



UNIVERSITÉ  
LIBRE  
DE BRUXELLES



# Thermodynamique appliqué

Cycles frigorifiques

*Alessandro Parente*

-  16/11 - Cycle de Rankine et Rankine-Hirn (2h)
-  23/11 - Cycles de Joule, Ericsson, Otto, Stirling, Diesel (3h)
-  30/11 - Cycles frigorifiques et Relations thermodynamiques (3h)
-  7/12 - Mélanges de gaz (2h)
-  13/12 - Combustion (2h) + questions

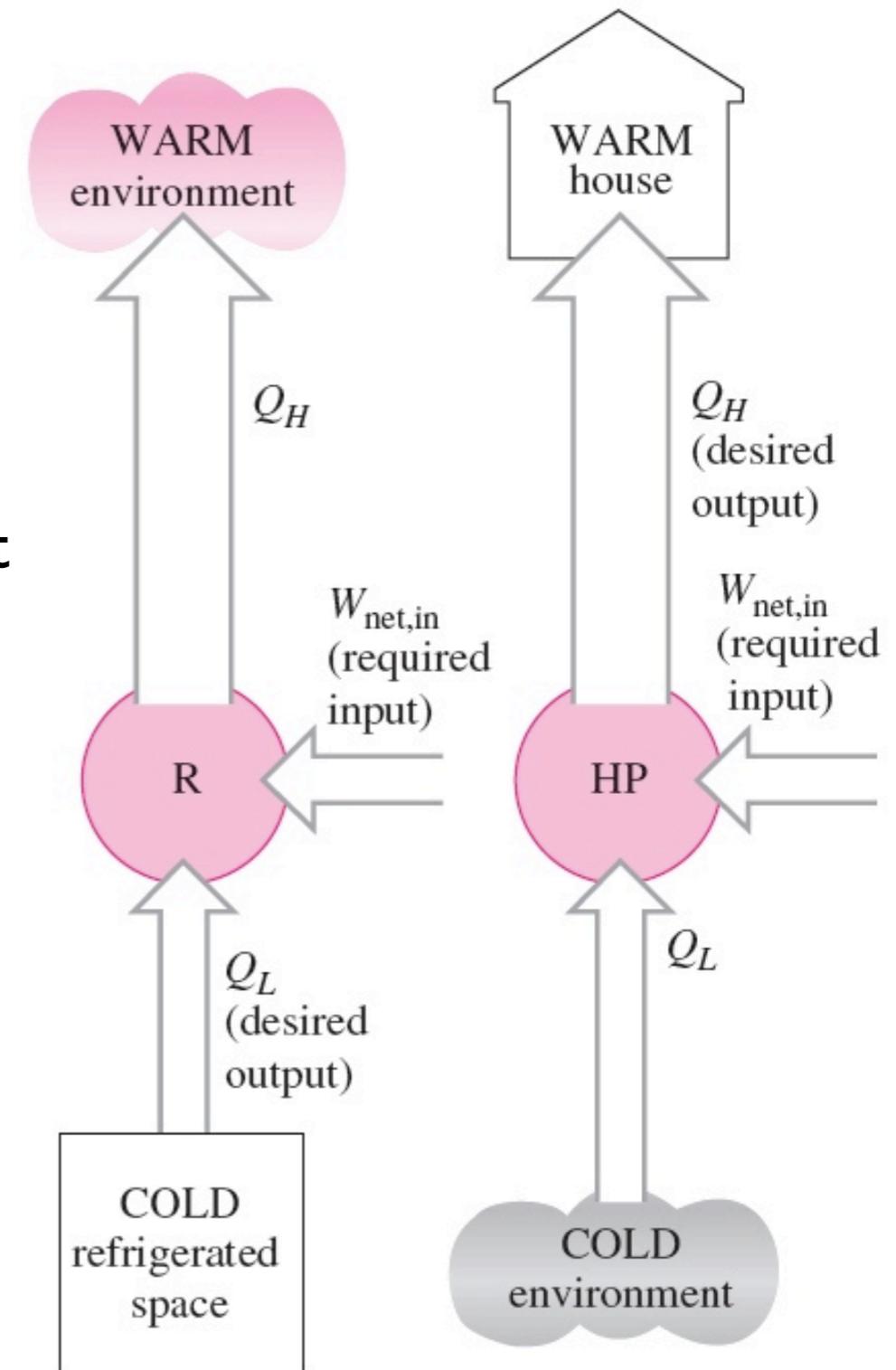
- Introduction
- Cycle de Carnot inverse
- Cycle frigorifique à compression de vapeur
  - Cycle de Rankine-Hirn inverse
    - Cycle idéal
    - Cycle réel
    - Choix du fluide frigorigène
  - Cycle frigorifique multi-étages
  - Cycle frigorifique à compression étagée
  - Cycle frigorifique à absorption d'ammoniac
- Cycle frigorifique à air
  - Cycle de Joule inverse
  - Cycle de Joule inverse à récupération

## Cycles frigorifiques

- Cycles moteurs parcourut en sens inverse pour transférer de la chaleur d'une source froide à une source chaude (réfrigérateur, pompe de chaleur)
- Second principe de la thermodynamique: flux de chaleur dans la direction opposée au gradient de température → un travail doit être fourni
- Cycles utilisés: Rankine-Hirn, Joule, et Stirling-Ericsson

## Effet utile

- Réfrigérateur: chaleur emportée à la source froide,  $Q_F$  ( $Q_L$ )
- Pompe de chaleur: chaleur donnée à la source chaude  $Q_C$  ( $Q_H$ )



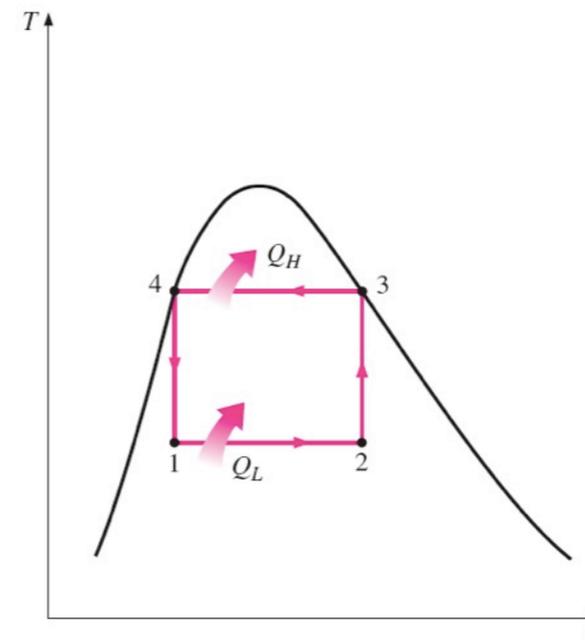
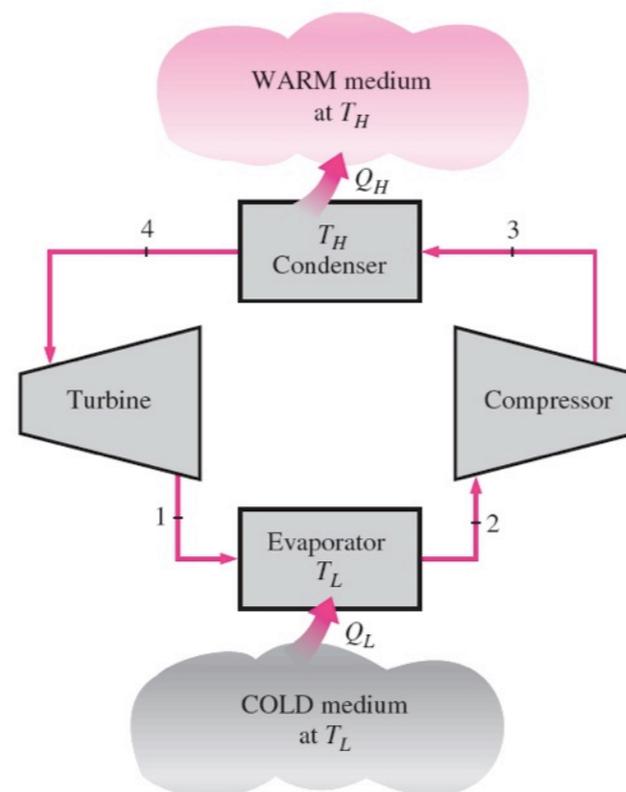
## Coefficients de performance (effet utile/effet onéreux)

- Réfrigérateur  $COP_R = \epsilon_R = \frac{Q_F}{W_{in}}$
- Pompe de chaleur  $COP_{PC} = \epsilon_{PC} = \frac{Q_C}{W_{in}}$
- Relation entre les COP  $Q_C = W_{in} + Q_F$   $COP_{PC} = COP_R + 1$

- **Cas idéal:**  $COP_{PC} > 1$  (pompe de chaleur  $\rightarrow$  réchauffeur à résistance)
- **En réalité:** chaleur perdue vers l'extérieur (tuyauterie, coibentation imparfaite)  $\rightarrow COP_{PC} < 1$   
si l'air est trop froid  $\rightarrow$  utilisation de combustibles

