

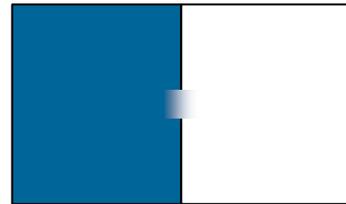
Cours 09 – Détente Joule-Thompson et réfrigérateurs réels

Survol

- détente de Joule-Thompson
- coefficients du viriel
- réfrigérateurs réels
- cryogénie

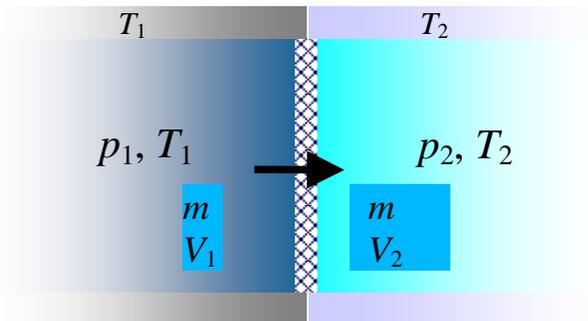
Détente de Joule-Thompson

Soit un gaz contenu dans la moitié d'un système isolé, l'autre moitié étant vide, on laisse le gaz se détendre dans la deuxième moitié:



Dans le cas d'un gaz parfait: $p_1V_1 = p_2V_2$. Pour un gaz en général, la température peut changer. Il est alors très difficile de faire en sorte que les parois du contenant ne changent pas l'énergie du système. Pour éviter ce problème, on peut considérer plutôt la détente continue d'un gaz à travers une ouverture, les parois ayant atteint l'équilibre de température avec le gaz dans les premiers temps de la détente.

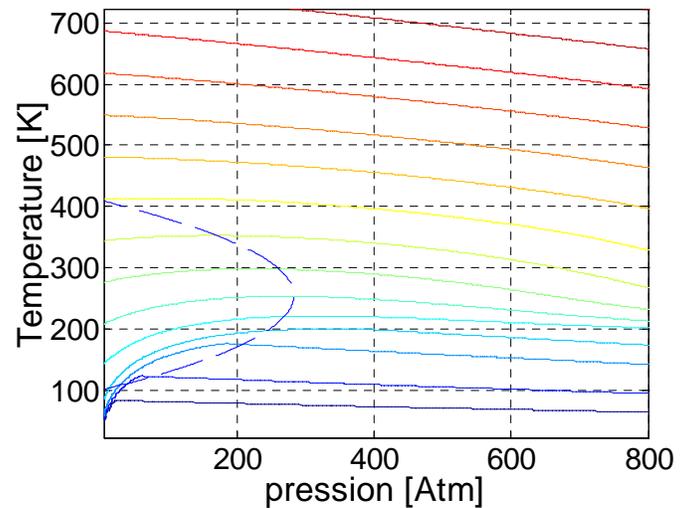
- Dans le processus, chaque unité de masse m du gaz effectuera un travail $W = p_2V_2 - p_1V_1$.
- Comme les parois sont à l'équilibre thermique,



Pour un gaz parfait, $W = p_2V_2 - p_1V_1 = 0$, donc $\Delta E = 0$. Un gaz parfait ne changera pas de température durant la détente. Ça n'est donc pas parfait pour un réfrigérateur! Pour un gaz réel, la détente peut engendrer une augmentation ou une diminution de la température.

Diagramme d'iso-enthalpie de l'azote

- Soit $u = \frac{\partial T}{\partial p}$ le paramètre de Joule-Thompson
- si $u < 0$ (pente négative), échauffement
 - si $u > 0$ (pente positive), refroidissement
 - $u = 0$ représenté par la courbe en tirets
 - du côté $u > 0$, une détente fera diminuer la température
 - pour trouver T , p d'où il faut partir pour atteindre une température de refroidissement on suit la courbe d'iso-enthalpie
 - Pour la liquéfaction, on suit la courbe à partir de la phase liquide
 - ex: pour rendre l'azote liquide, il faut partir à 200 atm, 200 K



