenthalpique	Détente isentropique
Il existe une condition de $T_{INV}$ .	Il n'existe aucune condition
Il ne produit aucun travail. Il s'agit d'un processus <b>avec travail interne</b> .	Il produit du travail. C'est un processus <b>avec travail externe</b> .
Le dispositif est simple en construction.	Le dispositif comporte des mécanismes complexes.
Normalement utilisé pour un changement de phase des fluides.	Normalement utilisé pour les fluides monophasés.
Le bouchage de la construction est un inconvénient.	Une maintenance régulière et des vérifications périodiques sont nécessaires.

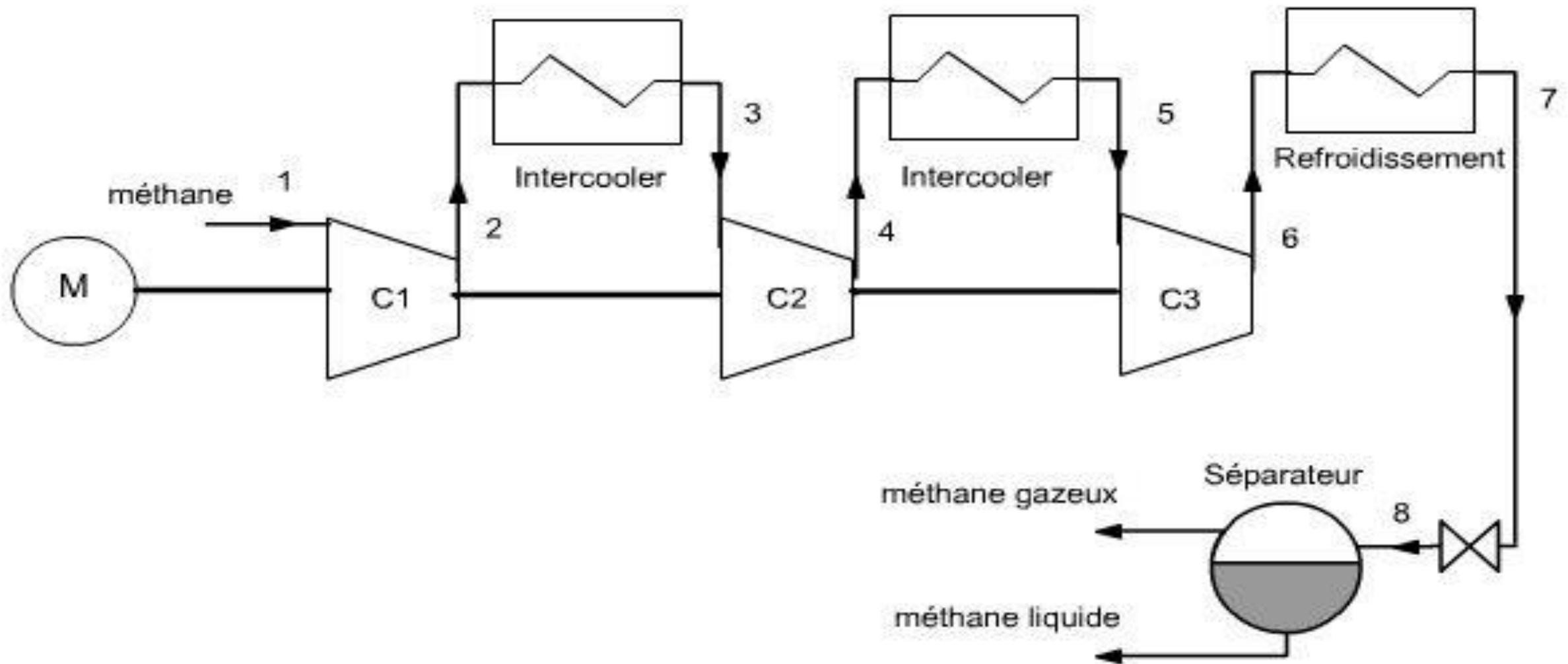
## Exemple d'utilisation de la détente de Joule Thomson

### Liquéfaction du gaz naturel ( méthane CH<sub>4</sub>)

Pour liquéfier du gaz naturel, on comprime à 100 bars du méthane pris à 1 bar et 280 K, puis on le refroidit jusqu'à 210K



