



Module
**Machines Frigorifiques
et Pompes à Chaleur**
- Plan d'activité -

3^{ème} année Licence *Energétique*

Partie Cours

Le contenu du programme est largement couvert par le chapitre 11
« Refrigeration cycles » ou « Les cycles de réfrigération » en version française
du livre,

Y.A. Cengel M.A. Boles,
Thermodynamics, An engineering Approach
McGrawHill

Travailler le chapitre, les paragraphes 11-1 à 11-7.
Les paragraphes 11-8 et 11-9 sont facultatifs mais restent recommandés.

Des vidéos sur la théorie et la technologie des machines à froid peuvent être
visualisées utilement, en voici une sélection,

https://www.youtube.com/watch?v=3XaLYG9yV_E

<https://www.youtube.com/watch?v=zw33M99Lrz8>

<https://www.youtube.com/watch?v=v20PORVRIp0>

Partie TD

Dans le même chapitre, on trouve présentés des exercices de cours.
Bien d'autres exercices sont proposés en fin de chapitre.

Deux (02) séries de TD sont jointes ci-après; des indications pour arriver aux réponses sont données.

Deux sujets d'EMDs avec réponses sont également insérés.

Le travail personnel et une lecture régulière sont indispensables
à une bonne assimilation

Vous êtes encouragés à soumettre toute question et à soulever
toute difficulté rencontrée sur les notions présentées

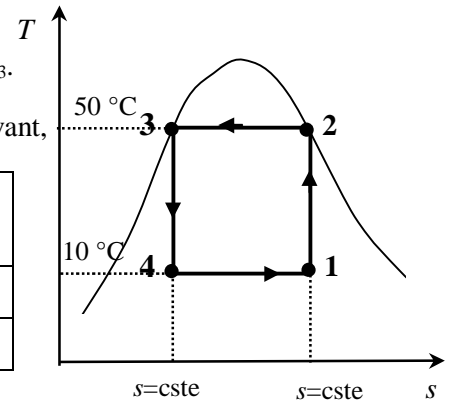
TD Machines Frigorifiques - N°1

Exercice 1

Soit un cycle frigorifique comme représenté sur la figure. Le cycle fonctionne entre 10 °C et 50 °C avec comme fluide de travail H₂O ou NH₃.

1/ A partir des propriétés disponibles sur les tables, remplir le tableau suivant,

	Froid produit Q_F (kJ/kg)	Chaleur rejetée Q_H (kJ/kg)	Travail produit W_{prd} (kJ/kg)	Travail absorbé W_{abs} (kJ/kg)	COP
H ₂ O					
NH ₃					



2/ Comparer les deux COPs calculés. Expliquer.

3/ Pour une même puissance frigorifique \dot{Q}_F , quel est le rapport des débits $\dot{m}_{NH_3} / \dot{m}_{H_2O}$.

Exercice 2

Une enceinte doit être maintenue à une température inférieure à la température ambiante, 25 °C. On utilise pour cela une machine à froid, la puissance mécanique qu'elle absorbe est de 100 W. Les infiltrations thermiques du milieu vers l'intérieur de l'enceinte sont estimées à 350 W. Quelle est la température minimale que l'on peut maintenir à l'intérieur de l'enceinte ?

Exercice 3

Un réservoir isolé thermiquement referme une masse d'eau $M_1 = 10$ kg. Le réservoir comporte une ouverture permettant d'aspirer de la vapeur vers l'extérieur. Ce processus permet d'abaisser la température de l'eau puis de la solidifier.

1/ Représenter ce processus sur le diagramme Pression-Température.

2/ Calculer la masse de vapeur m qu'il faut extraire pour obtenir de l'eau solidifiée aux conditions du point triple. On admet qu'initialement l'eau liquide est aux conditions du point triple.

3/ La masse de vapeur calculée en 2 / est aspirée par un compresseur qui la refoule sous 1 bar. Calculer le travail total W absorbé par le compresseur. La compression est isentropique.

Exercice 4

Une chambre froide en régime permanent doit être maintenue à + 9°C. La température du milieu extérieur est de 30 °C. La puissance frigorifique nécessaire pour maintenir cette température est estimée à 4 kW. Pour permettre le transfert de chaleur entre l'air (dans l'enceinte) et le fluide frigorigène la température dans l'évaporateur doit être de + 5 °C.

