

EPFL

Cycles de pompe thermique



- Définitions et objectifs
- Cycle de Carnot inversé
- Cycle de réfrigération idéalisé
- Expansion isenthalpique
- Cycle réel

Thermodynamique

Bonjour, mon nom est Etienne Robert et je vais maintenant vous présenter un bref module sur l'analyse thermodynamique des cycles de pompage thermique. Tel que mentionné dans l'introduction de la leçon sur les cycles thermodynamique, les cycles de pompage thermique visent le transfert d'une chaleur, le transfert d'une quantité de chaleur à l'encontre d'un gradient de température, et ce en utilisant un apport de travail externe au cycle. Bien entendu, ces cycles trouvent des applications dans le domaine de la réfrigération, mais également pour le chauffage résidentiel. Ce module couvrira les points suivants. Premièrement, je vais introduire quelques définitions et objectifs des différents cycles de pompage thermique et ensuite je vais expliquer pourquoi le cycle de Carnot inversé ne peut pas être utilisé pour effectuer ces tâches. J'ai par la suite présenté un cycle de réfrigération idéalisé qui se prête bien aux analyses thermodynamiques et soulevé deux points importants par rapport à ces cycles idéalisés. Premièrement, les différences qu'il y a par rapport au cycle réel et ensuite la nature identique de la perte de pression qui est effectuée dans le cycle.

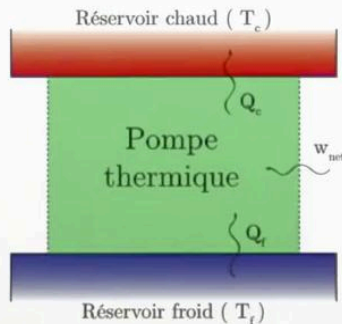
Notes

Summary



0m 04s

Cycles de pompe thermique



- Définition et objectif

« Cycle pour transférer de la chaleur d'un réservoir froid vers un réservoir chaud. »

- Utilise du travail

- Objectifs: deux types

- Réfrigération: garder T_f constant, maximiser Q_f

$$COP_R = \frac{Q_F}{W_{entrée}} = \frac{Q_F}{Q_C - Q_F} = \frac{1}{\frac{Q_C}{Q_F} - 1}$$

- Pompe thermique: garder T_c constant, maximiser Q_c

$$COP_{PT} = \frac{Q_C}{W_{entrée}} = \frac{Q_C}{Q_C - Q_F} = \frac{1}{1 - \frac{Q_F}{Q_C}}$$

Thermodynamique

L'objectif d'un cycle de pompage thermique est de transférer de la chaleur d'un réservoir froid vers un réservoir chaud, donc à l'encontre du gradient de température. Pour ce faire, le cycle utilise du travail et ce que l'on désire obtenir à partir de ce travail va dépendre de l'application visée. S'il s'agit d'un réfrigérateur, on cherche à retirer un maximum de chaleur du réservoir froid, donc à maximiser Q_F . Si par contre on a affaire à une pompe thermique, on cherche alors à maximiser Q_C , par exemple pour effectuer du chauffage domestique. On doit donc considérer deux équations distinctes pour quantifier la performance de ces systèmes selon s'il s'agit d'un réfrigérateur ou d'une pompe thermique. Dans les deux cas, ce coefficient de performance est un ratio entre ce qu'on désire obtenir et ce qu'on a fourni au système. Et dans les deux cas, on pourra ultimement exprimer le coefficient de performance en fonction du ratio de chaleur échangée aux deux sources.

Notes

Summary



Cycles de Carnot inversé



- Carnot inversé = réfrigérateur idéal
- Impossible à réaliser en pratique
 - Expansion et détente biphasique

Thermodynamique

Tel que mentionné dans le module d'introduction. Le cycle de Carnot inversé représenterait un cycle de réfrigération idéal puisqu'il est composé de quatre évolutions réversibles. Malheureusement, celui-ci est impossible à implémenter en pratique, en grande partie parce que dans les systèmes de réfrigération, le fluide utilisé change de phase. En effet, le changement de phase est indésirable car la grande quantité d'énergie emmagasinée dans la chaleur latente du fluide permet de transférer de grandes quantités d'énergie entre un condenseur par exemple, et un évaporateur. Cette grande densité d'énergie permet ainsi d'avoir des installations de plus petite taille, donc l'utilisation d'un cycle de Carnot inversé est extrêmement difficile car elle nécessiterait la compression et la détente d'un mélange dysphasique, et malheureusement aucune machine existante permet de faire cette tâche avec une grande fiabilité, en grande partie parce que dans un mélange phases qu'on a à la fois de la vapeur et du liquide qui ont tous les deux des densités très différentes. Et cette différence de densité là cause des contraintes mécaniques très élevées sur les pièces en mouvement.