## Cycle de Carnot inverse

- Cycle de rendement maximum pour un système frigorifique idéal
  - 1-2 - Le fluide réfrigérant est vaporisé avec la chaleur extraite de la source froide à  $T_F$  (celle frigorifique)
  - 2-3 - Le fluide réfrigérant est comprimé de façon isentropique jusqu'à l'état 3 (la température atteint  $T_C$ )
  - 3-4 - Le fluide réfrigérant est condensé avec la chaleur adsorbée à la source chaude à  $T_C$
  - 4-1 - Le fluide réfrigérant est détendu à basse pression (mélange liquide-vapeur)




 Cycle de Carnot inverse

- Coefficients de performance

- Réfrigérateur

$$\epsilon_{R,Carnot} = \frac{q_F}{w_{in}} = \frac{q_F}{|q_C| - q_F} = \frac{T_F (s_2 - s_1)}{T_C (s_3 - s_4) - T_F (s_2 - s_1)}$$

$$\epsilon_{R,Carnot} = \frac{1}{\frac{T_C}{T_F} - 1} \quad \text{car} \quad s_3 = s_2 \quad s_4 = s_1$$

- Pompe de chaleur

$$\epsilon_{PC,Carnot} = \frac{|q_C|}{w_{in}} = \frac{|q_C|}{|q_C| - q_F} = \frac{T_C (s_3 - s_4)}{T_C (s_3 - s_4) - T_F (s_2 - s_1)}$$

$$\epsilon_{PC,Carnot} = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}} \quad \text{car} \quad s_3 = s_2 \quad s_4 = s_1$$

## Cycle de Carnot inverse

- Considérations générales

- Echanges de chaleur  $T=cte$  1-2 et 3-4

- Facilement réalisables dans un condenseur ou dans un évaporateur (la pression fixe automatiquement la température pour un mélange liquide-vapeur d'un composant pur).

- Compression 2-3

- Compression d'un mélange liquide-vapeur → compresseur volumétrique (système cylindre-piston)

- Expansion 4-1

- Expansion d'un mélange liquide-vapeur avec teneur en liquide très élevée (partie gauche la cloche de saturation) → impossible avec une turbine

- Solutions

- Réalisation du cycle de Carnot hors de la cloche de saturation

- Conditions non-isothermes lors des échanges de chaleur (irréversibilités)

### Cycle de Carnot inverse

- Impossible à réaliser en pratique
- Référence pour évaluation performances cycles réels

 Classement des machines frigorifiques selon les applications et les plages de température correspondantes

- **De l'ambiance à 5-10 °C**

- conditionnement d'air, applications alimentaires

- **De +10 °C à -18 °C**

- conservation des denrées alimentaires, production de glace, congélation

- **De -18 °C à -40 °C**

- surgélation (conservation de denrées périssables pendant plusieurs mois).

- **Jusque -200 °C**

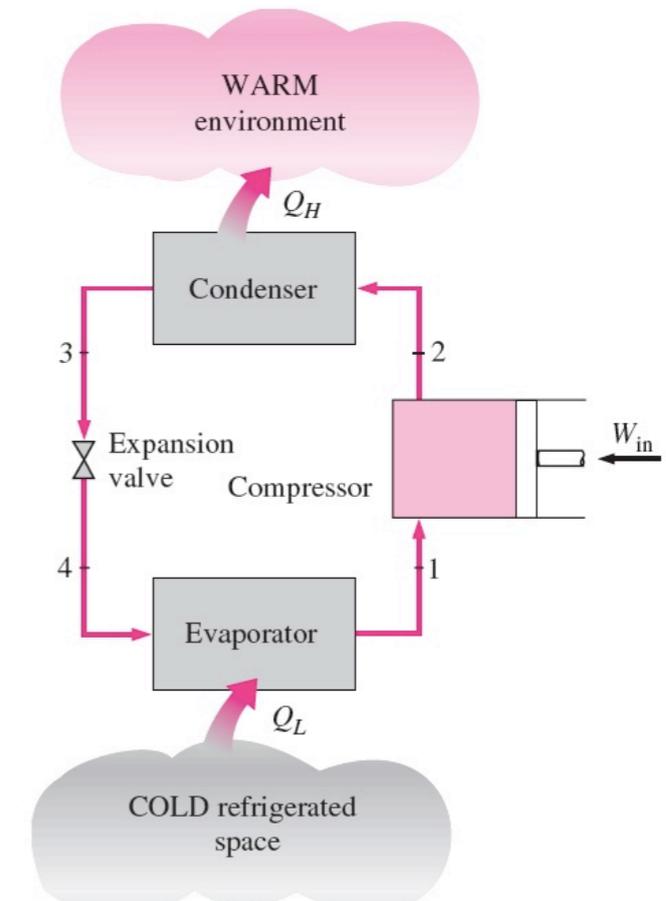
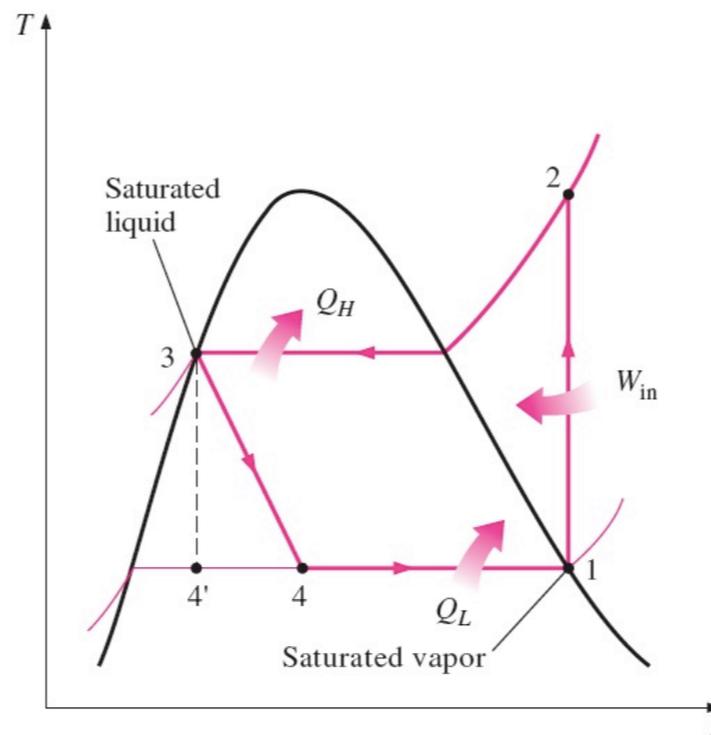
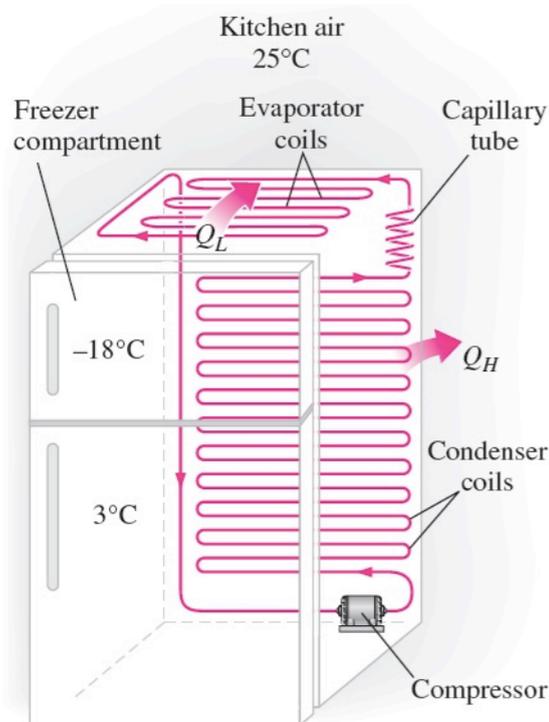
- applications industrielles notamment liées à l'industrie chimique ou alimentaire : liquéfaction de l'air et du gaz naturel, lyophilisation.

- **Sous -200 °C (< température de liquéfaction de l'azote (77 K))**

- applications industrielles très limitées (propulsion par fusée à hydrogène et oxygène liquide, aimants à très haute induction, ...)

