



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=3Xa1YG9yV_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

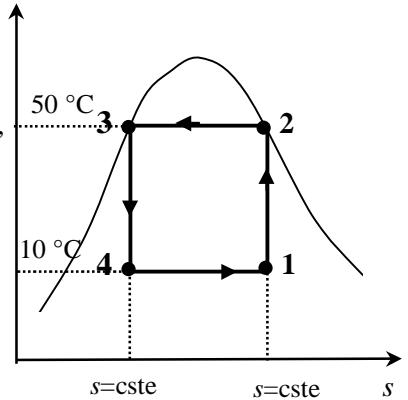
TD Machines Frigorifiques - N°1

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

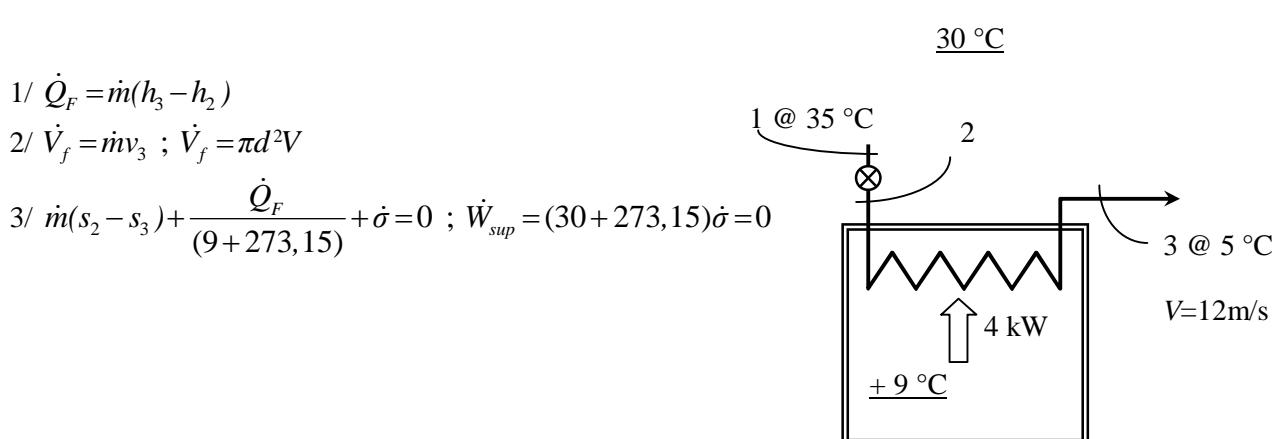
Exercice 3

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 $m \text{ kg}$ 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



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 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/ Monter 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 $\Delta T_H = 10$ °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

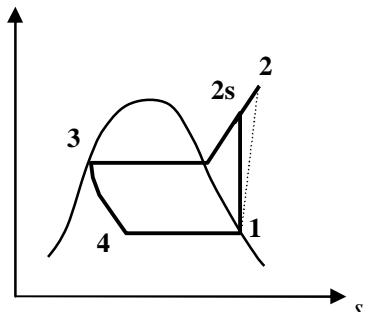
1/ $\dot{Q}_F = \dot{Q}_{41} = \dot{m}(h_1 - h_4)$ avec $h_4 = h_3$ (détente Joule-thomson) d'où \dot{m}

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 cylindré, 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)

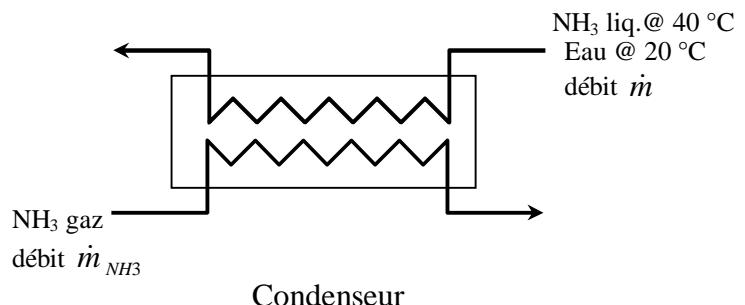
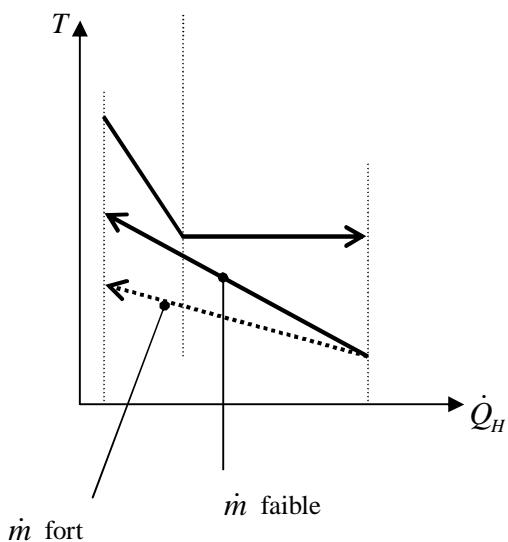
Faire les calculs à l'aide des tables du fluide R134a

Exercice 3

Voir exercice similaire n° 3 de l'EMD 2017

Exercice 4

Localisation de ΔT_H

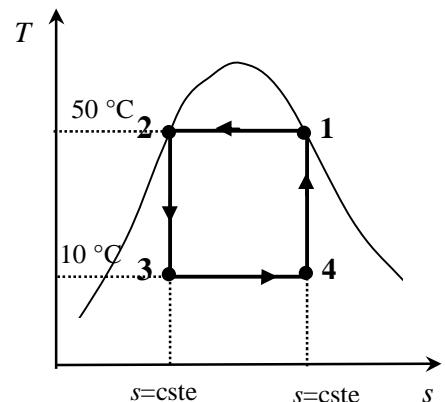


EMD - Machines Frigorifiques -

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.

