

# LP13 - UTILISATION DES DIAGRAMMES ENTHALPIQUES POUR LES MACHINES THERMIQUES

28 décembre 2021

Nathan Berrit & Juliette Colombier

## Niveau : L1

## Commentaires du jury

Jusqu'en 2020, le titre était : Utilisation des diagrammes enthalpiques et Machine thermique  
Jusqu'en 2019, le titre était : Machines thermiques réelles

- 2017 : L'utilisation de diagrammes enthalpiques peut permettre de discuter de façon quantitative l'irréversibilité d'une machine réelle et, en plus, d'éviter de se contenter du modèle du gaz parfait. Le jury rappelle en outre que les machines thermiques ne se limitent pas aux moteurs.
- 2016 : Au-delà des modèles classiques, le candidat s'appuiera sur des diagrammes de fluides réels. Jusqu'en 2016, le titre était : Applications des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques.
- 2015 : Les diagrammes thermodynamiques, exploités dans les programmes de CPGE, sont trop rarement présentés et utilisés.

## Bibliographie

- ✦ *Thermodynamique (physique de la matière)*, **R. Suardet** → Présentation des machines thermiques
- ✦ *Thermodynamique statistique*, **Diu** → La base.
- ✦ *BUP n°832*, **François Martin** → Pleins d'infos sur les réfrigérateurs
- ✦ *Utilisation des diagrammes (P,h) en thermodynamique*, **Archambault** → Pour la partie sur l'air et comment introduire le sujet pédagogiquement

## Prérequis

- 1er et 2e principe
- 2nde loi de Joule
- Loi de Laplace et coefficient de Laplace
- Chaleur latente

## Expériences



## Commentaires

Dans le programme de CPGE, on parle explicitement de cogénération : ce serait bien de l'aborder. De plus, présenter aussi largement les machines thermiques a empêché de prendre le temps de présenter en détail et creuser les diagrammes enthalpiques (notamment pour les transformations réelles et présenter plusieurs machines différentes). Il n'y a plus de titre de leçon donc on ne s'attend pas à présenter les machines thermiques avec ce titre. Enfin, les BUP n°824 (Machines dithermes à l'épreuve du temps) et n°749 (le diagramme de Raveau revisité avec l'entropie produite) donnent des informations supplémentaires intéressantes.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Machines thermiques</b>	<b>2</b>
1.1	Définition du système	2
1.2	Machine monotherme	2
1.3	Machines dithermes	3
1.4	Efficacité	4
1.5	Premier principe industriel	4

<b>2 Diagramme enthalpique et application au réfrigérateur.</b>	<b>5</b>
2.1 Exemple de diagramme enthalpique : le cas de l'air . . . . .	6
2.2 Réfrigérateur . . . . .	7
2.3 Cycle réel . . . . .	8
2.4 Retour à l'exemple : combien ça me coûte de refroidir mon eau? . . . . .	9

## Introduction

**Intro pédagogique :** J'ai repris les objectifs du programme de mpsi/pcsi.

On a vu précédemment le premier et le deuxième principe de la thermodynamique, maintenant on va voir comment on peut les utiliser pour expliquer le fonctionnement de machines thermiques : la machine à vapeur, ou encore votre réfrigérateur ou votre pompe à chaleur.

Mais avant tout quelques définitions :

**MACHINE MÉCANIQUE :** En mécanique, une machine réalise une conversion d'énergie. Exemples : levier, moulin.

**MACHINE THERMIQUE :** Une machine thermique est un système thermodynamique échangeant du travail avec un système mécanique (ou électrique) et du transfert thermique avec un ou plusieurs thermostats au cours de transformations successives formant un cycle. (thermodynamique = thermon + dynamis : en grec, chaleur et puissance).

On va se poser une question simple : combien ça nous coûte de refroidir un pack de bouteilles d'eau pendant 1h ? *au vu des commentaires, il faudrait reformuler de façon plus physique, et s'axer sur le coût énergétique.*

## 1 Machines thermiques

### 1.1 Définition du système

On a deux grands types de machines thermiques, qu'on distingue par rapport à leur utilité :

- Soit on utilise la machine pour fournir du travail
- Soit on l'utilise pour obtenir un flux thermique, ie refroidir ou chauffer un système.

Le système qu'on considère est le fluide évoluant dans la machine. Dans la suite, on va se placer en système fermé cyclique car c'est le plus souvent le cas. En fait, les machines thermiques sont par définition cycliques, mais le fluide n'est pas forcément en une transformation cyclique : pour un réfrigérateur c'est le cas mais pour une centrale thermique ou une machine à explosion on ré injecte un "nouveau fluide" à chaque état initial.

On a alors plusieurs propriétés découlant du fait que le système revient à son état initial :

$$\Delta U = 0 \quad \Delta H = 0 \quad \Delta S = 0 \quad (1)$$

Dans la suite, on se placera dans la convention thermodynamique : les grandeurs sont positives si le système reçoit de l'énergie.