## Cycle frigorifique à compression de vapeur

- Cycle idéal pour les réfrigérateurs
  - Cycle de Rankine-Hirn inversé (pompe remplacée par une vanne)
- Transformations
  - compression adiabatique et réversible 1-2
  - refroidissement isobare par condensation 2-3
  - détente irréversible sans échange de travail 3-4
  - échauffement isobare par évaporation 4 - 1



## Analyse énergétique

- Echanges de chaleur isobare,  $q = \Delta h$
- Compression adiabatique,  $w = \Delta h$
- Détente isenthalpique,  $w = 0, q = 0$

• Compresseur ( $q=0$ )

$$w_c = h_2 - h_1$$

• Condenseur ( $w=0$ )

$$q_C = h_3 - h_2$$

• Vanne ( $q=w=0$ )

• Evaporateur ( $w=0$ )

production frigorifique nette (PFN)

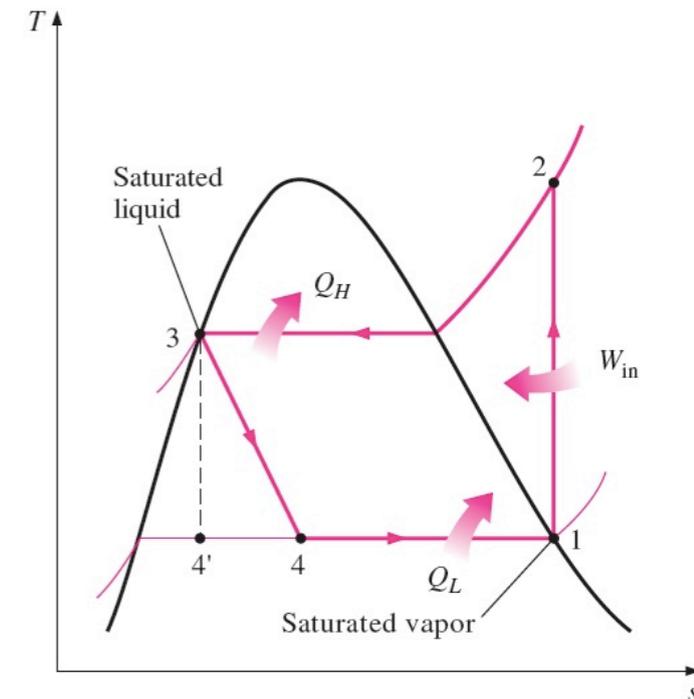
$$q_F = h_1 - h_4$$

• Coefficient de performance

$$\epsilon_{fr} = \frac{q_F}{w_c} = \frac{q_F}{|q_C| - q_F} = \frac{1}{\frac{|q_C|}{q_F} - 1} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

• Rendement exergetique

$$\eta_{ex} = \frac{\epsilon_{fr}}{\epsilon_{fr,Carnot}} = \epsilon_{fr} \left( \frac{T_C}{T_F} - 1 \right) < 1$$

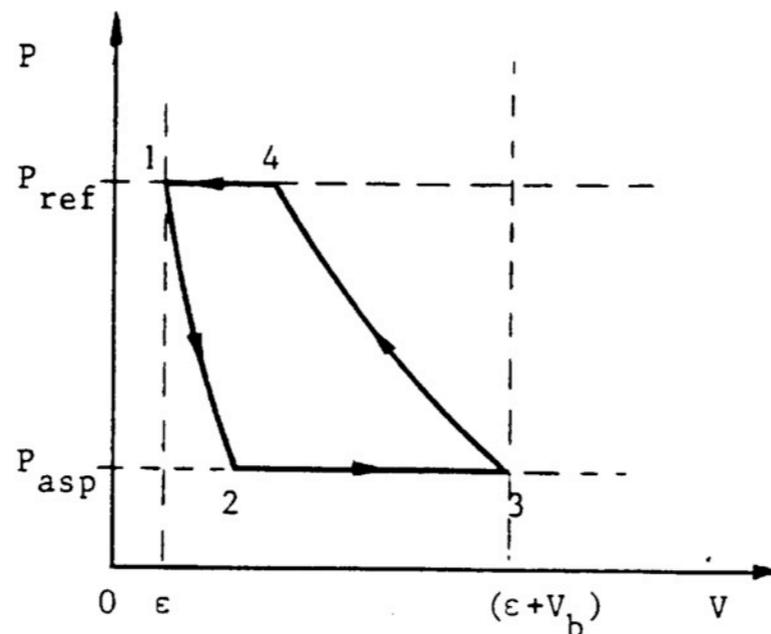
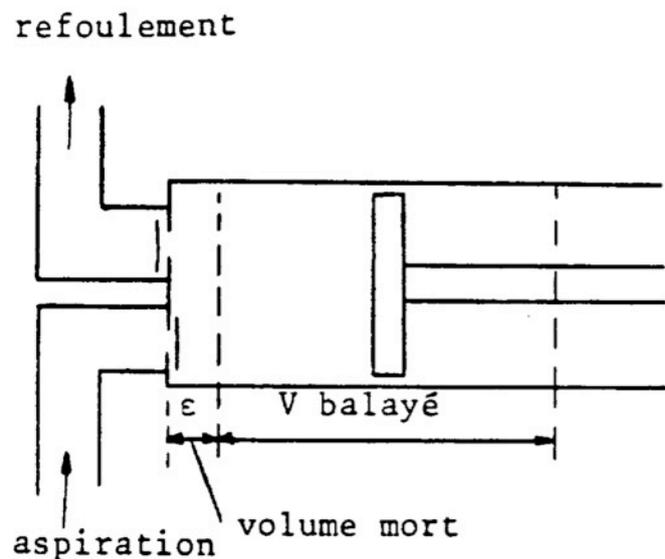


## Considérations sur le compresseur

- De type volumétrique (à piston, à palette ou à vis).
- Puissance volumétrique par unité de débit volumétrique aspiré par le compresseur, appelée production frigorifique volumétrique (PFV):

$$PFV = \frac{q_F}{v_1} = \frac{h_1 - h_4}{v_1}$$

► Volume aspiré  $\neq$  volume balayé  $\rightarrow$  coefficient de remplissage  $k_v = \frac{V_{asp}}{V_{bal}}$



- **Gaz dans le volume mort à  $P_{admission}$** 

$$V_2 = \epsilon \left( \frac{P_{ref}}{P_{adm}} \right)^{\frac{1}{k}}$$

Détente adiabatique (s=cste)
- **Volume aspiré**

$$V_{asp} = \epsilon + V_b - V_2 = V_b - \epsilon \left[ \left( \frac{P_{ref}}{P_{adm}} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right]$$

## Considérations sur le compresseur

- Coefficient de remplissage:

$$k_v = 1 - \frac{\epsilon}{V_b} \left[ \left( \frac{p_{ref}}{p_{adm}} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right]$$

- Fonction des caractéristiques du compresseur ( $\epsilon, V_b$ )
- Fonction du rapport de compression, lié aux températures des sources.
- Production frigorifique par unité de volume balayé

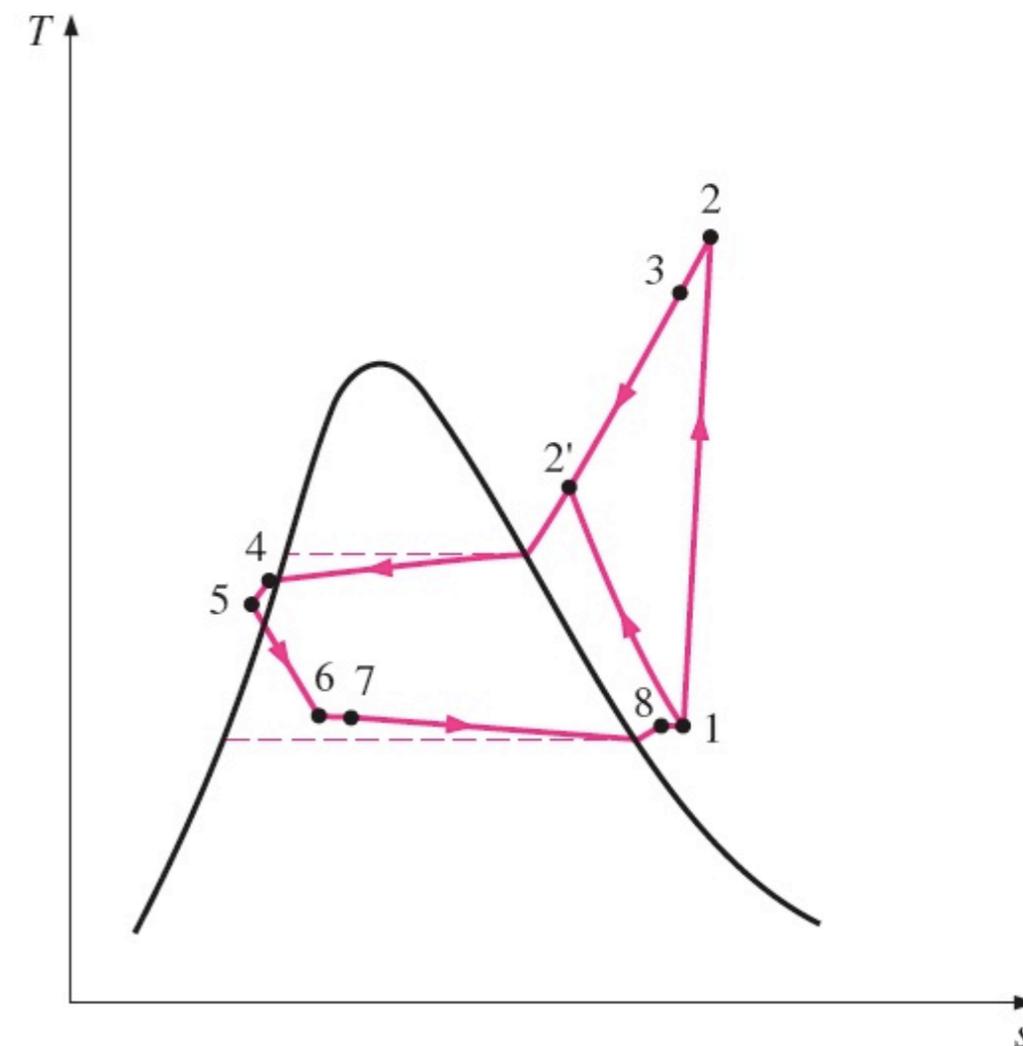
$$PFV_b = PFV \cdot k_v$$

- Diminue rapidement avec la température de la source froide (augmentation de  $v_1$  et diminution de  $k_v$ )
- Nulle pour la température |  $k_v=0$  (température minimum de fonctionnement)

$$k_v = 0 \quad \rightarrow \quad T_{ref} = T_{adm} \left( \frac{V_b}{\epsilon} + 1 \right)^{k-1}$$

