

THERMODYNAMIQUE

I. Étude d'un compresseur à CO₂

Pour limiter les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, une des solutions consiste à capter directement le CO₂ à la sortie de l'usine et lui faire subir une suite de compressions successives. On le stocke à 800 m sous terre où le gaz est généralement en phase liquide ou supercritique. Une des possibilités pour comprimer le CO₂ est d'utiliser un compresseur à pistons.

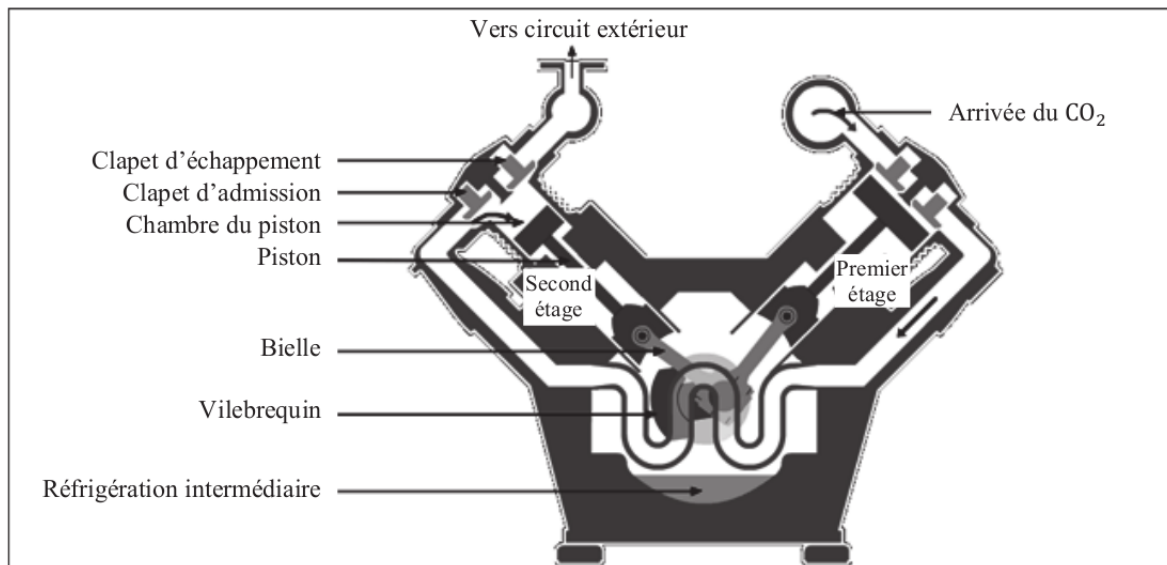


Schéma d'un compresseur multi-étages à double effet à pistons.

Un compresseur est un système actionné par un moteur et destiné à augmenter la pression d'un fluide. Dans un compresseur à pistons, chaque piston est animé d'un mouvement alternatif dans un cylindre au moyen d'une bielle et d'un vilebrequin. Lors de l'aller, le piston aspire le fluide à une certaine pression puis le comprime de façon adiabatique. Pour cela, chaque piston est muni d'une entrée et d'une sortie à clapet anti-retour.

Ces clapets autorisent le passage du CO₂ dans un seul sens :

- le clapet d'admission ne peut laisser passer le fluide que vers la chambre du piston : il est fermé lorsque la pression P dans la chambre (supposée uniforme à l'intérieur de la chambre) est supérieure à la pression d'entrée en amont (supposée uniforme et constamment égale à P_e) ;
- à l'inverse, le clapet d'échappement ne peut laisser passer le fluide que vers le circuit extérieur : il ne s'ouvre que lorsque la pression P à l'intérieur de la chambre du piston devient supérieure à la pression de sortie notée P_s .

Les approximations retenues pour cette étude sont volontairement simplificatrices :

- durant tout l'étude, le CO₂ est assimilé à un gaz parfait ;
- le CO₂ subit des transformations qui sont supposées mécaniquement quasi-statiques ;
- la température du CO₂ dans la chambre en fin d'aspiration est supposée connue et notée T_B ; de même les pressions P_e et P_s sont supposées connues ;
- les chambres de chaque piston sont supposées parfaitement calorifugées.

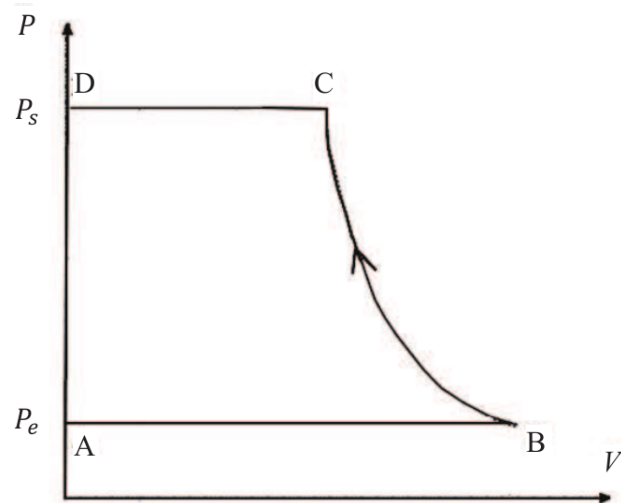
On note γ le coefficient adiabatique du CO₂, c_p sa capacité thermique massique à pression constante et c_v sa capacité thermique massique à volume constant.