Voyons maintenant les propriétés d'une machine thermique simple en appliquant les principes de thermodynamique à notre système.

### 1.2 Machine monotherme

Considérons un système fermé cyclique échangeant de l'énergie de transfert thermique avec une unique source à température constante  $T$ . On dit que la transformation est **monotherme**. Si on applique le premier principe à ce cycle, on trouve :

$$\Delta U = 0 = W + Q$$

donc  $W \geq 0$ .

Le second principe donne :

$$\Delta S = S_c + S_e$$

et donc :

$$\rightarrow \frac{Q}{T} \leq 0$$

et donc  $Q \leq 0$ .

On trouve alors l'énoncé de Thomson (*rq : on trouve aussi Carnot ou Lord Kelvin...*) du second principe : pour qu'un système décrivant un cycle fournisse du travail, il doit nécessairement échanger du flux thermique avec deux sources à des températures différentes.

On se rend compte qu'on ne pourra pas refroidir de source avec une machine monotherme (c'est ce qu'on veut faire pour le frigo). Dans la suite, on considérera donc des machines dithermes, ie échangeant du flux thermique avec deux sources différentes.

### 1.3 Machines dithermes

On considère maintenant un système fermant échangeant de l'énergie par transfert thermique ( $Q_f, Q_c$ ) avec deux sources à température  $T_f, T_c$  et du travail  $W$ . L'inégalité de Clausius donne donc :

$$\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0 \quad (2)$$

et le premier principe donne :

$$\Delta U = 0 = W + Q_f + Q_c \quad (3)$$

À partir de ça on obtient le diagramme de Raveau, divisé en différentes zones :

- Zone rouge : impossible, ne respecte pas l'inégalité de Clausius
- Zone I :  $Q_c > 0, Q_f < 0, W < 0$  : Prend de la chaleur à la source chaude et en cède à la source froide en fournissant du travail : moteur thermique. (moteur stirling, turbine, moteur à explosion)
- Zone II :  $Q_c > 0, Q_f < 0, W > 0$  : Prend de la chaleur à la source chaude et en cède à la source froide en consommant du travail (pas très intéressant car possible sans travail mais ok pour accélérer un transfert thermique)
- Zone III :  $Q_c < 0, Q_f < 0, W > 0$  : Réchauffe la source chaude et la source froide en consommant du travail (pas très intéressant)
- Zone IV :  $Q_c < 0, Q_f > 0, W > 0$  : Consomme du travail pour réchauffer la source chaude et refroidir la source froide : pompe à chaleur, réfrigérateur.

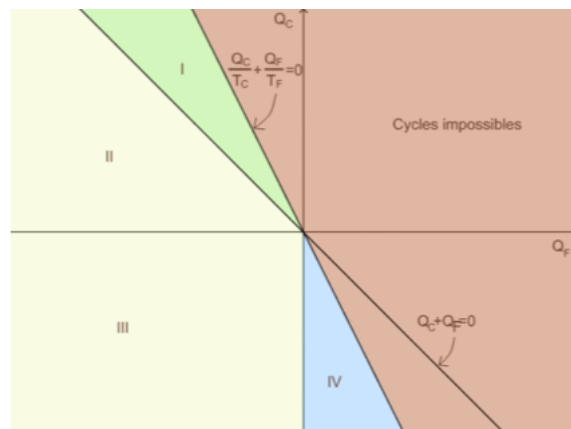


FIGURE 1 – Diagramme de Raveau qui vient de wikipédia (tout le monde l'utilise psq il est libre de droit).

*C'est super, on a compris qu'avec une machine ditherme il est possible de refroidir une source froide : c'est ce qu'on veut faire pour le frigo. Essayons maintenant de quantifier l'efficacité du dispositif. (Maintenant qu'on a vu les différents types de machines dithermes, on va voir le cycle de Carnot pour définir quelques grandeurs.)*

## 1.4 Efficacité

On définit l'**efficacité** d'une machine thermique :

$$e = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie fournie}} \quad (4)$$

Donc pour le réfrigérateur, comme l'objectif est de refroidir la source froide on a

$$e = \frac{-Q_f}{W}$$

Cycle de Carnot : machine ditherme réversible : on va le voir en temps que réfrigérateur. On a alors :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$$

Dans un cycle de Carnot réfrigérant, on a donc

$$e_{\text{Carnot}} = \frac{Q_f}{W} \quad (5)$$

$$= \frac{-Q_f}{Q_c + Q_f} \quad (6)$$

$$= \frac{-1}{Q_c/Q_f + 1} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{T_c/T_f - 1} \quad (8)$$

$$= \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad (9)$$

On voit que pour un cycle réfrigérant n'est pas réversible, alors  $e \leq e_{\text{Carnot}}$ .

L'efficacité d'un réfrigérateur est généralement entre 1,5 et 5.