## Cycle réel vs, cycle idéal :

- Condenseur non parfait (pertes de charge)
  - Liquide sous-refroidi (5)
- Evaporateur non parfait (pertes de charge)
  - Vapeur surchauffée (8)
- Surchauffe de la vapeur entre la sortie de l'évaporateur et l'entrée du compresseur
- Irréversibilités dans le compresseur
  - Friction et échanges de chaleur dans le compresseur
    - Processus «adiabatique» réel (processus 1-2): augmentation de l'entropie
    - Soustraction de chaleur pendant la compression (processus 1-2'): réduction d'entropie ( $<$  volume spécifique)  $\rightarrow <$  puissance mécanique (désirable!)





## • Choix du fluide frigorigène - contraintes thermodynamiques, technologiques et liées à la santé:

- Plage de température

- $T_F$  et  $T_C$  comprises entre le point triple et le point critique.
- $p_1 = p_{\text{sat}}(T_F)$  supérieure à la pression atmosphérique (éviter rentrées d'air dans le système, et pour réduire l'encombrement -  $PFV \propto p_1$ )
- $p_2 = p_{\text{sat}}(T_C)$  inférieure à 2 MPa
- $p_2/p_1$  faible  $\rightarrow$  coût du compresseur, température  $T_2$  de fin de compression (stabilité thermique et chimique du fluide)

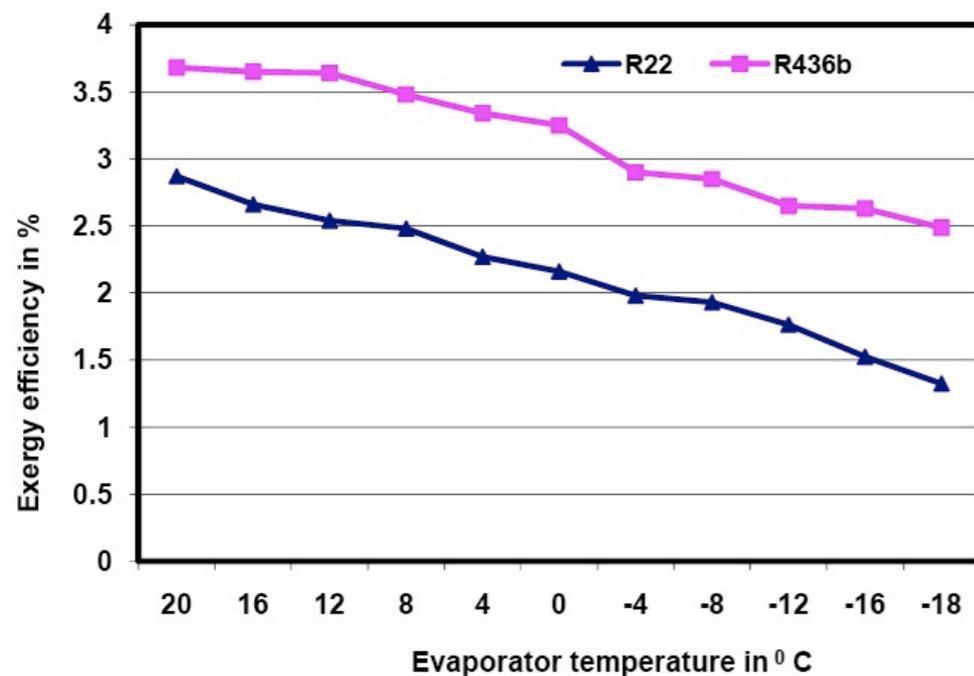
- Efficacité frigorifique

- Maximisation de  $\eta_{ex}$  : fonction du fluide et des températures des sources.

$$\eta_{ex} = \frac{\epsilon_{fr}}{\epsilon_{fr,Carnot}} = \epsilon_{fr} \left( \frac{T_C}{T_F} - 1 \right) < 1$$

## Choix du fluide frigorigène

- Efficacité frigorifique



$$\eta_{ex} = \frac{\epsilon_{fr}}{\epsilon_{fr,Carnot}} = \epsilon_{fr} \left( \frac{T_C}{T_F} - 1 \right) < 1$$

- Compatibilité avec les huiles de lubrification

- Solubilité de l'huile dans le fluide fonction de la température (séparation de deux phases liquides dans l'évaporateur)

- Toxicité

- Classification dans 6 groupes de toxicité décroissante.
    - SO<sub>2</sub> et autres abandonnés en raison de leur grande toxicité (SO<sub>2</sub>).

## Choix du fluide frigorigène

- Compatibilité avec les matériaux de construction
  - Réfrigérant physiquement et chimiquement inerte vis-à-vis des matériaux de construction.
- Nocivité pour l'environnement
  - Fuites de réfrigérant vers l'environnement
- Coût
  - Impact du coût du réfrigérant pour les grandes installations

## Classes de réfrigérants

- Hydrocarbures fluorés saturés (fréon, chloro-fluoro-carbones (CFC))
  - Désigne selon la nomenclature  $R_{ijk}B_r$  (Institut International du Froid)
    - $i$ =nombre d'atomes de carbone-1,  $j$  = nombre d'atomes d'hydrogène + 1,  $k$  = nombre d'atomes de fluor,  $r$  = nombre d'atomes de brome (ex R-22 →  $n_C=1$ ,  $n_{H2}=1$ ,  $n_{Fl}=1$ ,  $n_{Br}=0$ )
  - Applications
    - R-11 → conditionnement d'air (refroidisseur eau)
    - R-12 → réfrigérateurs domestiques et congélateurs, conditionnement d'air voitures
    - R-22 → conditionnement d'air, pompe de chaleur, systèmes de réfrigération industriels
  - Fluor → Composés très stables
    - ininflammables et non toxiques, compatibles avec les matériaux de construction, certaines huiles et les élastomères.
    - décomposés par des réactions photochimiques dans la stratosphère (consommation de l'ozone stratosphérique) → composés sans chlore HFC (R134a)
  - Largement étudiées: propriétés publiées par les producteurs et divers organismes scientifiques (tables dans TESTCenter)



- Ammoniac

- Applications:

- Réfrigération de produits alimentaires (fruits, légumes, poisson, viande)
    - Conservation des boissons (bière, vin, lait)
    - Production de glace
    - Industrie pharmaceutique

- PFN plus élevée (débits plus faibles) → COP plus élevés

- Propriétés thermodynamique et de transport favorables → coefficients d'échange plus élevés (petits échangeurs de chaleur)