Notes

Summary



1m 47s

Cycles de Carnot inversé



- Carnot inversé = réfrigérateur idéal
- Impossible à réaliser en pratique
 - Expansion et détente biphasique

Thermodynamique

On cherche donc à éviter d'avoir un mélange dysphasique pour toutes les années. Les opérations qui nécessitent l'utilisation d'une machine ayant des pièces mobiles, entre autres. Toutes les opérations qui impliquent un changement de pression.

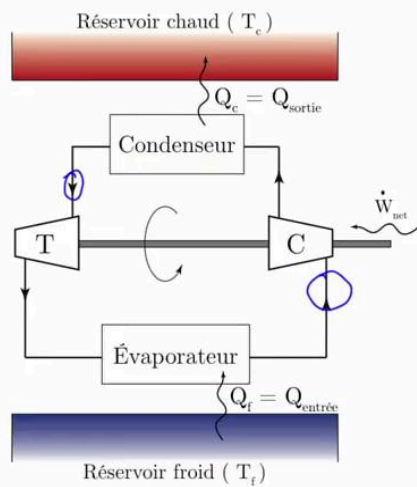
Notes

Summary

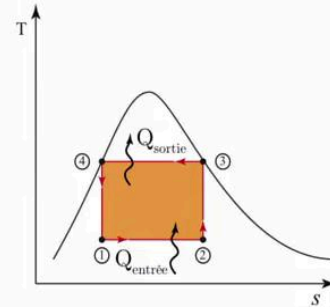


2m 49s

Cycles de Carnot inversé



- Carnot inversé = réfrigérateur idéal
- Impossible à réaliser en pratique
- Expansion et détente biphasique



Thermodynamique

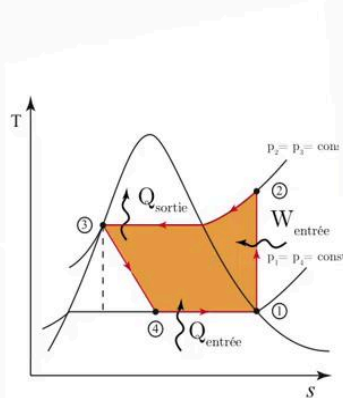
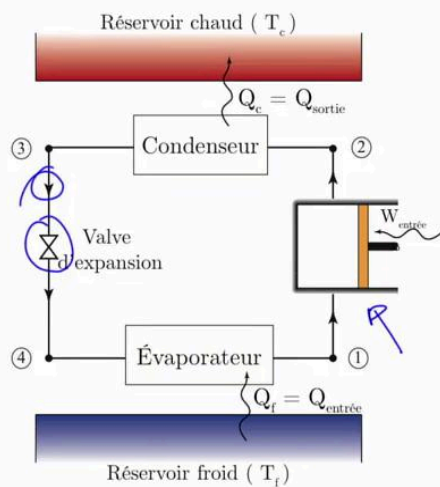
Cette zone dangereuse dans le diagramme TS est localisée sous la norme de saturation. Un des objectifs de la conception d'un système ou d'un cycle thermodynamique de réfrigération pratique est de trouver un moyen pour déplacer les opérations qui font intervenir un changement de pression à l'extérieur de la zone dangereuse dans la zone de mélange saturée. Donc lors de la conception de ces cycles, il est primordial de bien dimensionner les échangeurs de chaleur pour s'assurer que le fluide qui entre dans le compresseur par exemple, ou éventuellement dans une turbine soit monophasé et ainsi permettre un cycle fiable et sec de réfrigération.