<https://direns.mine-paristech.fr/Sites/Thoip/fr/co/cryogenie.html>

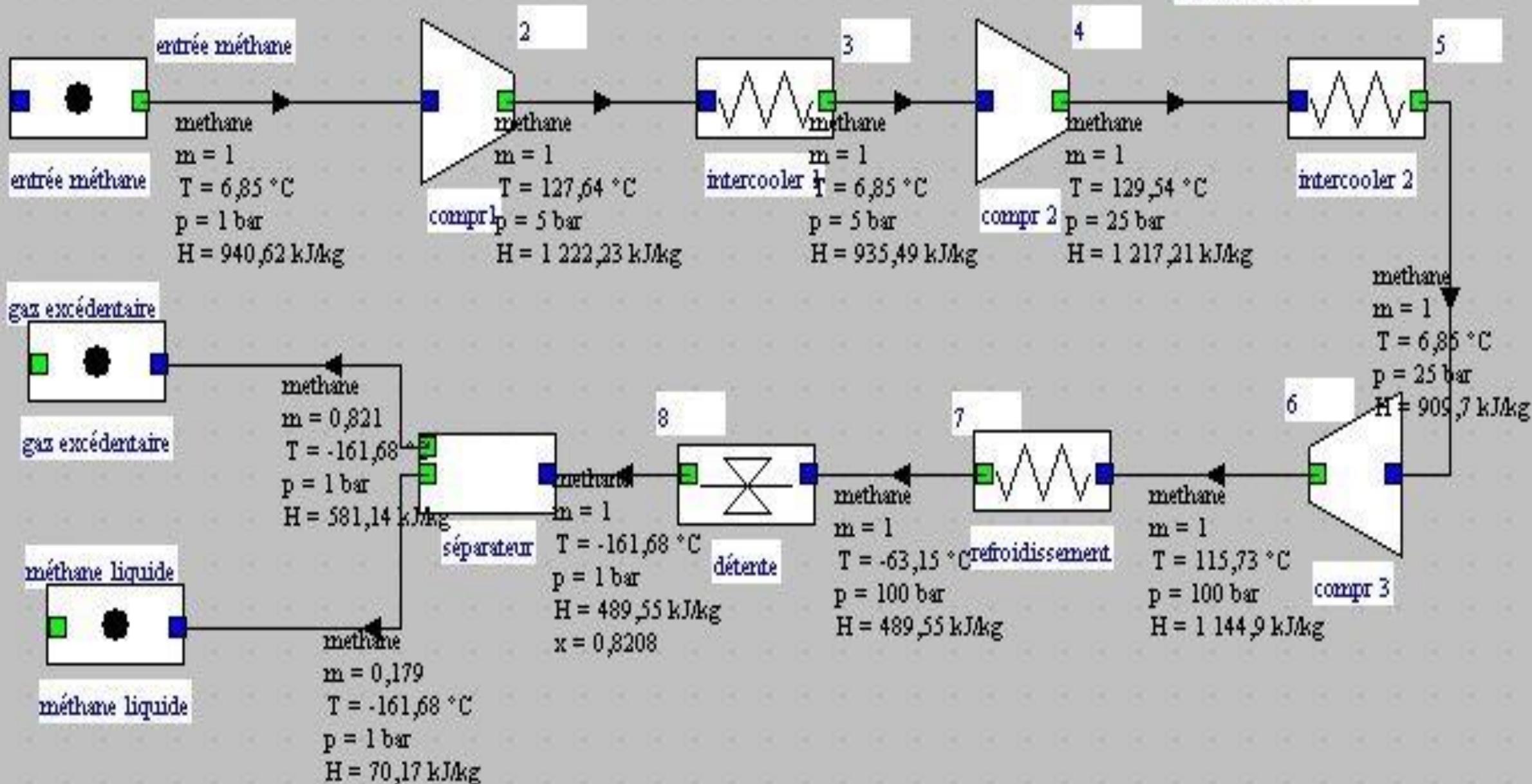


**La compression est supposée isentropique, mais le rapport de compression très élevé nécessite le recours à plusieurs compresseurs (3 dans cet exemple) avec refroidissement intermédiaire à 280 K. Les pressions intermédiaires sont égales à 5 et 25 bars. Le gaz refroidi à 210 K est détendu isenthalpiquement de 100 bars à 1 bar, et ses phases liquide et gazeuse séparées. Comme le montre le schéma de l'installation de la figure ci-dessous, le méthane entre dans la partie supérieure gauche, et les fractions liquide et gazeuse sortent en bas à droite.**