- facilement détectable en cas de pertes

- Aucun effet sur l'ozone de la stratosphère

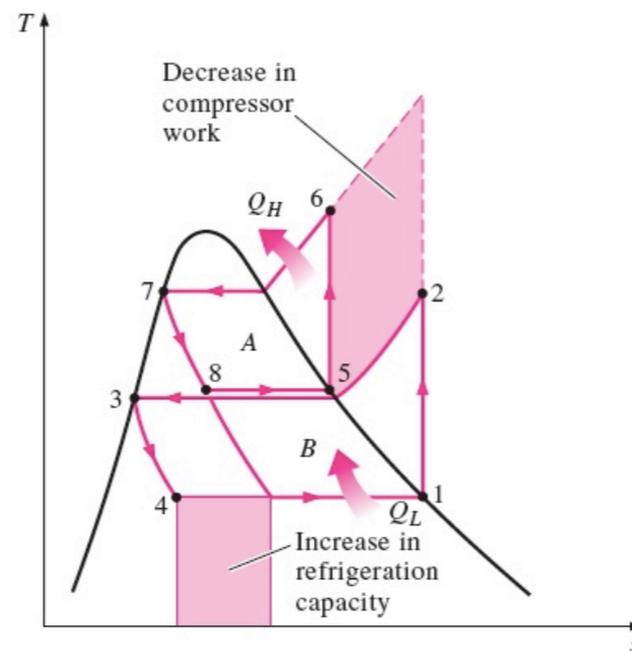
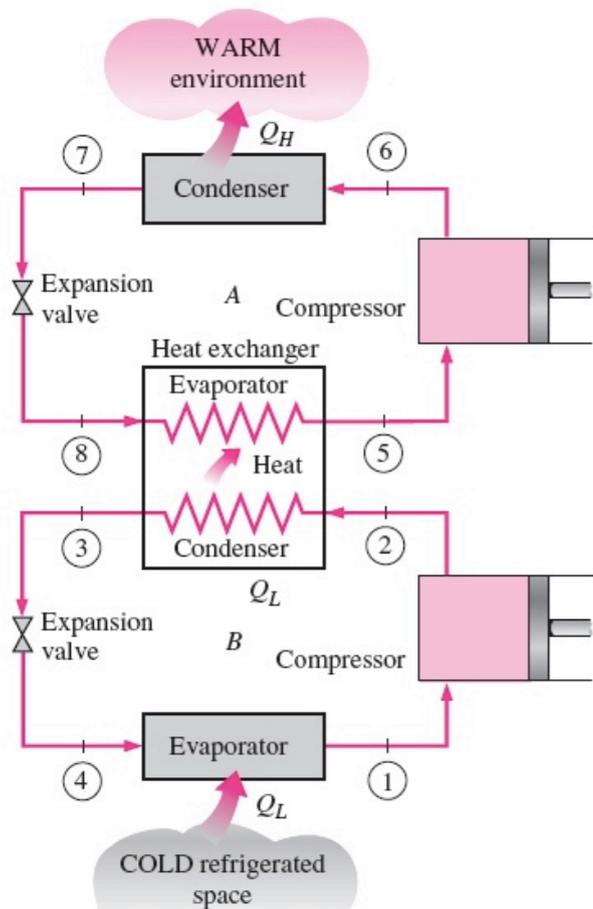
- Peu coûteux (largement utilisé pour les installations de moyenne et de grande puissance,)

- **Fortement toxique**

- **Réactivité chimique (corrosion du cuivre)**

## Applications:

- Fenêtre de température trop large pour un seul cycle frigorifique à compression de vapeur
  - Forte variation de pression → baisses prestations du compresseur volumétrique
  - Réalisation du cycle frigorifique en deux étages (cycle en cascade)
    - Deux cycles en communication avec un évaporateur (haut) / condenseur (bas)



### Echangeur de chaleur idéal

$$\dot{m}_A (h_5 - h_8) = \dot{m}_B (h_2 - h_3)$$

$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_5 - h_8)}$$

### Coefficients de performance

$$\epsilon_{fr,c} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{\dot{m}_B (h_1 - h_4)}{\dot{m}_A (h_6 - h_5) + \dot{m}_B (h_2 - h_1)}$$



## Application

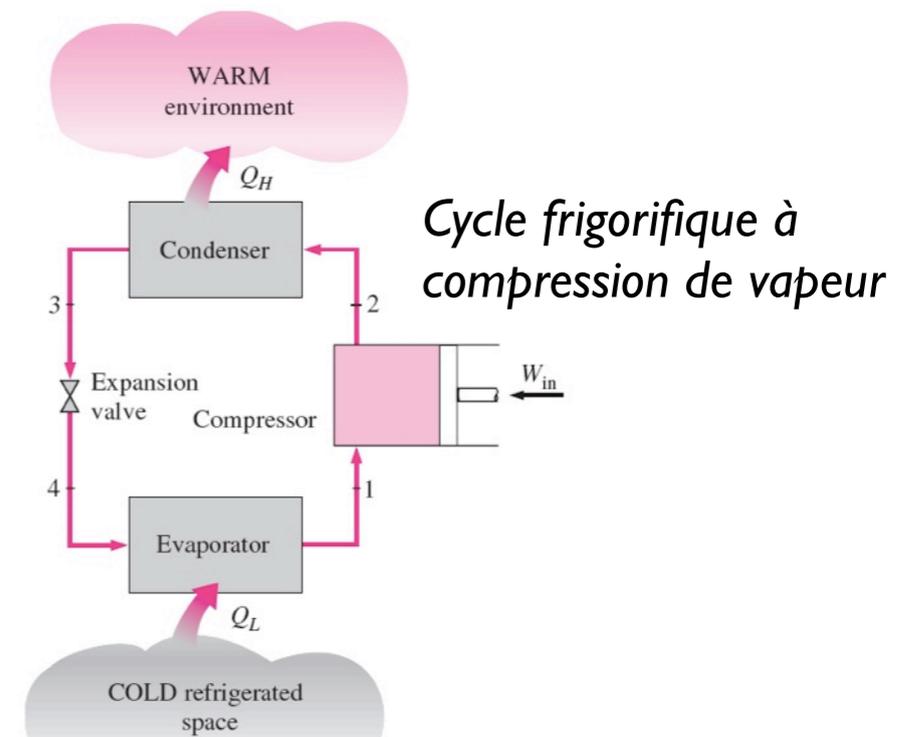
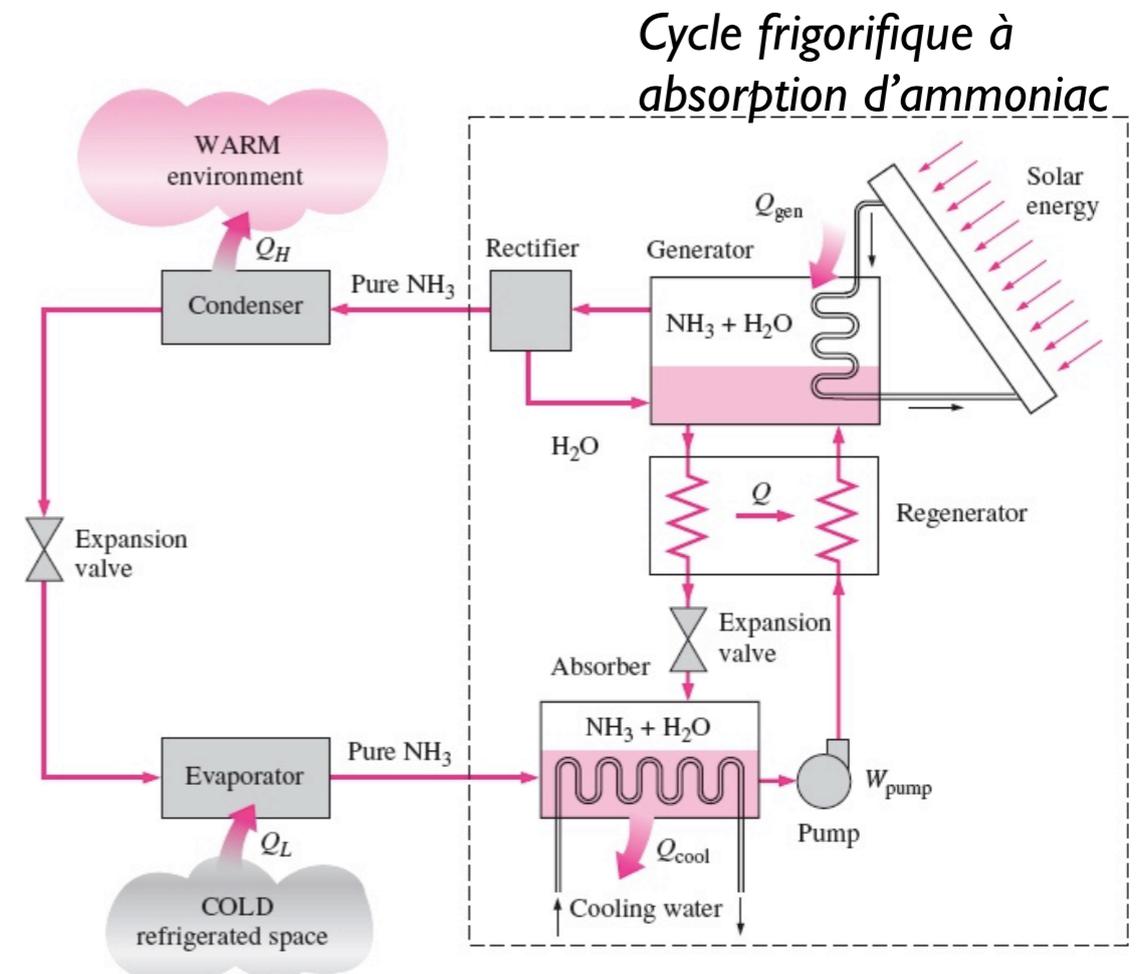
- Disponibilité d'une source chaude (en plus de la source gratuite à température ambiante) → extraction de la chaleur d'une source froide sans apport de travail (machine frigorifique tritherme).
- Solutions technologiques
  - Machines frigorifiques composées d'une machine thermique fonctionnant entre la source chaude et l'ambiance, qui entraîne une machine frigorifique à compression de vapeur
  - Machines à absorption de vapeur (ammoniac)
    - Efficacité thermique faible (utiles pour valoriser une source chaude à température modérée, i.e. rejets industriels, énergie solaire, biomasse) → efficacité peu d'importante
    - Avantages
      - Pas de machines tournantes (sauf une pompe volumétrique)