Notes

Summary



Cycle de réfrigération idéalisé



• 4 évolutions

Évolution	
1 - 2	Compression isentropique
2 - 3	Rejet de chaleur ($P = \text{cste}$)
3 - 4	Expansion non-isentropique
4 - 1	Absorption de chaleur ($P = \text{cste}$)

• Coefficients de performance

Thermodynamique

Aussi composé de quatre révolutions, en commençant par une compression et entropique, donc adiabatique irréversible en phase vapeur, celle-ci est en général effectuée par un compresseur à déplacement positif tel un système piston cylindre, car la taille des installations de réfrigération ne justifie que rarement l'utilisation des turbo machines qui sont beaucoup plus complexes et beaucoup plus coûteuses. La chaleur est ensuite évacuée au réservoir chaud avec changement de phase à pression constante pour aboutir à un liquide saturé ou proche de la saturation à la sortie du condenseur. Dans cet état, le fluide à haute pression contient un potentiel pour effectuer du travail. Par contre, l'extraction de ce potentiel serait complexe car elle devrait s'effectuer en milieu dysphasiques. L'objectif premier à ce stade est d'obtenir un mélange saturé à basse pression et à basse température pour absorber de la chaleur dans l'évaporateur. On se contente en général d'abaisser la pression dans une valve de détente ou un tube capillaire. Ce sont des dispositifs sans pièces mobiles qui peuvent donc survivre à une opération en mélange dysphasiques.

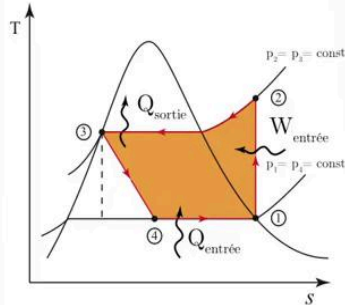
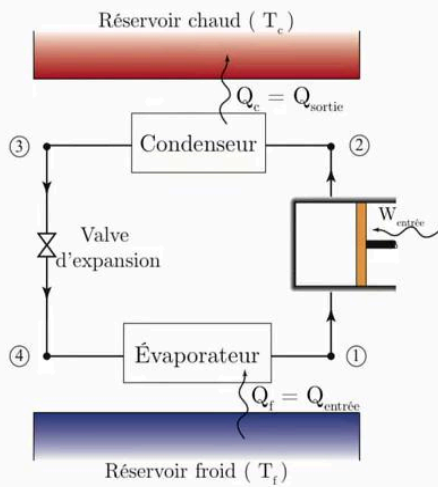
Notes

Summary



3m 37s

Cycle de réfrigération idéalisé



• 4 évolutions

Évolution	
1 - 2	Compression isentropique
2 - 3	Rejet de chaleur (P=cste)
3 - 4	Expansion non-isentropique
4 - 1	Absorption de chaleur (P=cste)

• Coefficients de performance

$$COP_r = \frac{Q_f}{W_{net, \text{entrée}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$COP_{pt} = \frac{Q_c}{W_{net, \text{entrée}}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Thermodynamique

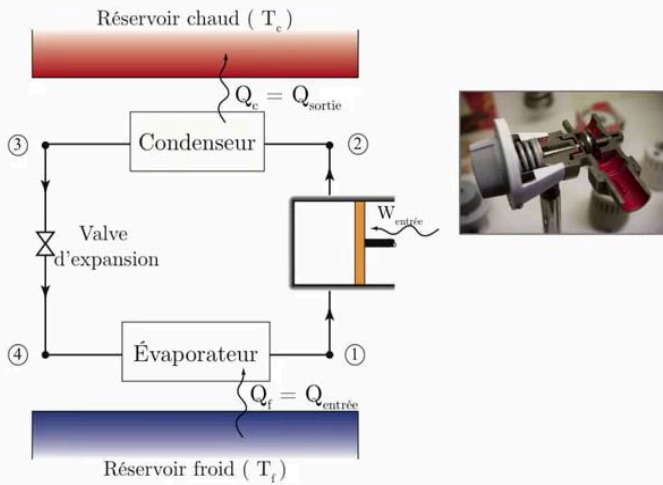
On ne cherche donc pas à exploiter ou à extraire le potentiel de la génération de travail du fluide au point trois. Un bilan d'énergie sur les composantes de détente, tel les valves d'expansion et les tubes capillaires, révèle que cette opération s'effectue de manière isolée, c'est à dire à enthalpie constante. Les définitions des coefficients de performance peuvent donc s'exprimer en termes de ratio de la différence entre PI, entre l'évaporateur et le condenseur pour le réfrigérateur et entre le condenseur et le compresseur pour la pompe à chaleur.