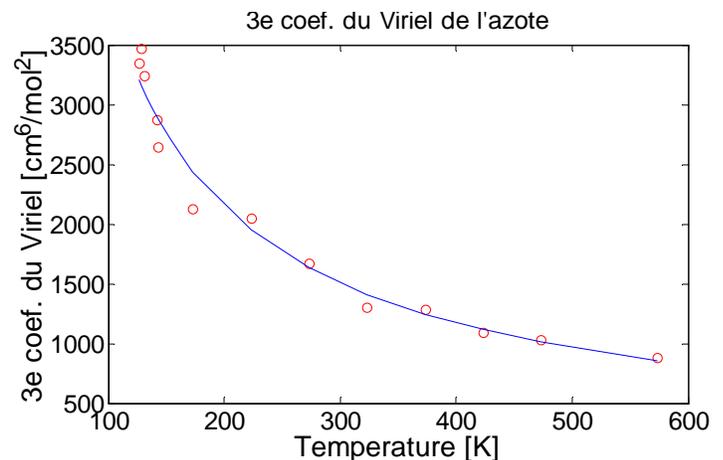
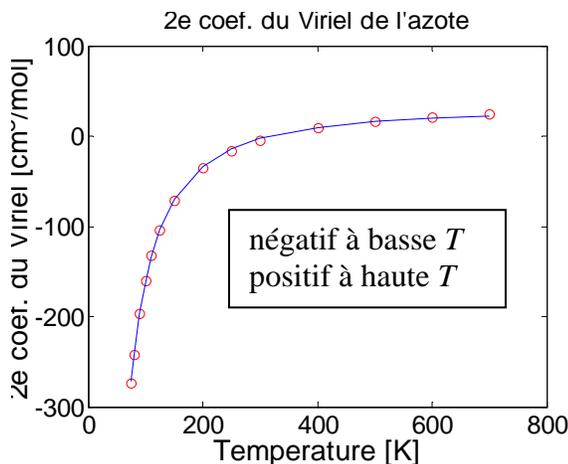
Pourquoi les courbes ont-elles cette dépendance en pression et température?

- À la différence d'un gaz parfait, les molécules d'un gaz réel subissent des interactions.
- Ces interactions seront d'autant plus importantes que les particules sont proches, i.e. N/V grand.
- Pour un gaz réel, l'équation d'état peut donc être développée en expansion du viriel de N/V :

$$p = kT \left(\frac{N}{V} + B(T) \left(\frac{N}{V} \right)^2 + C(T) \left(\frac{N}{V} \right)^3 + \dots \right)$$

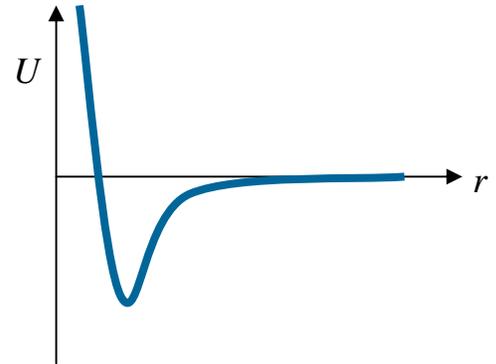
- $B(T)$ s'appelle le 2e coefficient du viriel, $C(T)$ le 3e coef.
- Ils doivent être mesurés expérimentalement, mais peuvent être calculés à partir d'une forme de potentiel interatomique

Allure des coefficients pour l'azote:



source: J. H. Dymond, The virial coefficients of gasses (1969)

Considérons que le potentiel intermoléculaire a l'allure ci-contre.

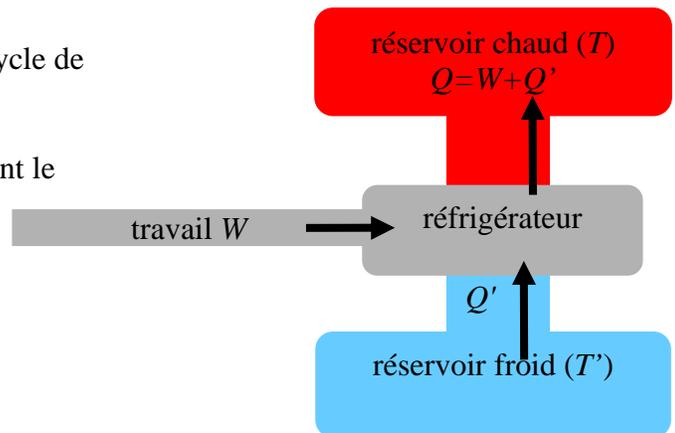


Diagrammes d'enthalpie $(dT/dp)_H$ {notes au tableau ~ 1 page}

Réfrigérateurs réels

Contrairement aux moteurs, il existe en pratique un seul cycle de refroidissement.

- Ce cycle est similaire à celui de Rankine.
- Cette fois, on refroidit le réservoir froid en chauffant le réservoir chaud.
 - o On fournit un travail W pour amener Q' dans le réservoir chaud.



Liquides réfrigérants:

- on a besoin d'une substance qui se liquéfie à basse température
- CO₂:
 - o haute pression
- ammoniaque:
 - o toxique
 - o utilisé dans de gros systèmes de refroidissement (frigos industriels)
- chlorofluorocarbones (CFC)
 - o développés dans les années 30 par GM et DuPont
 - o commercialisé sous le nom de Fréon
 - o non toxique
 - o Fréon-12: CCl₂F₂ (du "méthane" de haute densité)
 - o aussi utilisé comme aérosol et pour la production de styromousse
 - o destruction de l'ozone dans la haute atmosphère
- hydrofluorocarbones (HFC)
 - o sans chlore (inoffensif pour la couche d'ozone)
 - o Fréon-12 souvent remplacé par HFC-134a: F₃C₂FH₂