## Composants de la machine

- compresseur chimique, formé de l'ensemble bouilleur-absorbeur
- un ensemble condenseur-vanne-évaporateur identique à celui des machines à compression

## Fonctionnement

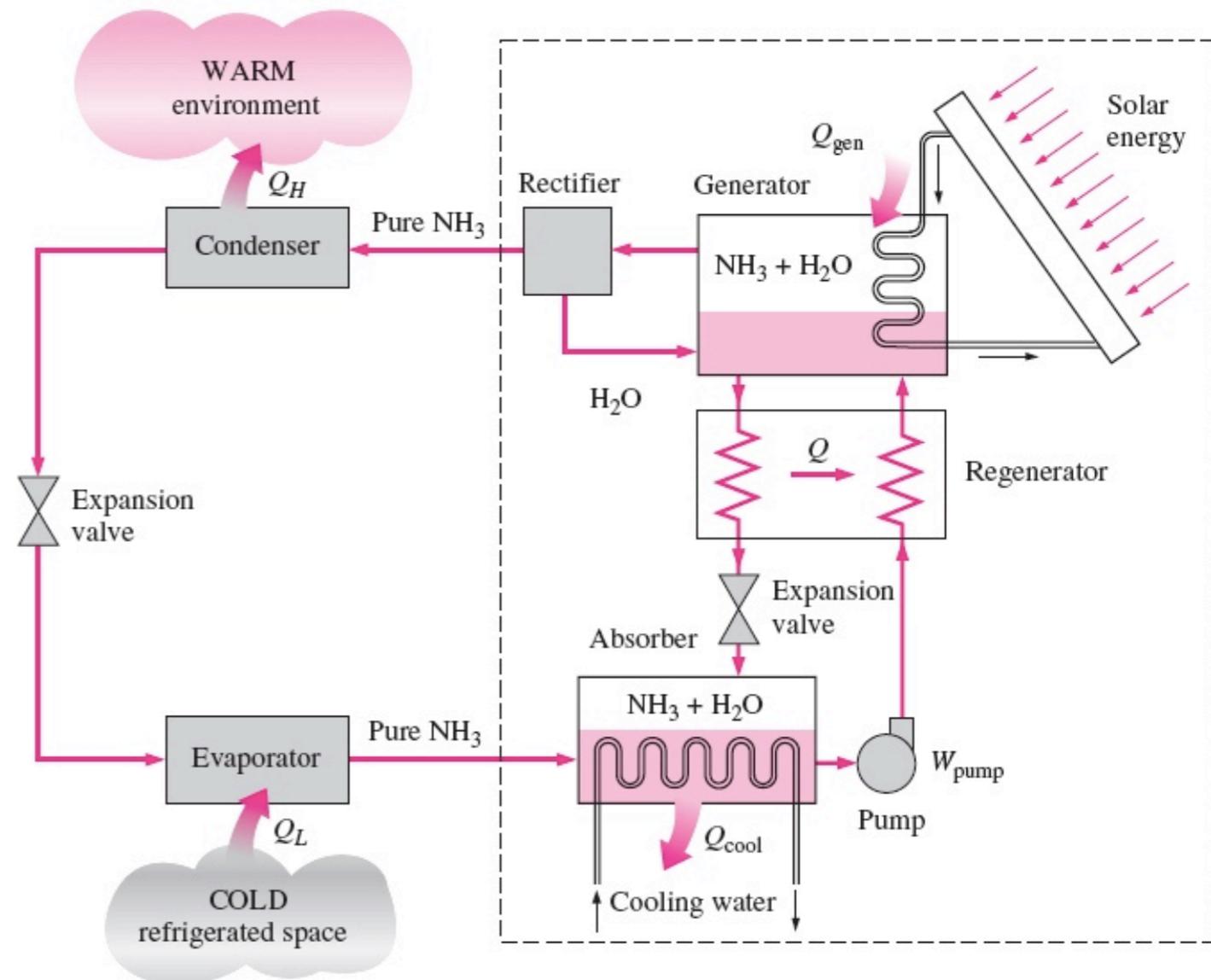
- Compresseur chimique
  - Mélange comprenant un réfrigérant volatil (ammoniac) et un solvant peu volatil (eau)



## Fonctionnement

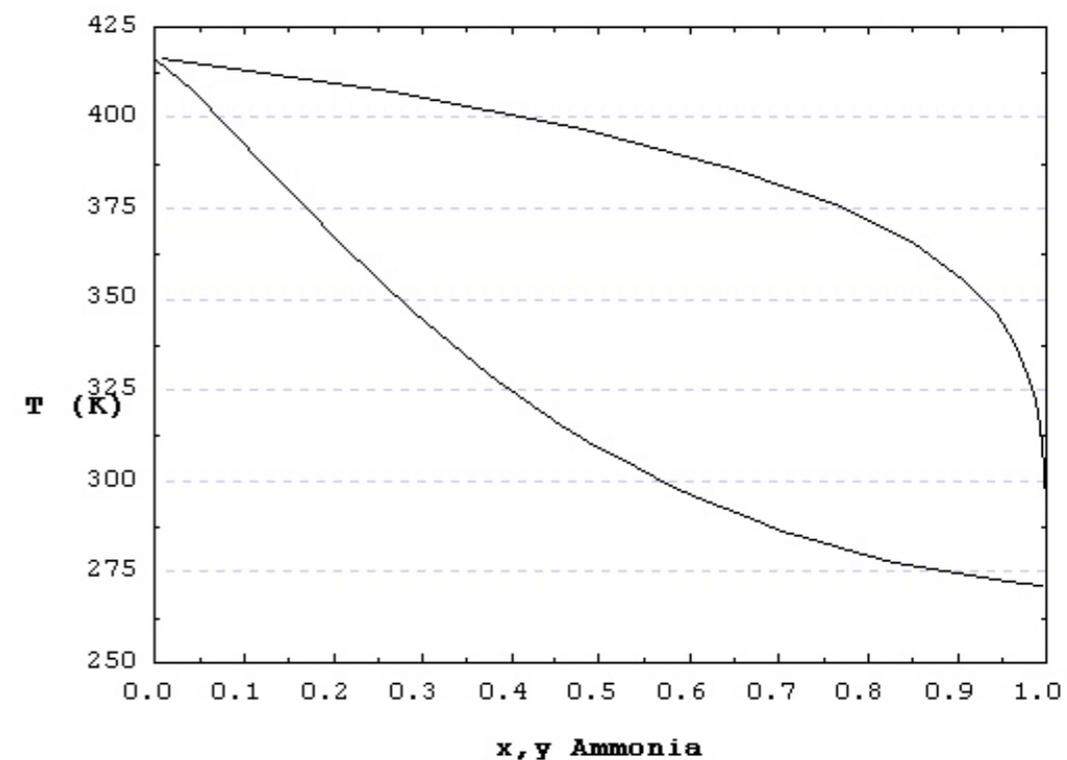
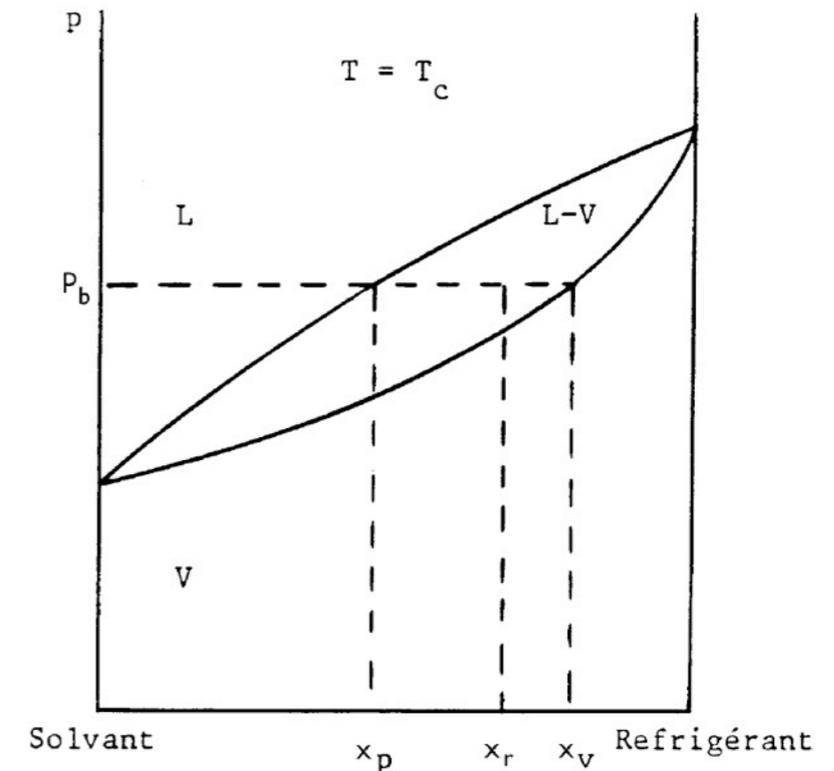
### • Compresseur chimique

