

1 Chambre froide (d'après centrale TSI 2023)

On se propose dans cette partie d'étudier une machine frigorifique permettant de maintenir une chambre froide à basse température. Le fluide réfrigérant utilisé dans la machine est du R134a. Pour les futures constructions, le fluide sera du R1234ze pour sa moindre contribution à l'effet de serre.

1.1 Généralités

Le fluide réfrigérant décrit le cycle thermodynamique décrit en figure 1.

On modélise la machine frigorifique par une machine ditherme schématisée en figure 2.

On utilise les notations suivantes :

Q_c : transfert thermique algébriquement reçu par le fluide au cours d'un cycle de la part de la source chaude à la température T_c .

Q_f : transfert thermique algébriquement reçu par le fluide au cours d'un cycle de la part de la source froide à la température T_f .

W : travail algébriquement reçu par le fluide au cours d'un cycle de la part de l'extérieur.

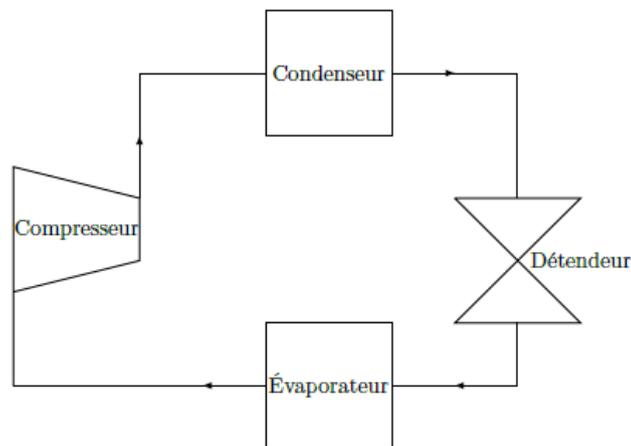


Figure 1

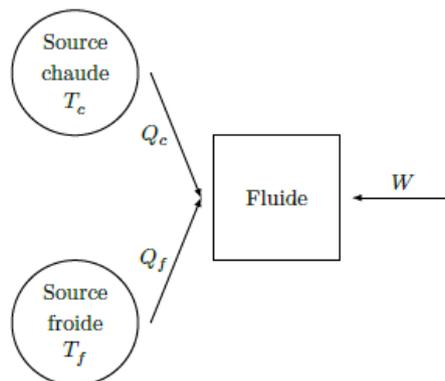


Figure 2

1. Au niveau de quel organe de la machine thermique se trouve la chambre froide ? Justifier votre réponse. Définir l'efficacité e (également appelé COefficient de Performance COP) de la machine frigorifique.
2. Établir l'expression de l'efficacité de Carnot e_{Carnot} , en fonction de T_c et T_f . Que peut-on dire l'efficacité réelle e par rapport à l'efficacité de Carnot e_{Carnot} ?
3. Calculer numériquement e_{Carnot} avec $T_c = 45^\circ\text{C}$ et $T_f = 3^\circ\text{C}$. Interpréter le résultat obtenu.

1.2 Description du cycle

Le cycle comprend les successions de transformations suivantes :

- 1 → 2 : compression adiabatique réversible en phase gazeuse dans le compresseur ;
- 2 → 3 : refroidissement isobare de la vapeur ;
- 3 → 4 : compression totale et isobare ;
- 4 → 5 : sous-refroidissement isobare ;
- 5 → 6 : détente isenthalpique ;
- 6 → 7 : chauffage isobare ;
- 7 → 1 : surchauffe de la vapeur.

Le tableau ci-dessous donne le relevé thermodynamique du fluide aux différents points de ce cycle.

Point du cycle	Pression P (bar)	Température T (°C)	Enthalpie massique h (kJ·kg ⁻¹)	Débit massique D_m (kg·s ⁻¹)
1	2,7	3,0	402	0,16
2	11,6	63,1	442	0,16
3	11,6	45,0	421	0,16
4	11,6	45,0	264	0,16
5	11,6	40,0	256	0,16
6	2,7	-2,0	256	0,16
7	2,7	-2,0	397	0,16