Notes

Summary



Considérations pratiques



- Valves et tubes capillaires
 - Échangent ni travail ni chaleur
 - Non-isentropiques – isenthalpiques
- Fluides utilisés
 - Propriétés
 - Température critique élevée
 - Point de fusion bas
 - Chaleur latente élevée

Thermodynamique

Les valves et les tubes capillaires sont des dispositifs de petite taille, donc la composante qu'on utilise ici pour faire baisser la pression et en général assez petite, c'est souvent seulement un pointeau qui va restreindre la section de passage de fluide dans un tuyau. Comme le dispositif est petit. On peut souvent négliger le transfert de chaleur qui est effectué à cet endroit là. Et en faisant un bilan en système ouvert sur ce système, on réalise que comme il n'y a pas d'apport de chaleur, il n'y a pas de travail forcé. L'évolution doit être isolée. Alpiq. Par contre, la baisse de pression est effectuée au travers du frottement visqueux des fluides. Ces évolutions sont irréversibles et non des entropique. Les fluides utilisés sont choisis pour que les changements de phase s'effectuent à pression modérée en produisant un écart de température utile. Par exemple, une ébullition à -20 degrés Celsius à pression ambiante et est idéale pour les applications de réfrigération domestique. Pourquoi idéal ? Tout simplement parce que la température est suffisamment froide pour un congélateur et la basse pression en place. Peu de contrainte sur les propriétés mécaniques des échangeurs de chaleur.

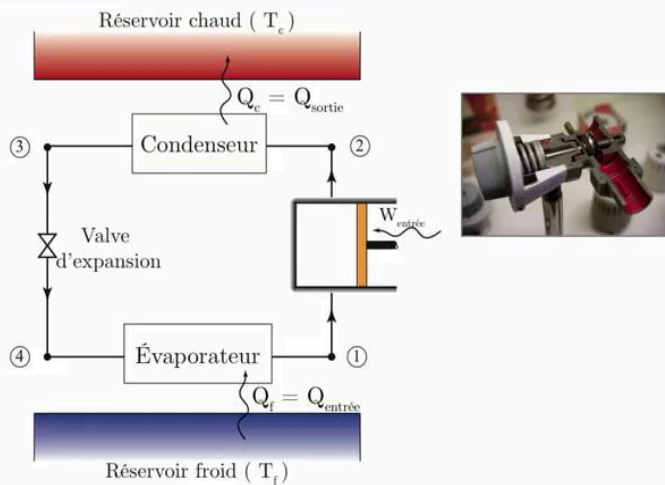
Notes

Summary



5m 07s

Considérations pratiques



- Valves et tubes capillaires
 - Échangent ni travail ni chaleur
 - Non-isentropiques – isenthalpiques
- Fluides utilisés
 - Propriétés
 - Température critique élevée
 - Point de fusion bas
 - Chaleur latente élevée
 - Fluides frigorigènes: Rxxx
 - HydroCluoroCarbones (HFC)
 - R-134a: 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (CH_2FCF_3)

Thermodynamique

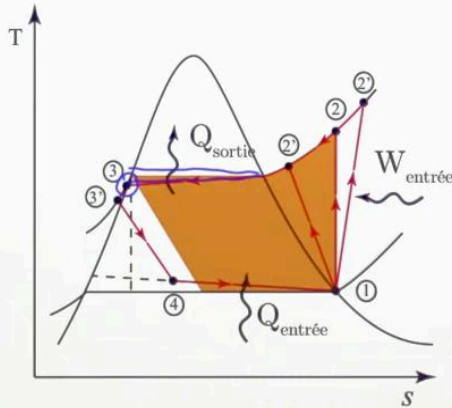
On appelle les fluides qui ont ces propriétés des fluides frigorigènes ou des réfrigérants. Il s'agit souvent d'hydro fluorés au carbone auquel on applique un numéro air. Par exemple, Air 134 A est un fluide frigorigène très utilisé dans l'industrie, dont le nom complet est un, un, deux tétra fluor octane avec une composition de $\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$. Il y a -26 degrés Celsius à pression atmosphérique.