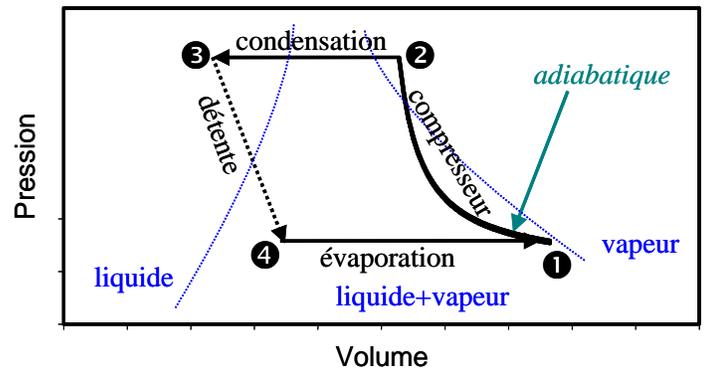
- efficacité:

$$e' = \frac{Q'}{W} = \frac{Q'}{Q - Q'} = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_3 - H_1 + H_4}$$

o Entre les points 3 et 4, il y a une détente Joule-Thompson, donc $H_3 = H_4$ et

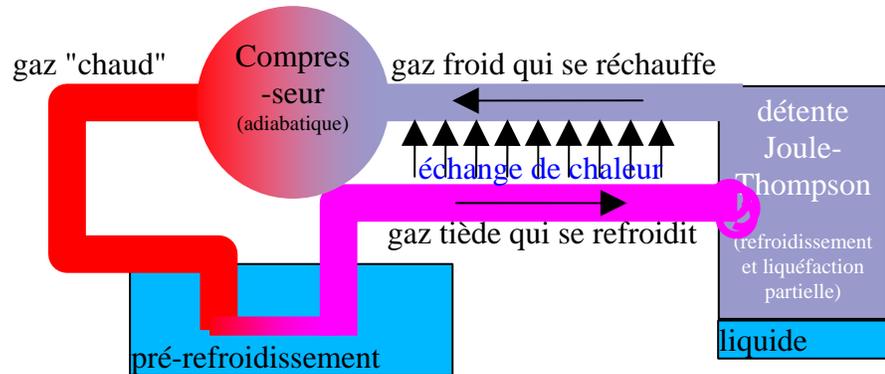
$$e' = \frac{H_1 - H_3}{H_2 - H_1}$$

o L'efficacité doit être calculée grâce à des tables d'enthalpie-entropie.



- Liquéfaction des gaz

- o on utilise en général la détente de Joule-Thompson
- o la fraction du gaz non liquéfié est réchauffée par le gaz entrant et le refroidit



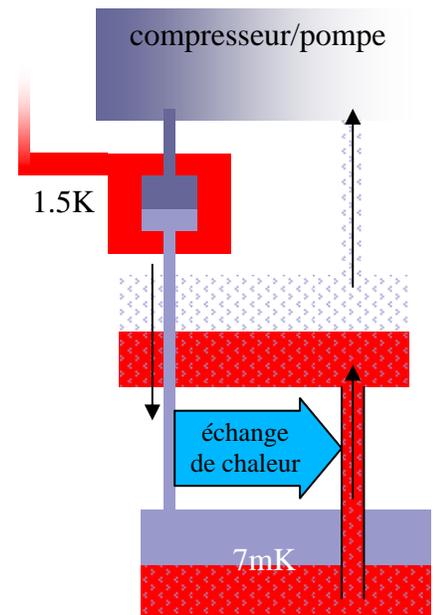
- En route vers le Zéro absolu

- o He liquide: 4.2 K (détente Joule-Thompson)
 - En pompant sa vapeur, on peut descendre à ~1 K
- o Démagnétisation adiabatique: ~ 100 mK
- o Réfrigérateur à dilution $^3\text{He}-^4\text{He}$ (~ 3 mK)
- o Refroidissement par laser (~100 μK)
- o Refroidissement Sisyphes (~1 μK)
- o Trappe magnéto-optique et sous-reculs (~nK)

- Réfrigérateur à dilution $^3\text{He}-^4\text{He}$ (~mK)

- o sous 0.87K, ^4He immiscible dans ^3He mais ^3He miscible à 6% dans ^4He
- o on dissout ^3He dans ^4He de façon continue
- o la dissolution fait refroidir le mélange
- o le mélange augmente S donc $Q = T\Delta S$
- o le mélange remonte dans le récipient en captant la chaleur de l' ^3He qui descend
- o la pression de vapeur de l' ^3He est beaucoup plus élevée que celle de l' ^4He
- o on pompe donc sur le mélange pour en extraire l' ^3He et le liquéfie dans un bain d' ^4He qu'on maintient à ~1K en pompant dessus

Légende: ■ ^4He ■ ^3He
Liqu. gaz



À retenir

- détente de Joule-Thompson
 - o conservation de l'enthalpie
- Réfrigération/liquéfaction des gaz : cycle de Rankine
- Augmentation de l'entropie lors d'un mélange...