### Efficacité

Ici, on peut donner les efficacités de la pompe à chaleur ou un moteur (donner des ordg si c'est le cas). On peut également discuter l'équilibre entre efficacité et puissance (cf questions) et la notion de rendement qui n'est applicable qu'au moteur.

*Ok on sait faire en système fermé, mais on a vu qu'une machine thermique c'était une succession de transformations. On se rend compte que le passage dans chacun des organes et donc son analyse va se faire en système ouvert.. On est bloqués. Mais en fait non : on va voir comment appliquer le premier principe en système ouvert.*

## 1.5 Premier principe industriel

On commence par faire deux hypothèses :

- On se place en régime stationnaire.
- On étudie une transformation entre  $t$  et  $t+dt$ .

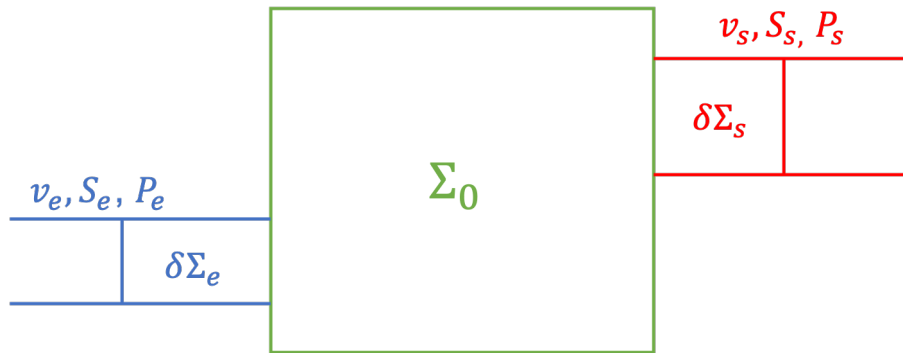


FIGURE 2 – Schéma du système ppi

Notre système est défini comme :

- à  $t$  :  $\Sigma(t) = \Sigma_0 + \delta\Sigma_e$  avec  $\delta\Sigma_e$  la matière qui rentre entre  $t$  et  $t+dt$ .
- à  $t + dt$   $\Sigma(t + dt) = \Sigma_0 + \delta\Sigma_s$  avec  $\delta\Sigma_s$  la matière qui rentre entre  $t$  et  $t+dt$ .

On a bien défini un système fermé et on peut lui appliquer le premier principe :

$$dE = \delta W_p + \delta W_u + \delta Q$$

Étudions l'évolution des termes :

- Bilan de masse : le débit massique se conserve.
- Bilan d'énergie :  $dE = E_0(t + dt) - E_0(t) + \delta m(\Delta u + \Delta e_c + \Delta e_p)$ .
- Système fermé, donc l'énergie propre au fluide doit être égale à celle reçue par le système :  $dE = \delta W_p + \delta W_u + \delta Q$  avec  $W_p$  travail des forces de pression,  $W_u$  travail extérieur et  $Q$  transfert thermique.
- On développe les forces de pression non internes (déjà prises en compte dans le premier bilan d'énergie) :  $\delta W_{p,e} = P_e S_e v_e dt$  il est positif car si on considère le système, le travail des forces de pression en entrée "pousse" vers le système. De même en sortie, mais cette fois il "retient" le fluide donc il est négatif.
- $\delta W_{p,e} = P_e D_{v,e} dt$  d'où en massique  $\delta w_{p,e} = P_e V_{e*}$  avec  $V_{e*}$  le volume massique.
- On remarque que tout se passe bien au niveau des signes en passant le travail des forces de pression de l'autre côté et qu'on retrouve l'enthalpie massique!!

On obtient le premier principe industriel écrit avec les grandeurs massiques.

$$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = w_u + q \tag{10}$$

Ok super on a un moyen d'étudier chaque organe. Cependant c'est une variation d'enthalpie et on sait pas forcément quel modèle utiliser... pas facile pour une machine réelle. Donc on utilise des diagrammes faits expérimentalement : les diagrammes (P, h)

## 2 Diagramme enthalpique et application au réfrigérateur.

Voilà à quoi ressemble un diagramme enthalpique : figure ??.