Notes

Summary



Cycle réel vs cycle idéalisé



• Autres considérations pratiques

- Frottement visqueux dans le liquide
- Niveau de surrefroidissement
- Isolation imparfaite du compresseur

Thermodynamique

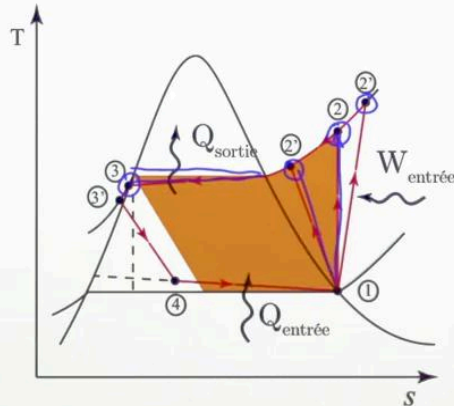
Dans la majorité des cycles thermodynamiques vus jusqu'à présent, il était en général justifié de négliger les pertes de pression dues aux frottements visqueux dans les conduites et les échangeurs de chaleur dans les réfrigérateurs. Par contre, les conduites sont en général petites et les fluides utilisés sont très visqueux. Donc il arrive fréquemment que la température ou l'état à la sortie d'une composante soit légèrement différente de l'état à l'entrée de la composante suivante. On le voit par exemple dans le diagramme CS illustré ici, où, contrairement au corps idéalisé dans lequel on suppose que la température est constante lors du changement de phase. Dans l'évaporateur ou dans le condenseur plutôt. Dans le cas réel, la température baisse progressivement lorsque la pression baisse progressivement dans le condenseur. De plus pour s'assurer que la valve d'expansion qui est située au point trois, reçoive seulement un liquide saturé et non un mélange dysphasique, il est nécessaire de légèrement surdimensionner le condenseur pour qu'ils produisent un liquide comprimé et non simplement saturé. Ça évite que suivant une légère baisse de performance du condenseur, on se retrouve avec un mélange déphasée au point trois, ce qui provoquerait une détente bruyante.

Notes

Summary



Cycle réel vs cycle idéalisé



• Autres considérations pratiques

- Frottement visqueux dans le liquide
- Niveau de surrefroidissement
- Isolation imparfaite du compresseur

Thermodynamique

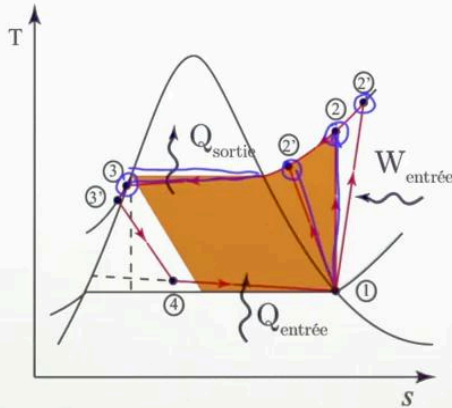
Finalement, pour les employés qu'on a vue jusqu'à présent, on cherchait à toujours bien isoler le compresseur pour éviter que de l'énergie sort du système. Ici, c'est l'inverse. Toutes les pertes résultant de l'isolation imparfaite du compresseur représentent une charge en moins pour la condenseur et minimisent de plus le travail de compression. Comme on peut voir ici dans le diagramme TS, si la compression était il entropique, donc parfaite et réversible, on se retrouverait au point deux ici si elle est dans les endroits. Donc on crée de l'entropie, on a du frottement et on a donc une compression qui est imparfaite. Mais on a un compresseur qui est parfaitement isolé. On va se retrouver au point de prime qui s'est tué ici. Et les résultats, c'est qu'on a fait moins de travail pour comprimer et en plus qu'on a moins d'énergie à extraire du système dans le condenseur. Voilà qui conclut un module sur l'analyse thermodynamique des cycles de réfrigération et de pompage thermique.

Notes

Summary



Cycle réel vs cycle idéalisé



• Autres considérations pratiques

- Frottement visqueux dans le liquide
- Niveau de surrefroidissement
- Isolation imparfaite du compresseur

Thermodynamique

Ces deux types de cycles utilisent un travail externe pour transférer de la chaleur à l'encontre d'un grand réservoir de température et par conséquent, on a vu qu'il faut savoir quelle application est visée. Pour pouvoir calculer un coefficient de performance. Nous avons également vu un cycle idéal qui permet une analyse thermodynamique et considérer les propriétés principales des fluides frigorigènes utilisés dans les cycles.

Notes

Summary



8m 41s