Le liquide sort du condenseur à 35 °C. Faire une comparaison entre l'ammoniac et l'eau en calculant pour chaque fluide,

1/ Le débit massique \dot{m}_f nécessaire, la pression P dans l'évaporateur.

2/ Le débit volumique \dot{V}_f et le diamètre d à la sortie de l'évaporateur si la vitesse de la vapeur est limitée à 12 m/s.

3/ Ecrire le bilan d'entropie pour l'évaporateur. Calculer la production d'entropie $\dot{\sigma}$ et la puissance supplémentaire \dot{W}_{sup} consommée par le compresseur.

Indications TD1

Exercice 1

1/ Ecrire le bilan d'énergie (système ouvert en régime permanent) pour les sous-systèmes sièges des transformations 1-2, 2-3, 3-4 et 4-1. Calculer les travaux et les chaleurs échangés. Déduire pour tout le cycle le travail total absorbé, le travail total produit, la chaleur reçue, la chaleur cédée.

2/ Dans les deux cas, la valeur du COP doit être assez proche de 7,08. Cela étant prévisible...

3/ $\dot{m}_{NH_3} / \dot{m}_{H_2O} = 2,264 \text{ kg}_{NH_3} / \text{kg}_{H_2O}$

Exercice 2

Afin de maintenir la température froide à T_F , la machine frigorifique doit « pomper » et rejeter vers l'extérieur la chaleur infiltrée. Le meilleur résultat est celui que donne la machine réversible.

$T_F = -41,25^\circ\text{C}$

Exercice 3

1/ Dans le diagramme P - T de l'eau, les lignes de fusion, de vaporisation et de sublimation se rejoignent au point triple (pt) : $P_{pt} = 0,6117 \text{ kPa}$ et $T_{pt} = 0,01^\circ\text{C}$. Initialement l'eau est à l'état saturé et à température ambiante T_1 ; l'aspiration adiabatique de la vapeur conduit à baisser la température jusqu'à $T_2 = T_{pt}$. Le long du chemin, l'eau reste en équilibre avec sa vapeur

2/ Initialement (état 1) le réservoir contient du liquide aux conditions du point triple. L'extraction progressive de la vapeur conduit à solidifier la masse restante dans le réservoir. Il faut extraire m kg de vapeur pour qu'à l'état 2 le réservoir ne contienne que de la glace.

Soient u_1 , u_2 et h_g respectivement les énergies internes du liquide, du solide et l'enthalpie de la vapeur, le bilan d'énergie donne $m = M_1(u_2 - u_1) / (u_2 - h_g)$

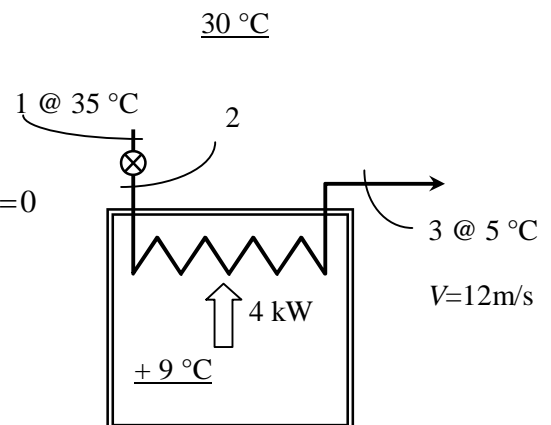
3/ $W = m(h'_g - h_g)$

Exercice 4

1/ $\dot{Q}_F = \dot{m}(h_3 - h_2)$

2/ $\dot{V}_f = \dot{m}v_3$; $\dot{V}_f = \pi d^2 V$

3/ $\dot{m}(s_2 - s_3) + \frac{\dot{Q}_F}{(9 + 273,15)} + \dot{\sigma} = 0$; $\dot{W}_{sup} = (30 + 273,15)\dot{\sigma} = 0$