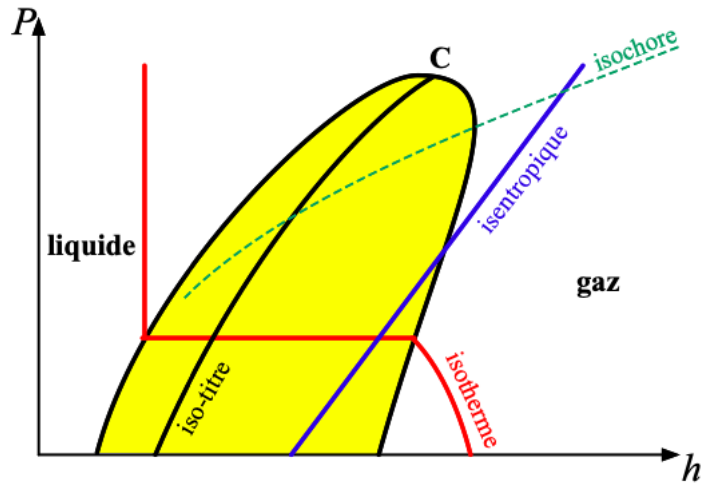


FIGURE 3

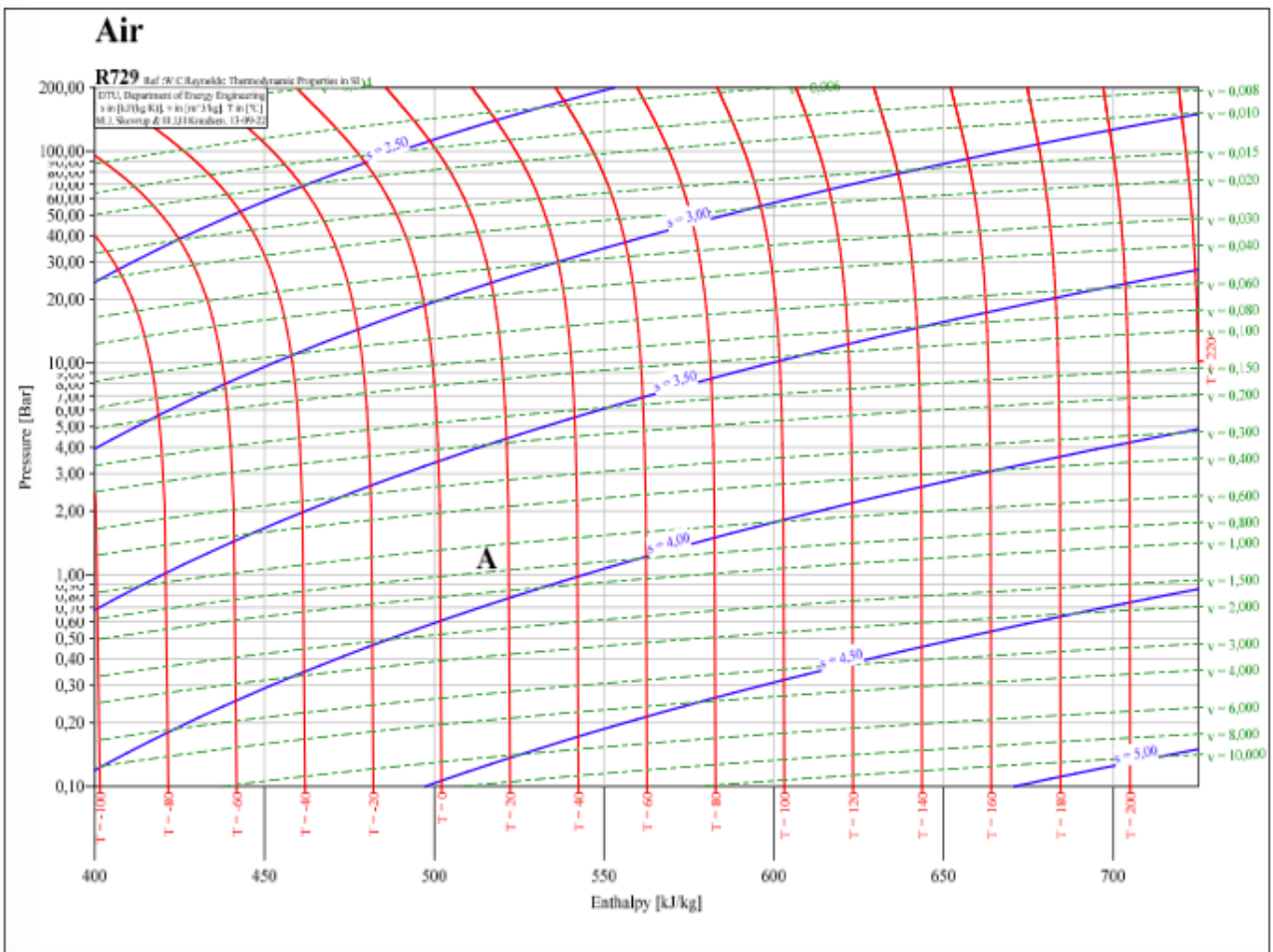


FIGURE 4 – Caption

## 2.1 Exemple de diagramme enthalpique : le cas de l'air

On va s'intéresser à un type de diagramme permettant d'étudier les machines thermiques, les diagrammes (P, h). Dans un premier temps, pour comprendre, on va étudier le diagramme enthalpique de l'air. Ici, on voit les isothermes en rouge, les isentropiques en bleu et les isochores en vert.

Vérifions que l'air suit le modèle des gaz parfaits.