EXERCICE I: Correction EHD (2017) Machines frigorifiques

1/ $Q_F = h_4 - h_3$ ou bien $Q_F = T_F (s_4 - s_3)$

$Q_H = h_2 - h_1$ ou bien $Q_H = T_H (s_2 - s_1)$

$W_{Pnd} = h_2 - h_3$ avec $h_3 = h_2 + x_3 h_{fg}$ et $x_3 = \frac{s_2 - s_1}{s_{fg}}$

$W_{abs} = h_1 - h_4$ avec $h_4 = h_1 + x_4 h_{fg}$ et $x_4 = \frac{s_2 - s_1}{s_{fg}}$

et $COP = \frac{Q_F}{W_{abs} - W_{Pnd}}$

Q_F (kJ/kg)	Q_H (kJ/kg)	W_{Pnd} (kJ/kg)	W_{abs} (kJ/kg)	COP (éffet)
2087,5	2382,4	11,23	305,9	7,08
924,96	1053,0	14,98	145,2	7,08

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

3/ Pour une même puissance frigorifique:

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

EXERCICE II:

1/ $Q_F = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 = 10336 \text{ kJ/kg}$

$W = h_2 - h_1$

$s_2 = s_1 = 5,2104 \text{ kJ/kg.K}$

$P_2 = 2033 \text{ bar} \approx 20 \text{ bar}$; par interpolation: $h_2 = 1623,50 \text{ kJ/kg}$

et $W = 170,20 \text{ kJ/kg}$

et $COP = \frac{Q_F}{W} = 6,06$

2/ Le COP a baissé pour les deux raisons suivantes:

- les pertes lors de la descente JT ④-⑤
- l'échange de chaleur irreversible entre la température T_1 et celle du milieu à 50°C. (La déenfouille)

Exercice III:

1/ $\dot{m} = 50 \text{ kg/h} = 0,13889 \text{ kg/s}$

$Q_F = \dot{m}(h_2 - h_{glac})$

$= 0,13889 [93,96 - a' - 6 - 4 + (-345,94)] = 5,97 \text{ kW}$

2/ On a aussi $Q_F = \dot{m}_{NH_3} (h_{vap} - h_{2g}) = \dot{m}_{NH_3} (4030 - 405,5)$

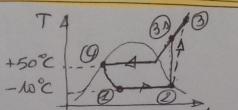
donc $\dot{m}_{NH_3} = 0,00579 \text{ kg/s} = 5,79 \text{ g/s}$

3/ Le bilan d'entropie:

$$\dot{m}_{H_2O} (s_2 - s_{2g}) + \dot{m}_{NH_3} (s_{2g} - s_{vap}) + \dot{s} = 0$$

Correction EHD Mach. Frigo. Juin 2018

Problème:



1/ $Q_F = \dot{m} \cdot Q_F \Rightarrow \dot{m} = \frac{10}{h_2 - h_1} = \frac{10}{1432 - 421,7} = 9,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$

2/ $\dot{V} = \dot{m} \cdot V_2 = 9,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4185 = 4,14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

3/ $COP = \frac{Q_F}{W} = \frac{h_2 - h_1}{(h_{3,0} - h_2)/1,1} = \frac{h_2 - h_1}{h_{3,0} - h_2} \cdot 1,1$

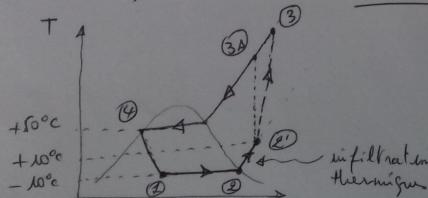
$h_{2g} = ?$ par interpolation en considérant $s_3 = s_{2g}$
 $h_{3,0} \approx 1725,3 \text{ kJ/kg}$

$$COP = \frac{1432,0 - 421,7}{1725,0 - 1432,0} \cdot 0,980 = 2,75$$

4/ Temp. de refroidissement $T_3 = ?$

$$\text{on a } h_3 = \frac{h_{3,0} - h_2}{1,1} + h_2 = \frac{1725,3 - 1432,0}{1,1} + 1432,0 = 1798,6 \text{ kJ/kg}$$

par interpolation $160 < T_3 < 180$ $1793,4 < 1798,6 < 1804,1 \Rightarrow T_3 \approx 166,4^\circ\text{C}$

5/ 

6/ \dot{m} à compression $\dot{V} = \dot{m} s$

$$\dot{m}' = \frac{\dot{V}}{s_2} = \frac{4,14 \cdot 10^{-3}}{0,4430} = 9,34 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$Q_F' = \dot{m}'(h_2 - h_1) = 9,34 \cdot 10^{-3} (1432 - 421,7) = 9,44 \text{ kW}$$

$$7/ COP' = \frac{Q_F'}{W'} = \frac{Q_F}{h_{3,0} - h_2} \cdot 0,980$$

$h_{2g} = 1489,6 \text{ kJ/kg}$
 $s_2 = 5,6366 \text{ kJ/kg.K}$
par interpolation $h_{3,0} \approx 1793,9 \text{ kJ/kg}$

$$COP' = \frac{1432,0 - 421,7}{1793,9 - 1489,6} \cdot 0,980 = 2,58$$

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

Exercice:

La perte de charge dans l'évaporateur conduit à:

- * Une réduction de debit massique car \dot{V} augmente.
- * Une réduction de Q_F car h_2 diminue (légèrement)
- * Une augmentation de W car le rapport de compression augmente.