- Evaporateur: vapeur d'ammoniac pure
- Absorbeur: réaction  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  avec production de chaleur. Quantité de  $\text{NH}_3$  dans l'eau fonction de la température (refroidissement nécessaire)
- Solution  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  envoyée au bouilleur → vaporisation partielle du mélange
- Vapeur riche en  $\text{NH}_3$  envoyée au séparateur (*rectifier*)  $\text{NH}_3 \rightarrow$  Eau renvoyée au bouilleur (à la température de la source chaude et à haute pression)
- $\text{NH}_3$  à haute pression continue un cycle classique de compression de vapeur
- Solution chaude  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  (à la température de la source gratuite), pauvre en  $\text{NH}_3$  envoyée à l'absorbeur (à la température la source gratuite et à basse pression)



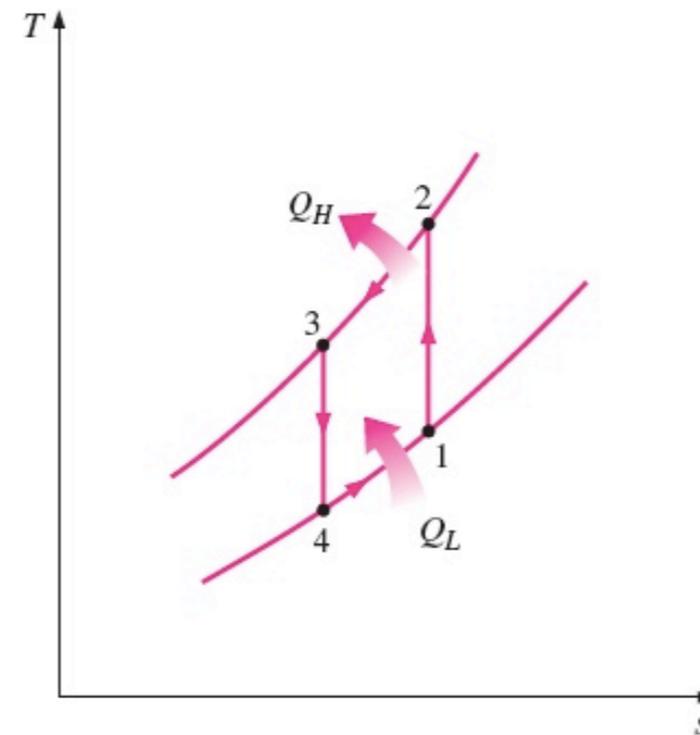
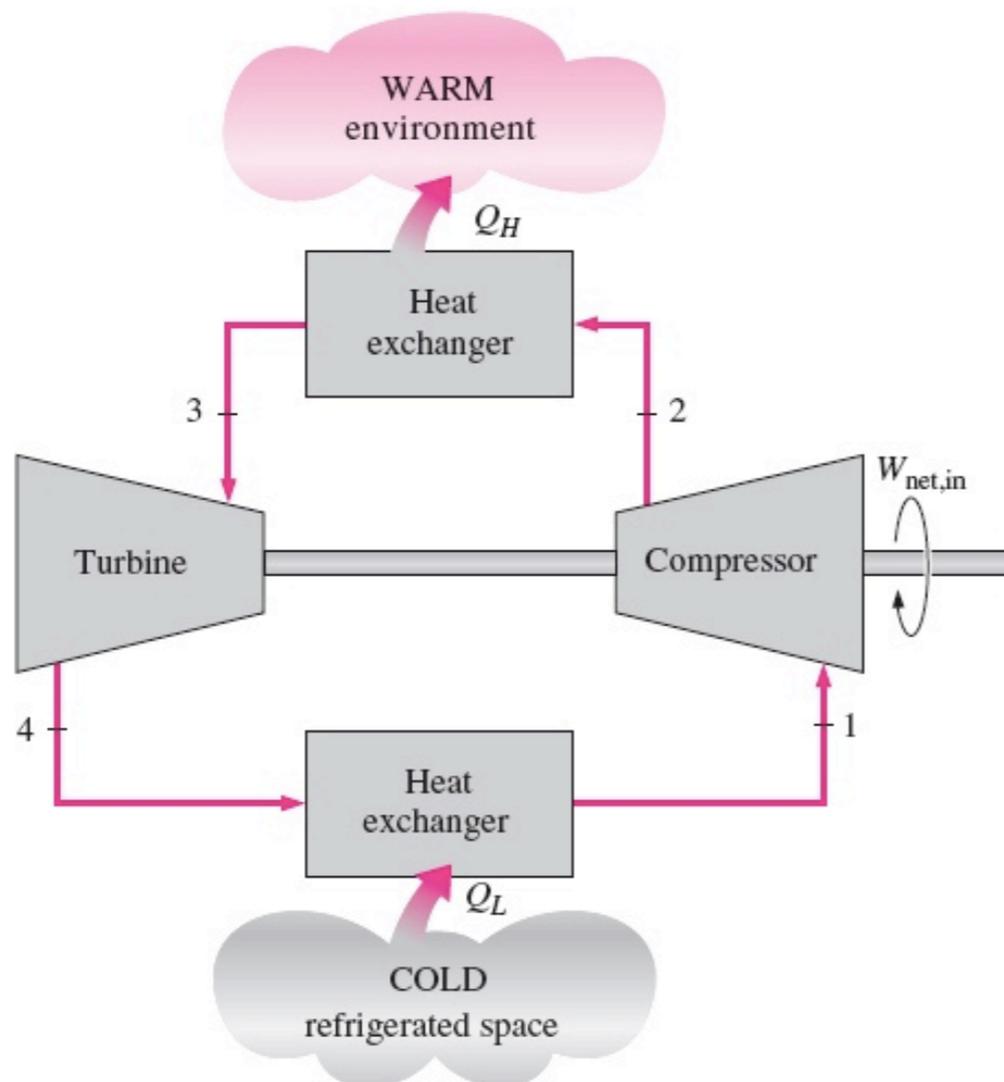
## 📌 Pourquoi cela marche??? (les chimistes)

- Equilibre des phases liquide/vapeur d'un tel mélange en fonction de son titre et de la pression
  - Principe de la distillation
    - Pression  $p_b$ : mélange de titre massique en réfrigérant  $x_r$  se sépare en une phase vapeur plus riche (titre  $x_v$ ) en réfrigérant volatil et un liquide plus pauvre (titre  $x_p$ )
- Vapeur riche en réfrigérant
  - condensée à température ambiante dans le condenseur
  - détendue dans la vanne
  - évaporée à basse température dans l'évaporateur.
  - absorbée par le liquide pauvre dans l'absorbeur pour reformer un mélange de titre  $x_r$ .
- Analyse détaillée du processus permettant de calculer l'efficacité frigorifique est assez complexe (J. Bougard, Thermodynamique technique)



## Cycle frigorifique à air

- Cycle de Joule inversé.
- Puissance récupérable lors de la détente n'est pas négligeable → turbine (vanne dans le cycle à compression de vapeur)




 Analyse énergétique

- Echanges de chaleur isobare,  $q=\Delta h$
- Compression, détente adiabatique,  $w=\Delta h$

- Compresseur ( $q=0$ )

$$w_c = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

- Source chaude ( $w=0$ )

$$q_{SC} = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2)$$

- Turbine ( $q=0$ )

$$w_t^* = h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4)$$

- Source froide ( $w=0$ )