TD Machines Frigorifiques - N°2

Exercice 1

Un cycle de réfrigération utilise l'eau comme fluide de travail. La température d'évaporation est 5 °C, le compresseur refoule à 10 kPa, son rendement isentropique $\eta_s = 0,76$. La puissance de réfrigération est de 1,0 kW. Déterminer,

- 1/ Le débit massique de fluide
- 2/ La puissance mécanique absorbée
- 3/ Le flux de chaleur rejeté au condenseur
- 4/ Le coefficient de performance COP du cycle
- 5/ La cylindrée du compresseur si la vitesse de rotation est de 2300 tr/min

Exercice 2

Un climatiseur fonctionne au tétrafluoroéthane ($R134a$), la température dans l'évaporateur est de 4°C. Celle dans le condenseur est de 40 °C. Le rendement isentropique η_s du compresseur est de 0,80.

- 1/ Le travail massique de compression
- 2/ La température de refoulement du compresseur
- 3/ Le coefficient de performance

Exercice 3

Pour les besoins d'une usine, de la glace doit être produite à - 6 °C avec une capacité de 50 kg/h. L'eau destinée à cela est disponible à 20 °C. La machine frigorifique permettant d'atteindre cet objectif fonctionne à l'ammoniac. Le condenseur est refroidi à l'air à 30 °C. Les pincements thermiques ΔT_F et ΔT_H respectivement à l'évaporateur et au condenseur sont de 4 °C et 10 °C.

- 1/ Calculer la puissance frigorifique et le débit d'ammoniac nécessaires ?
- 2/ Calculer la puissance mécanique absorbée et le COP, sachant que $\eta_s = 0,80$

Exercice 4

Le condenseur de la machine frigorifique de l'exercice 3 peut-être refroidi avec l'eau à 20 °C de la même source que celle destinée à la production. On suppose que la température de condensation reste celle trouvée précédemment. Il s'agit d'étudier l'effet du débit d'eau \dot{m} sur le fonctionnement du condenseur.

- 1/ Tracer le diagramme température (T) – flux rejeté (\dot{Q}_H) pour l'ammoniac
- 2/ Tracer (qualitativement) le diagramme température (T) – flux absorbé (\dot{Q}_H) pour l'eau
- 3/ Montrer qu'il existe une valeur minimale de \dot{m} au dessous de laquelle la condensation est bloquée
- 4/ Pour quelle est la valeur de \dot{m} le pincement est $\Delta T_H = 10^\circ\text{C}$. Qu'elle est alors la température de sortie d'eau du condenseur ?
- 5/ Analyser la situation si le pincement ΔT_H est fixe et la température de condensation variable

Indications TD2

Exercice 1

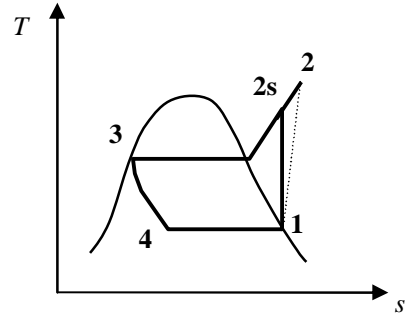
1/ $\dot{Q}_F = \dot{Q}_{41} = \dot{m}(h_1 - h_4)$ avec $h_4 = h_3$ (détente Joule-thomson) d'où \dot{m}

$$2/ \dot{W}_{12} = \frac{\dot{W}_{12s}}{\eta_s} = \frac{\dot{m}(h_{2s} - h_1)}{\eta_s}$$

3/ $\dot{Q}_H = \dot{Q}_{23} = \dot{m}(h_2 - h_3)$; h_2 à calculer à partir de $\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$

$$4/ COP = \frac{\dot{Q}_{41}}{\dot{W}_{12}}$$

5/ Le compresseur aspire un débit volumique $\dot{V}_f = \dot{m}v_1$. Soit C la cylindrée, c'est aussi le volume aspiré et comprimé en un tour. En une seconde le volume traité est $1200/60C = \dot{V}_f$ d'où la valeur de C