- Rappel de la seconde loi de Joule pour les GP : l'enthalpie molaire ne dépend que de la température. On voit sur le diagramme que c'est effectivement vérifié pour des pressions pas trop grandes.
- Relation de Laplace pour l'évolution isentropique d'un gaz parfait :  $PV^\gamma = cste$ . On peut donc se placer sur une isentropique et faire une régression linéaire pour vérifier le coefficient de Laplace de l'air. Je l'ai fait en figure 5, on trouve  $\gamma = 1,41$  ce qui montre que l'air vérifie bien le modèle du GP.

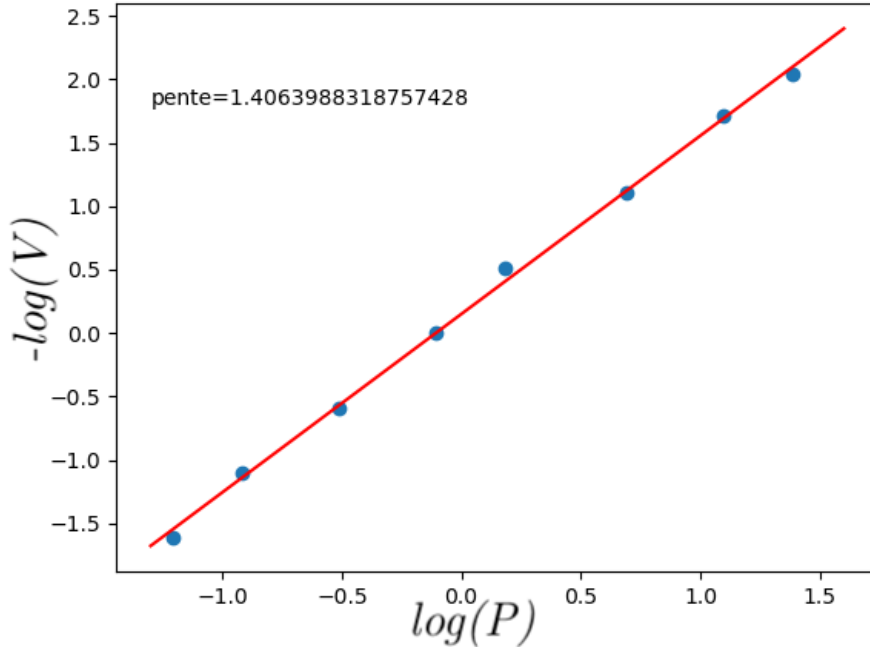


FIGURE 5 – Caption

↓ Maintenant qu'on a appréhendé le diagramme enthalpique, appliquons le au réfrigérateur

## 2.2 Réfrigérateur

Voilà la structure d'un diagramme  $(P, h)$  pour un fluide diphasé.

Le fluide qu'on utilise est appelé fluide caloporteur. Sa nature a évoluée au cours du temps pour être optimisée et aujourd'hui c'est du 1,1,1,2 - tétrafluoroéthane plus communément appelé R134a.

Voilà le schéma de fonctionnement d'un réfrigérateur :

Maintenant, traçons le cycle sur le diagramme  $(P, h)$  ( *le faire étape par étape* ) et on obtient :

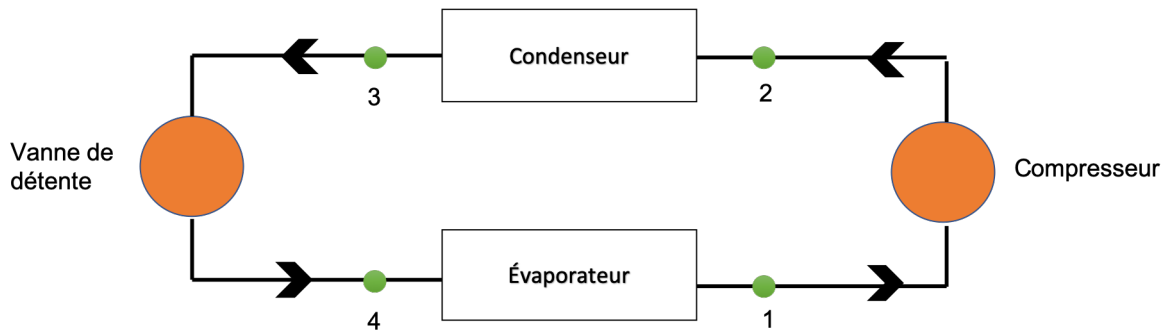
Maintenant que la cycle est tracé, on peut étudier spécifiquement l'étape de détente en lisant le diagramme. EN exploitant le fait que  $h$  est une fonction d'état :  $\Delta_{3 \rightarrow 4} h = 0 = c(T_4 - T_3) + L_v(T_4)x_{vap}$

Application numérique :

$$T_4 - T_3 = -\frac{L_v(T_4)x_{vap}}{c} = -76K$$

En lisant sur le diagramme, on a  $T_4 - T_3 = -60K$  : c'est cohérent.