Production Frigorifique Nette (PFN)

$$PFN = q_{SF} = h_1 - h_4 = c_p (T_1 - T_4)$$


 Analyse énergétique

- *Efficacité thermique*

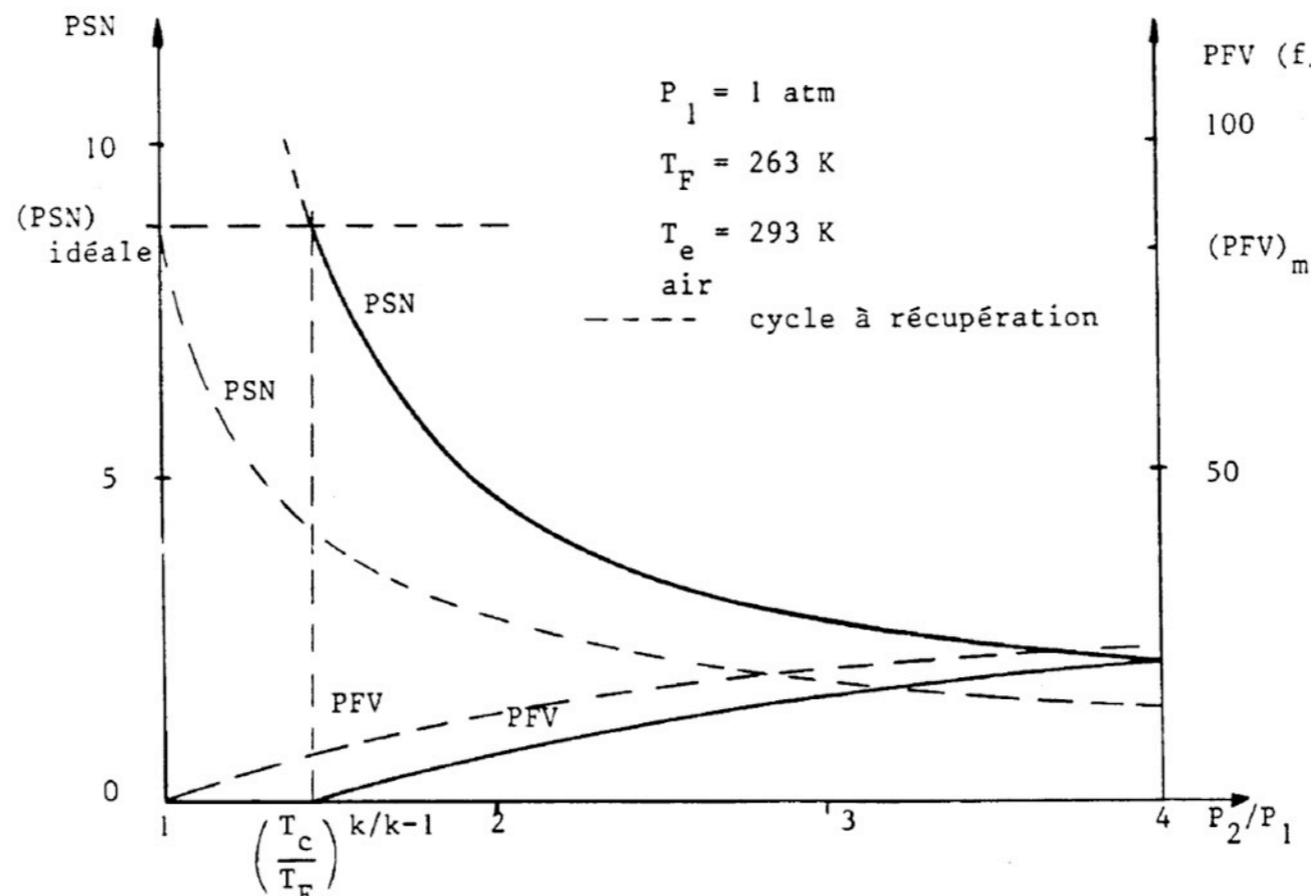
$$\epsilon_{fr} = COP = \frac{PFN}{w_c - w_t^*} = \frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)} = \frac{1}{\frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_4} - 1} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} - 1} = \frac{1}{\Pi^{\frac{k-1}{k}} - 1} < \frac{1}{\frac{T_C}{T_F} - 1}$$

- *Production frigorifique volumétrique (PFV)*

$$PFV = \frac{c_p (T_1 - T_4)}{v_1} = \frac{c_p (T_1 - T_4)}{\frac{RT_1}{p_1}} = \frac{c_p p_1}{R} \left(1 - \frac{T_4}{T_1}\right) = \frac{c_p p_1}{R} \left(1 - \frac{T_3}{T_1} \Pi^{\frac{1-k}{k}}\right)$$

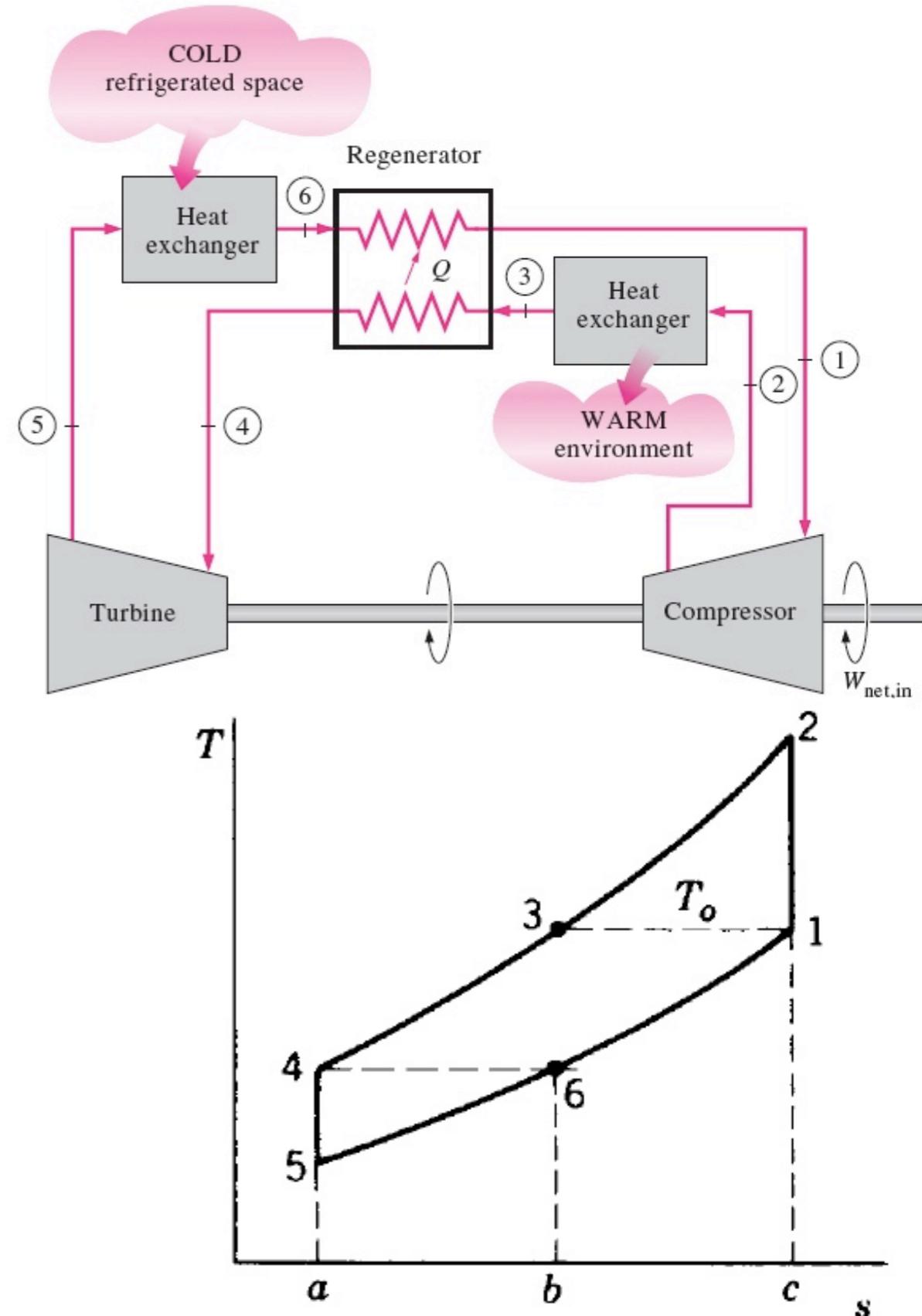
## Considérations générales

- Rapports de pression modérés → le COP diminue rapidement
- COP réduit ultérieurement (facteur 3) dans le cas réel
- Machines frigorifiques pas compétitives avec les machines à compression de vapeur
- Faible poids → conditionnement d'air des avions



## Cycle de Joule inverse à récupération (échangeur de chaleur)

- Sans récupération
  - Plus basse température d'entrée en turbine =  $T_{\text{ambient}}$
- Avec récupération
  - Température réduite à  $T_3$  avant l'expansion → température à la sortie de la turbine plus basse (température minimum du cycle)
- Températures très basses en un seul étage → très compétitive et utilisées dans les installations à très basse température (liquéfacteurs)
- Gaz utilisé → non nécessairement de l'air




 Analyse énergétique

- *Compresseur* ( $q=0$ )

$$w_c = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

- *Source chaude* ( $w=0$ )

$$q_{SC} = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2)$$

- *Turbine* ( $q=0$ )

$$w_t^* = h_4 - h_5 = c_p (T_4 - T_5)$$

- *Frigorifique Nette (PFN)*

$$PFN = q_{SF} = h_6 - h_5 = c_p (T_6 - T_5)$$

- *Efficacité thermique*

$$\epsilon_{fr} = \frac{T_6 - T_5}{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_5)} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_6} - 1} = \frac{1}{\frac{T_1}{T_6} \Pi^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

- *Production frigorifique volumétrique (PFV)*

$$PFV = \frac{c_p (T_6 - T_5)}{\frac{RT_1}{p_1}} = \frac{c_p p_1}{R} \left( \frac{T_6 - T_5}{T_1} \right)$$