# Cycle de liquéfaction simple

## Installation de liquéfaction du méthane

Bilan  
 puissance utile : 799  
 puissance payante : 0  
 efficacité : 0



Définition

Application

Détente Joule -Thomson

Température d'inversion d'un gaz

## Cycle de Linde

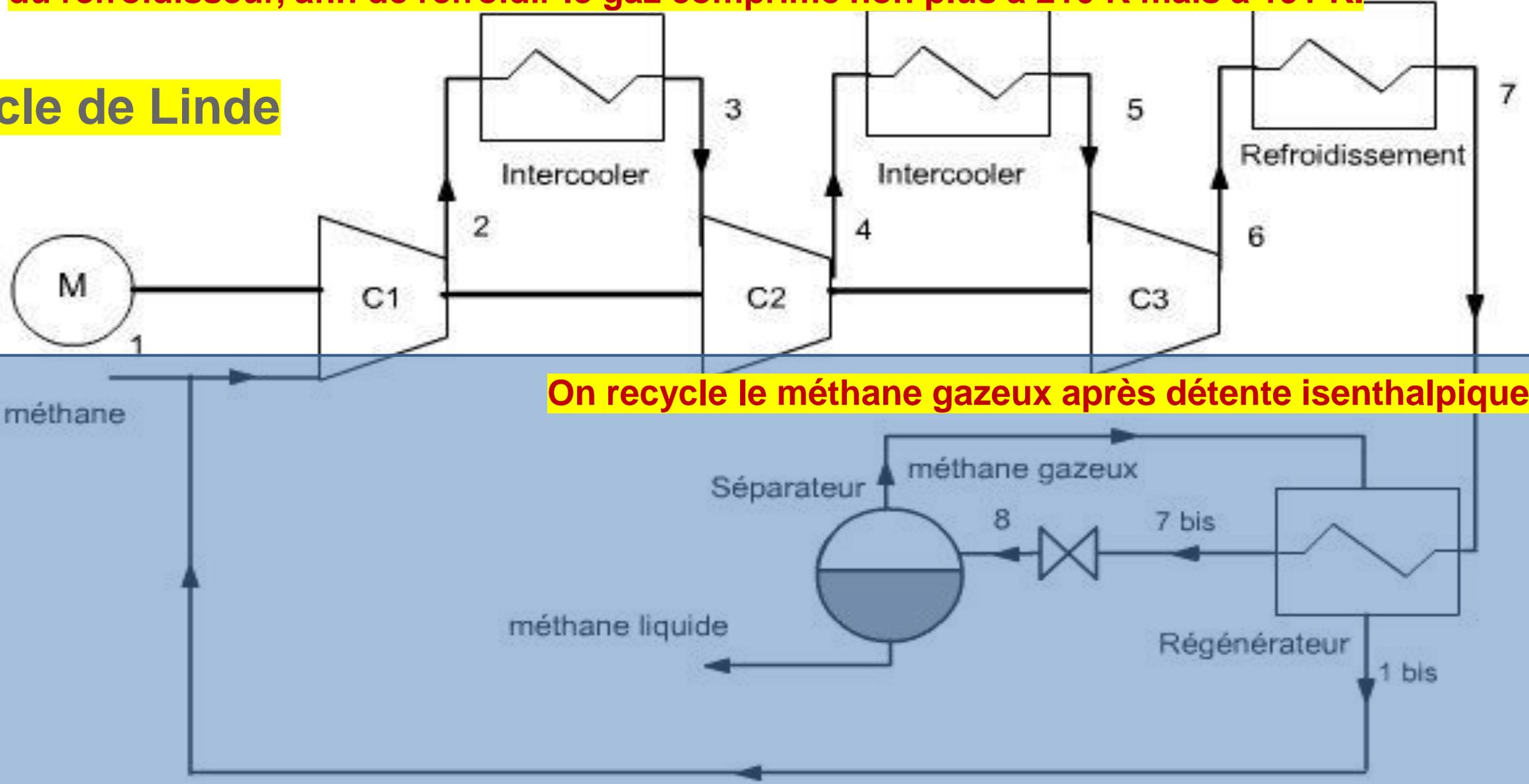
Dans un cycle de Linde on améliore le cycle précédent sur deux points :

On recycle le méthane gazeux après détente isenthalpique

On introduit un échangeur de chaleur entre ce méthane gazeux et le méthane sortant du refroidisseur, afin de refroidir le gaz comprimé non plus à 210 K mais à 191 K.