Exercice 2

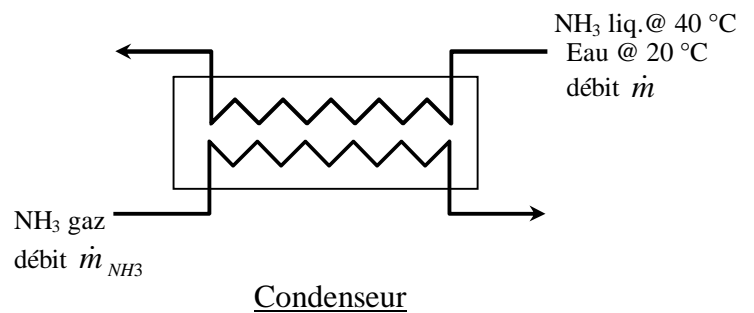
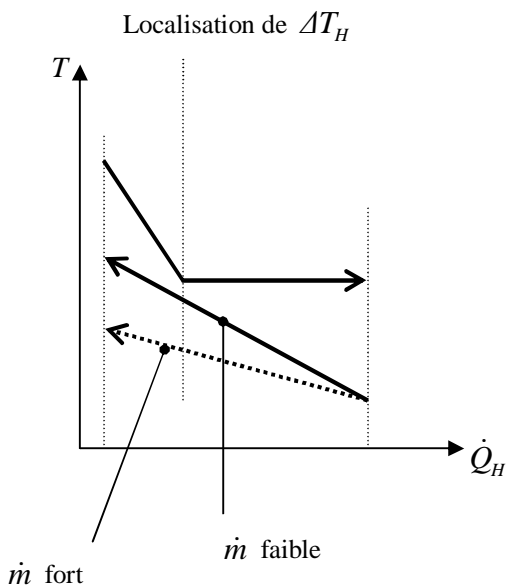
(se référer à la figure ci-dessus)

Faire les calculs à l'aide des tables du fluide R134a

Exercice 3

Voir exercice similaire n° 3 de l'EMD 2017

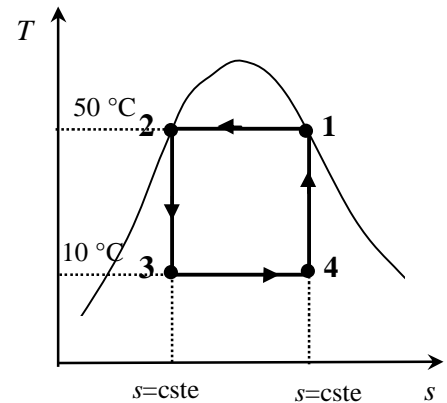
Exercice 4



EMD - Machines Frigorifiques -

Exercice 1

Soit un cycle frigorifique comme représenté sur la figure.
Le cycle fonctionne entre 10 °C et 50 °C avec comme fluide de travail H₂O ou NH₃. Le cycle est distribué dans l'espace.



- 1/ A partir des propriétés disponibles sur les tables, remplir le tableau suivant,

	Froid produit Q_F (kJ/kg)	Chaleur rejetée Q_H (kJ/kg)	Travail produit W_{prd} (kJ/kg)	Travail absorbé W_{abs} (kJ/kg)	COP (déduit)
H ₂ O					
NH ₃					

- 2/ Comparer les deux COP 's calculés. Expliquer.
3/ Pour une même puissance frigorifique, quel est le rapport des débits $\dot{m}_{NH_3} / \dot{m}_{H_2O}$.

Exercice 2

Une machine à froid fonctionne au NH₃ suivant le cycle théorique. Les conditions de températures sont celles de l'exercice 1.

- 1/ Calculer Q_F , W ainsi que le COP
2/ Enumérer les causes qui expliquent la différence avec le COP calculé dans l'exercice 1.

Exercice 3

Pour les besoins d'une usine, de la glace doit être produite à – 6 °C avec une capacité de 50 kg/h. L'eau utilisée rentre dans l'échangeur à 20 °C. Le refroidissement et la solidification de l'eau se font par échange de chaleur contre l'évaporateur d'une machine frigorifique fonctionnant à l'ammoniac. Le pincement thermique au niveau de l'évaporateur est de 4 °C. Le pincement thermique au niveau du condenseur est de 10 °C; la température extérieure est de 36 °C.