Par ailleurs, le diagramme permet aussi de lire l'efficacité  $e = \frac{q_{41}}{w_{12}} = 2,8$ . Cette efficacité est inférieure à  $e_{Carnot} = 3,5$  : c'est rassurant.



- 1 -> 2 : Compression isentropique
- 2 -> 3 : Échange thermique isobare à P grande
- 3 -> 4 : Détente isenthalpique
- 4 -> 1 : Échange thermique isobare P basse

FIGURE 6 – Caption

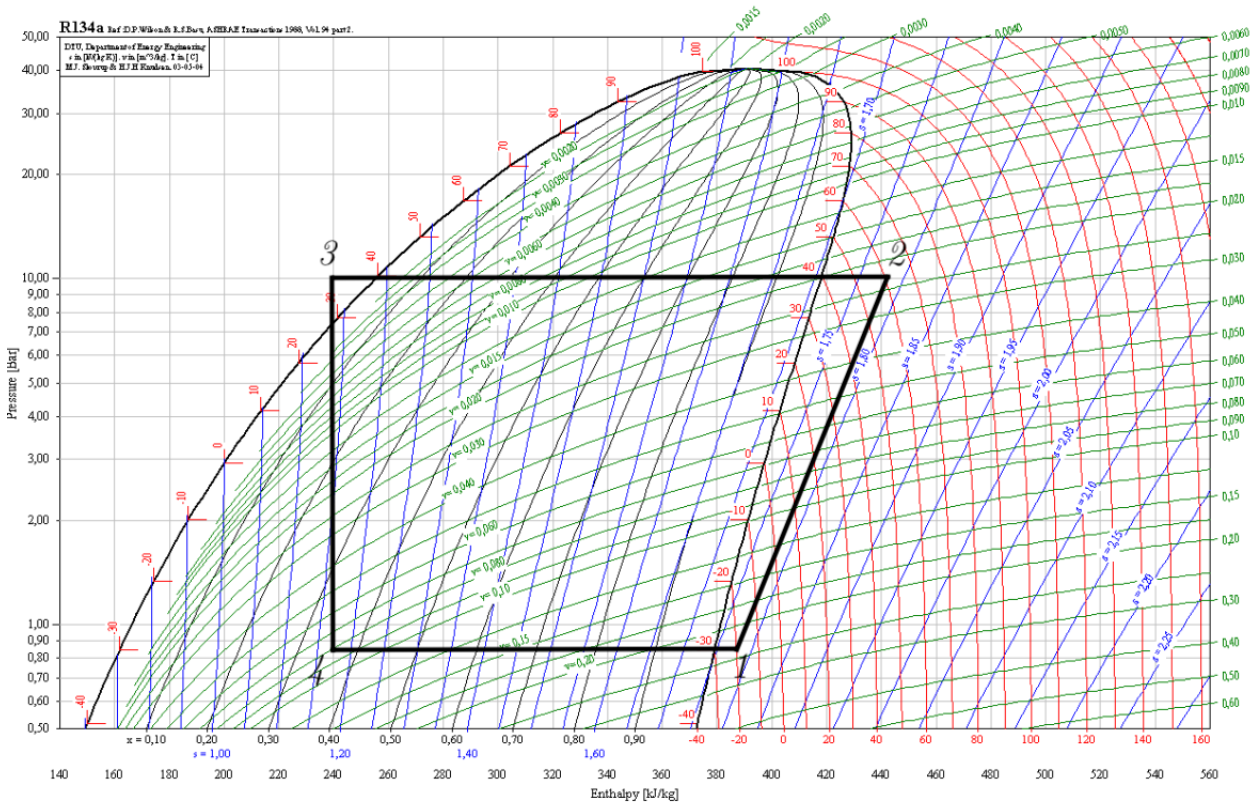


FIGURE 7 – Caption

### 2.3 Cycle réel

Le cycle qu'on vient d'étudier est une modélisation idéale du cycle d'un réfrigérateur : l'isentropique n'est pas réellement isentropique et les isobares non plus. On peut donc proposer une correction pour se rapprocher de la réalité :

On voit qu'on augmente  $\Delta h_{12} = w_{12}$ . On rappelle

$$e = \frac{q_{14}}{w_{12}}$$

On voit donc que l'efficacité réelle va être diminuée. C'est logique puisqu'on a vu que l'irréversibilité diminuait le