On introduit un échangeur de chaleur entre ce méthane gazeux et le méthane sortant du refroidisseur, afin de refroidir le gaz comprimé non plus à 210 K mais à 191 K.

## Cycle de Linde



Pour ces nouvelles conditions le travail de compression par kilogramme de méthane liquéfié devient égal à 1,91 MJ, soit simplement 43 % du précédent.

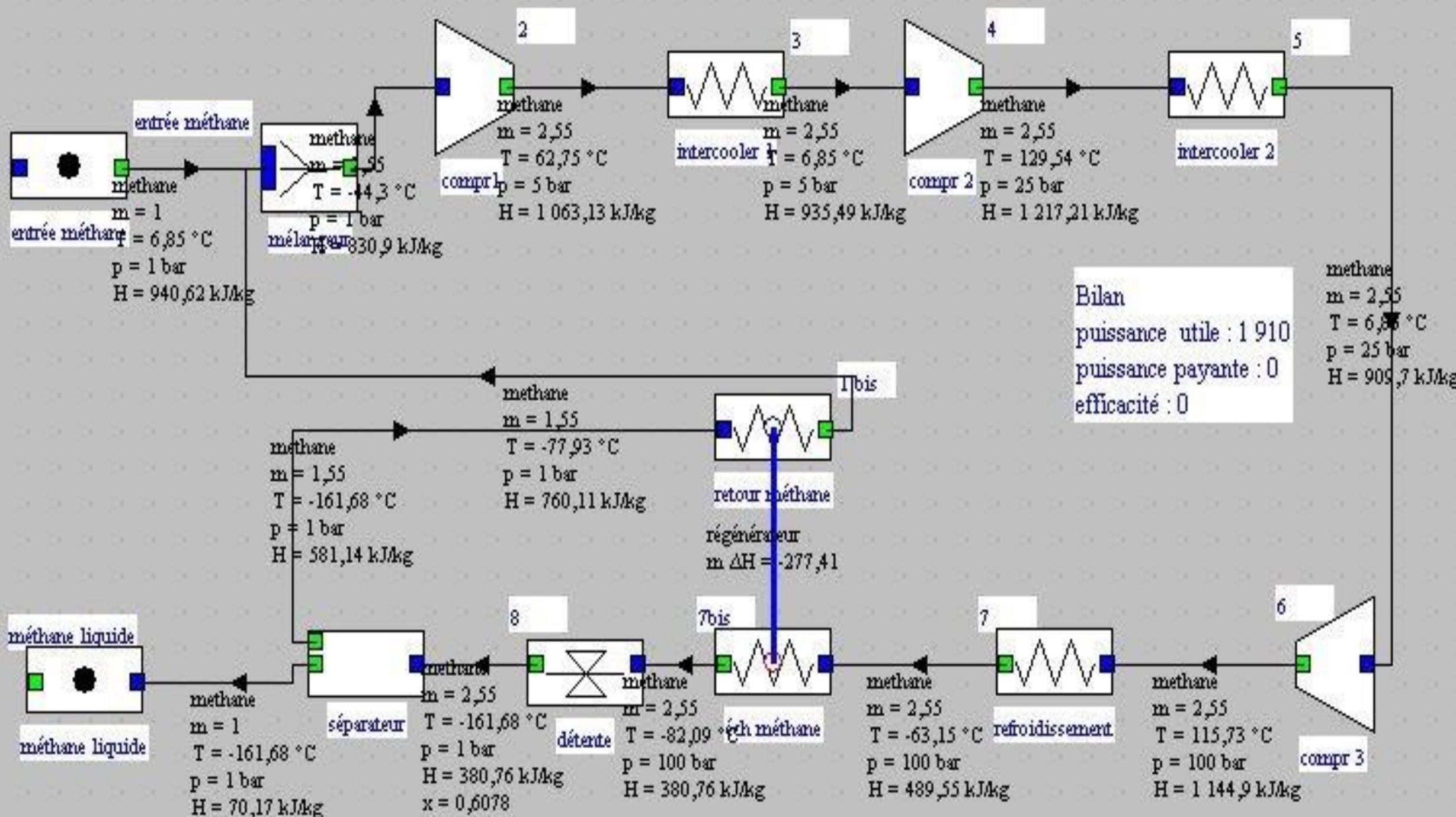
Définition

Application

Détente Joule -Thomson

Température d'inversion d'un gaz

# Installation de liquéfaction du méthane (cycle de Linde)



Définition

Application

Détente Joule -Thomson

Température d'inversion d'un gaz