- 1/ Calculer la puissance frigorifique nécessaire.
2/ Le débit d'ammoniac nécessaire
3/ Ecrire le bilan d'entropie pour l'ensemble de l'échangeur.

EMD - Machines Frigorifiques -

Problème

Une machine frigorifique fonctionne avec de l'ammoniac. Les paramètres sont les suivants : Températures d'évaporation et de condensation, respectivement $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rendement isentropique du compresseur, 0,80. Ce dernier est de type volumétrique. Calculer,

- 1/ le débit d'ammoniac \dot{m} si la puissance frigorifique est $\dot{Q}_F = 10\text{ kW}$
- 2/ le débit volumique \dot{V} aspiré par le compresseur.
- 3/ le COP
- 4/ la température de refoulement du compresseur

Un défaut d'isolation de la tuyauterie, entre l'évaporateur et le compresseur, donne lieu à des infiltrations thermiques à partir du milieu ambiant. Cela fait augmenter la température d'aspiration à $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (au lieu de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). La machine utilise le même compresseur que précédemment.

- 5/ Représenter le cycle ainsi modifié sur les diagrammes $T-s$ et $P-h$.
- 6/ Calculer les nouvelles valeurs du débit massique \dot{m}' et de la puissance frigorifique \dot{Q}_F' .
- 7/ Calculer la nouvelle valeur du coefficient de performance COP'
- 8/ Faire un commentaire sur les conséquences du défaut d'isolation en question.

NB: -Numérotation : Etat 1 entrée évaporateur.

-Pour les états surchauffés, prendre la valeur de la pression la plus proche disponible sur la table.

Exercice

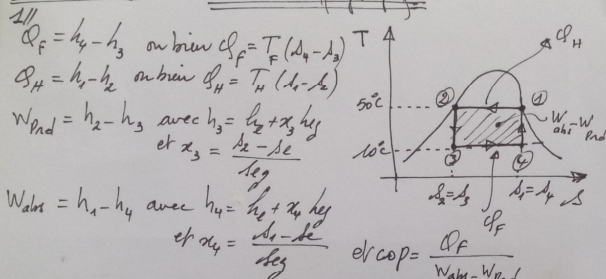
Au niveau de l'évaporateur de la machine précédente, il y a une certaine perte de charge ($P_e - P_s$). Les indices e et s désignent l'entrée et la sortie. La température d'entrée étant égale à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Discuter ^{*} et justifier l'effet de cette perte de charge sur,

- 1/ Le débit massique \dot{m}
- 2/ Le froid produit Q_F par kg m'ammoniac
- 3/ Le travail de compression W par kg d'ammoniac

* augmente/diminue/reste constant.

Correction ETD (2017) Machines frigorifiques

EXERCICE I:



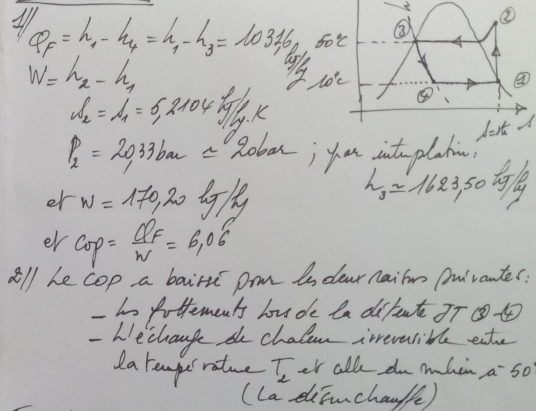
	Q_F (kJ/kg)	Q_H (kJ/kg)	W_{ind} (kJ/kg)	W_{abs} (kJ/kg)	COP (réfrig)
H_2O	2087,5	2382,4	1123	305,9	7,08
NH_3	922,46	1052,0	149,8	145,2	7,08

2/ Les deux COP's sont égaux. Il s'agit du Cycle de Carnot qui a dans tous les cas le COP donné par $COP = \frac{T_F}{T_H - T_F} = 7,08$ on a vérifié sur l'exemple de deux fluides différents que ce résultat est vrai.