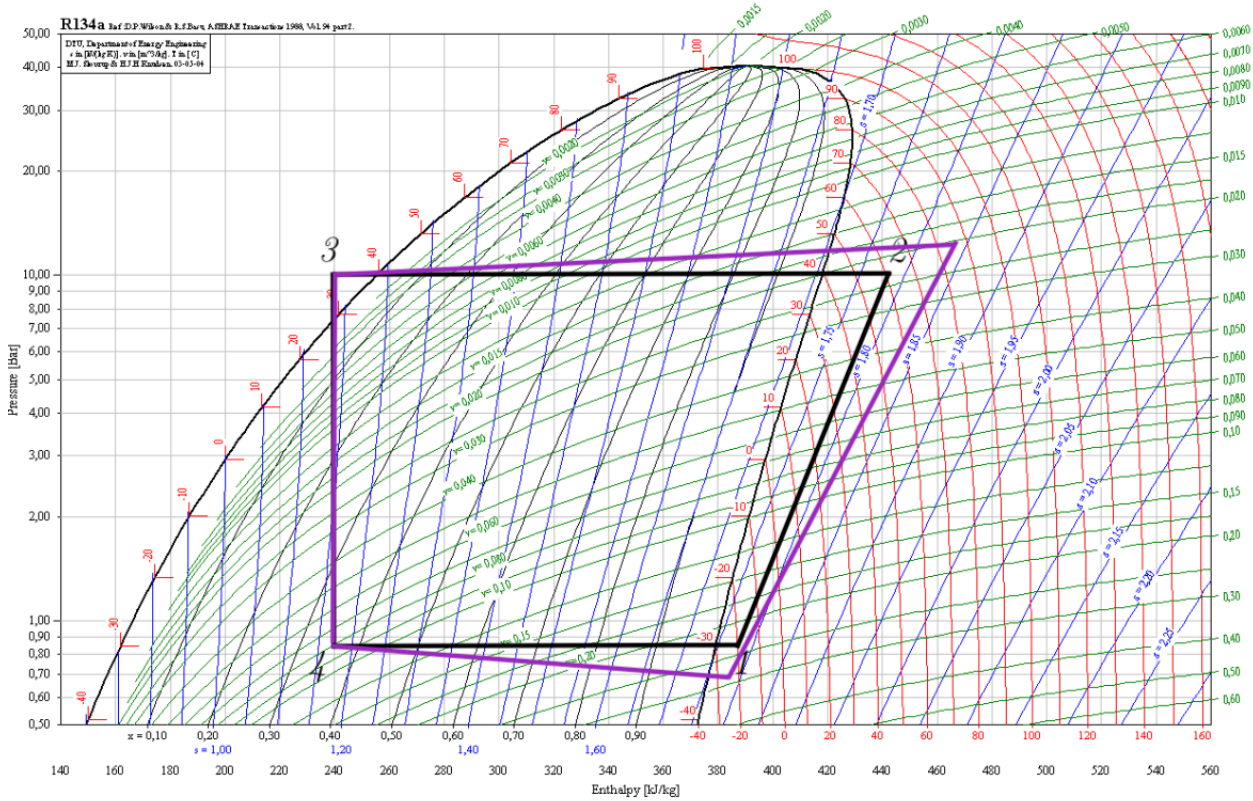


FIGURE 8 – Caption

rendement : cependant, on peut rappeler qu’une transformation réversible est infiniment lente, et qu’elle a donc une puissance nulle.

De plus, on voit que lors des échanges thermiques, on perd en pression dans la réalité : c’est normal puisque ces échanges se font par un passage dans une tuyauterie au contact du thermostat, et que le fluide utilisée a une viscosité qui induit une certaine perte de charge.

### 2.4 Retour à l’exemple : combien ça me coûte de refroidir mon eau ?

Données du problème :

- $T_i = 25^\circ\text{C}$ ,  $T_f = 5^\circ\text{C}$ .
- Capacité thermique massique de l’eau  $c = 4,2\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
- masse en eau  $m = 6\text{kg}$
- Pertes dues à l’isolation de puissance  $P = 10\text{W}$
- Prix d’un kWh edf : 0,15 euro.
- $\Delta t = 1$  heure.

Système considéré : {intérieur du frigo}. Appliquons lui le premier principe

$$\Delta U = Q_{\text{fuite}} + Q_{\text{frigo}} = Q_{\text{frigo}} + P\Delta t = mc(T_f - T_i) \tag{11}$$

Sachant que  $e = \frac{|Q_{\text{frigo}}|}{W}$  et qu’on a trouvé  $e$  dans la partie précédente (ce serait mieux d’estimer l’efficacité comme un pourcentage du rendement de Carnot et de l’appliquer aux températures de l’exemple, mais c’est compliqué niveau temps), on fait l’application numérique pour  $W = 1,5 \cdot 10^5 \text{J}$ . Connaissant le prix du kWh ça revient à 0,8 centimes.

## Conclusion

On a réinvesti le premier et le second principe pour un système pratique que vous connaissez tous. Ce qu'il faut revenir c'est comment orienter ses transferts thermiques et l'importance de la convention, le premier principe industriel et pourquoi on l'utilise et les diagrammes enthalpiques. Pour revoir ses notions, on étudiera dans les prochaines séances le moteur et la pompe à chaleur.