I.1. Effet d'un unique piston

Dans un premier temps, on ne s'intéresse qu'à un seul des pistons du compresseur. Les frottements du piston sur le cylindre sont négligés. On suppose la pression de sortie P_s constante. On donne l'allure du cycle du compresseur dans le diagramme (P, V) ci-contre, qui représente l'évolution de la pression P d'une masse de gaz dans la chambre en fonction de son volume V au cours de sa traversée depuis l'entrée jusqu'à la sortie ^a.

1. On considère les 3 étapes de la transformation : $A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$, $C \rightarrow D$. Préciser pour chaque étape la position de chaque clapet ainsi que le mouvement du piston.

^a. Il ne s'agit pas d'un cycle proprement dit pour le système gaz car celui-ci termine dans un état D différent de l'état initial A . C'est le mécanisme du compresseur qui effectue des cycles.



Cycle simplifié d'un piston.

Dans la suite on s'intéresse à l'évolution d'une masse m de CO_2 évoluant entre les états A et D .

2. Pour la transformation $A \rightarrow B$, exprimer tous les termes du premier principe en fonction des températures T_A et T_B et des constantes nécessaires : variation d'énergie interne $\Delta_{AB}U$, travail W_{AB} , et transfert thermique Q_{AB} . Exprimer de même la variation d'enthalpie $\Delta_{AB}H$. On négligera les variations des énergies potentielle et cinétique macroscopiques.

3. Montrer que

$$T_C = T_B \cdot x^{1-\frac{1}{\gamma}} \quad \text{avec} \quad x = \frac{P_s}{P_e}.$$

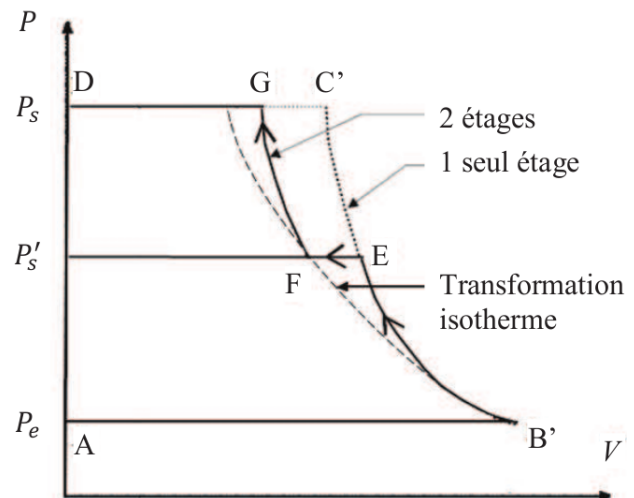
4. En déduire l'expression du travail W_{BC} reçu par le système au cours de cette transformation, en fonction de T_B , de x et des constantes nécessaires.
5. Comme dans la question 2., exprimer pour la transformation $C \rightarrow D$, tous les termes du premier principe et la variation d'enthalpie en fonction des températures T_C et T_D et des constantes nécessaires, puis en fonction T_A , T_B , x , et des constantes nécessaires.
6. Pour un fluide en écoulement dans un compresseur (plus généralement dans toute machine thermique), on peut montrer que le travail dit *utile* ou *indiqué* effectivement consommé par la machine pour la compression se réduit à la variation d'enthalpie ¹. En déduire le travail indiqué massique w_{iBC} pour la compression en fonction de T_B , de x et des constantes nécessaires.

1. Ceci est dû à l'action du fluide en amont et en aval, qui contribue au travail total.

I.2. Compresseur à deux étages

On s'intéresse dans un second temps aux deux pistons du compresseur multi-étage. Le piston de droite comprime une première fois le CO_2 qui est ensuite refroidi de manière isobare puis de nouveau comprimé par le piston de gauche. Le cycle du compresseur dans le diagramme (P, V) s'en trouve modifié comme représenté ci-contre.

L'accroissement du nombre d'étages avec refroidissement intermédiaire permet de se rapprocher d'une compression isotherme, représentée en pointillés sur la figure ci-contre.



- En s'appuyant sur la question 6., exprimer le travail indiqué massique total $w_{i \text{ tot}} = w_{i B'E} + w_{i FG}$ en fonction de la température $T_{B'}$, des rapports $\frac{P'_s}{P_e}$ et $\frac{P_s}{P'_s}$ et des constantes nécessaires.
- Montrer que ce travail indiqué est inférieur à celui que l'on trouverait dans un compresseur à un seul étage (un seul piston) pour un même taux global de compression $x = \frac{P_s}{P_e}$.

On pourra travailler avec les variables $z = x^{1-\frac{1}{\gamma}}$, $z_1 = \left(\frac{P'_s}{P_e}\right)^{1-\frac{1}{\gamma}}$ et $z_2 = \left(\frac{P_s}{P'_s}\right)^{1-\frac{1}{\gamma}}$, en notant que $z = z_1 z_2$.

Quelle valeur optimale doit prendre le rapport $\frac{P'_s}{P_e}$ en fonction de x pour que ce travail soit minimal ?

- Montrer que la température de sortie T_G du compresseur à deux étages est plus faible que la température de sortie $T_{C'}$ du compresseur à un seul étage. Quel en est l'avantage ?