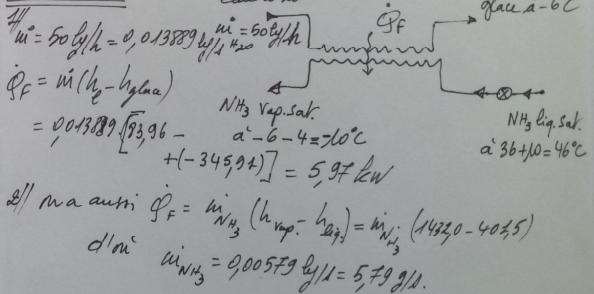
3/ Pour une même puissance frigorifique:

$$\dot{Q}_F = (\dot{m} C_F)_{NH_3} = (\dot{m} C_F)_{H_2O} \Rightarrow \frac{\dot{m}_{NH_3}}{\dot{m}_{H_2O}} = \frac{(C_F)_{H_2O}}{(C_F)_{NH_3}} = 2,264$$

EXERCICE II:



Exercice III:

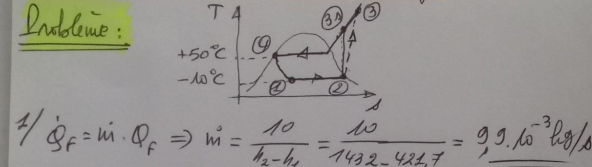


3/ le bilan d'entropie:

$$\dot{m}_{H_2O} (s_2 - s_{2,aq}) + \dot{m}_{NH_3} (s_{liq} - s_{vap}) + \dot{S} = 0$$

Correction ETD Mach. Frigo. Juin 2018

Problème:



2/ $\dot{V} = \dot{m} \cdot v_2 = 9,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4485 = 4,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

3/ $COP = \frac{Q_F}{W} = \frac{h_2 - h_1}{(h_{3,s} - h_2)/\eta} = \frac{h_2 - h_1}{h_{3,s} - h_2} \cdot \eta$

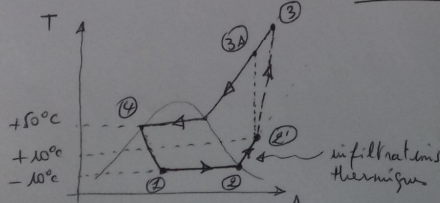
$h_{3,s} = ?$ par interpolation en considérant $P_3 \approx 2 \text{ bar}$
 $h_{3,s} \approx 1725,3 \text{ kJ/kg}$

$COP = \frac{1432,0 - 422,7}{1725,0 - 1432,0} \cdot 0,80 = 2,75$

4/ Temp. de refluxement $T_3 = ?$

on a $h_3 = \frac{h_{3,s} - h_2}{\eta} + h_2 = \frac{1725,3 - 1432,0}{0,80} + 1432,0 = 1798,6 \text{ kJ/kg}$
 par interpolation $160 < T_3 < 180$
 $1792,4 < 1798,6 < 1804,1 \Rightarrow T_3 \approx 162,4^\circ C$

5/



6/ \dot{m} compression $\dot{V} = \text{cte}$

$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_2} = \frac{4,44 \cdot 10^{-3}}{0,4430} = 9,94 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$

$\dot{Q}_F' = \dot{m} (h_2 - h_1) = 9,94 \cdot 10^{-3} (1432 - 422,7) = 9,44 \text{ kW}$

7/ $COP' = \frac{Q_F}{W'} = \frac{Q_F}{h_{3,s} - h_2} \cdot 0,80$
 $h_{2'} = 1489,6 \text{ kJ/kg}$
 $h_{3,s} = 5636,6 \text{ kJ/kg}$
 par interpolation $h_{3,s} \approx 1793,9 \text{ kJ/kg}$
 $COP' = \frac{1432,0 - 422,7}{1793,9 - 1489,6} \cdot 0,80 = 2,58$

8/ le défaut d'isolation conduit, à la fois, à une réduction de la puissance frigorifique et du COP. La consommation électrique sera plus grande et la production de froid moindre.

Exercice:

La perte de charge dans l'évaporateur conduit à:

- * Une réduction de débit massique car h_2 augmente.
- * Une réduction de Q_F car h_2 diminue (légèrement)
- * Une augmentation de W car le rapport de compression augmente.