## Question

- Quand on parle du frigo, quelle est le domaine de Raveau qui est bien ? Réexpliquer *Le but c'est de refroidir la source froide (erreur de typo au tableau)*
- Pourquoi  $S = \frac{Q}{T}$  ? Quelles sont les hypothèses. *Contact avec un thermostat à T constant*
- Rappelle comment tu définis l'efficacité. Pourquoi tu la définis avec l'énergie massique ? Est-ce qu'on utilise toujours l'énergie massique ? *non c'était juste dans le contexte*
- Pourquoi on peut dire que  $\Delta Q = \delta m q$  ? Quel est le nom de code ? *Extensivité* Oui ! On la confond souvent avec additivité, rappeler la différence. *extensive = proportionnelle à une quantité caractéristique du système (ici  $\delta m$ ). Additive = égale à la somme de la grandeur dans chaque sous système composant le système*
- Avec une machine monotherme, vous avez dit qu'on pouvait pas avoir de moteur. En fait, ça donnerait quel genre de machine ? *radiateur.*
- Comment on obtient un diagramme (P, h). Tu as utilisé Coolpack, comment fonctionne le logiciel ? *Il trace pas les diagrammes mais permet seulement de faire des cycle. Pour les diagrammes il prend des données expérimentales.*
- Différence entre tes deux cycles sur la diapo de fin ? *Un qui prend en compte les imperfections du cycle réel : effets de la viscosité par exemple.*
- Pourquoi est-ce qu'on utilise des changements d'état dans les frigo ? *ça contient de l'énergie, il faut comparer les chaleurs latentes aux capacités thermiques*
- Tu peux parler un peu du rôle de la réversibilité ? *La réversibilité limite la puissance, parce qu'elle rend la transformation lente : compromis entre puissance et réversibilité*
- Quelles sont les hypothèses de la loi de Laplace ? *GP + isentropique* Décris la démonstration rapidement, son point de départ. *On part des différentielles de U et H* Sinon, on a une expression explicite de l'entropie pour un GP.
- Réexplique comment tu as calculé l'efficacité à la fin.
- Tu as utilisé un chemin particulier pour calculer la variation d'entropie, pourquoi tu peux faire ça ? *C'est une fonction d'état*
- Conversion KWh en J ?
- Diagramme de Raveau : Comment peut-on l'améliorer ? Qu'est-ce qu'il manque comme hypothèse pour le tracer. *Les hypothèses habituelles* Quel mot clef sur la transformation ? → réversibilité. Comment prendre en compte l'irréversibilité ? *On translate la droite  $Q_c/t_c + Q_f/T_f$  vers le bas - après c'est en première approximation car l'entropie créée peu dépendre des transferts thermiques..*
- C'est normale intuitivement qu'il y ait plus de cycles impossibles dans le cas irréversible ? *On ajoute de la contrainte donc oui.*
- Citer d'autres cycles que celui du frigo. *Cycle diesel, essence, cycle de Rankine.*
- dans le premier principe industriel, décrire le calcul des différents travaux. et pour les forces de pression dans  $\Sigma_0$  ? *On les prend pas en compte parce que ce sont des forces internes.*
- Si je veux refroidir ma cuisine en ouvrant le frigo, ça marche ? Comment y répondre avec un calcul. *En fait il faut ré-appliquer le 1er principe au réfrigérateur (le fluide pas l'intérieur). Puis on trouve que  $Q_{tot} < 0$  donc nécessairement le frigo réchauffe l'extérieur donc ça ne marche pas.*

## Remarques

- Plan bien mais pb de temps : tu peux mettre la partie machine thermique en prérequis pour gagner du temps. Mais le PPindustriel fait une très bonne transition avec la suite, c'était bien.
- Dans cette leçon, on veut appuyer surtout sur les diagrammes et les diagrammes réels. Ici tu as un peu manqué de temps. Il faut pousser les applications et les justifier un peu plus en détail. On t'en voudra + de négliger les diagrammes que de mettre machines thermiques en prérequis.
- La partie sur le PPindustriel allait un peu trop vite. Tu peux gagner un peu de temps dessus peut-être, mais c'est bien de le faire parce que c'est ton "gros" calcul de la leçon. Attention à être bien rigoureuse et à ne pas introduire les grandeurs qu'à l'oral.
- Super intro et mise en contexte. Par contre, la problématique gagnerait à mettre en valeur des enjeux physique (rentabilité énergétique) plus que "physique du quotidien (combien ça coûte).
- Mettre le schéma de principe des composants du frigo le + vite possible pour bien introduire le système. Écrire les mots clés sur le tableau, pas seulement le dire à l'oral! (système fermé, extensif...).
- Détails à fond un calcul d'efficacité et présente les autres sur un slide.
- Bien de faire le cas de l'air, mais tu y passes beaucoup de temps et ça s'inscrit pas de ouf dans la leçon. Commencer par montrer les diagrammes simplifiés qui sont clairs.
- Attention, pas d'incertitudes sur la régression, le jury va être super pénible! et y'a pas de bar d'erreur. Sur du quantitatif, être rigoureux sur les incertitudes, le jury t'attends.