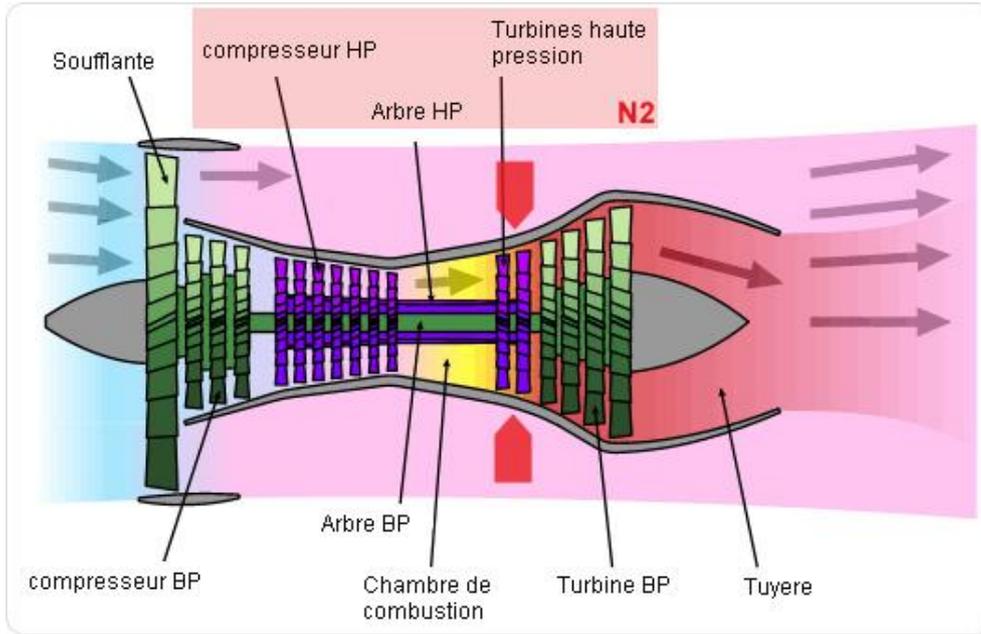
4. Représenter le cycle thermodynamique sur le diagramme des frigoristes (figure A du document réponse).
5. Relier le sens de parcours du cycle au mode de fonctionnement de la machine.
6. Qualifier l'état du fluide aux points 3 et 4.
7. Lire graphiquement le titre en vapeur x_v du point 6.
8. Rappeler l'expression du premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire, dans lequel on néglige les variations d'énergie cinétique massique et d'énergie potentielle de pesanteur massique devant la variation d'enthalpie massique.
9. Exprimer puis calculer numériquement le transfert thermique massique q_f reçu par le fluide dans l'évaporateur.
10. Exprimer puis calculer numériquement le transfert thermique massique q_c reçu par le fluide dans le condenseur.
11. Exprimer puis calculer numériquement le travail indiqué w_i reçu par le fluide de la part du compresseur.
12. En déduire l'efficacité réelle e de la machine frigorifique.
13. Exprimer puis calculer numériquement la puissance thermique extraite de la chambre froide $P_{th,f}$

2 Transformations d'un gaz parfait

1. Un système de 2 mol d'air de coefficient $\gamma = 1.4$ subit une compression adiabatique et réversible entre l'état initial $P_I = 1$ bar, $T_I = 293$ K et l'état final $P_F = 10$ bar. Déterminer la température finale T_F , ainsi que le travail des forces de pression reçu par ce gaz.
2. Un système de 2 mol d'air de coefficient $\gamma = 1.4$ subit une détente isotherme et réversible, au contact d'un thermostat à la température $T_e = 293$ K, entre l'état initial $V_I = 1$ L et l'état final $V_F = 2$ L. Calculer le travail des forces de pression reçu par ce gaz au cours de la transformation, ainsi que le transfert thermique reçu.

3 Turboréacteur d'avion

Un turboréacteur destiné à la propulsion d'avions est schématisé sur la figure suivante.



L'air traverse le compresseur calorifugé où il évolue de l'état E_1 à l'état E_2 , puis traverse la chambre de combustion où il subit un réchauffement isobare de l'état E_2 à l'état E_3 , puis il se détend dans une turbine calorifugée où il évolue de l'état E_3 à l'état E_4 . Enfin, l'air traverse une tuyère, conduite calorifugée de section variable où il acquiert une vitesse importante c_5 et évolue de l'état E_4 à l'état E_5 .

Les données concernant les différents états sont regroupées ci-dessous :

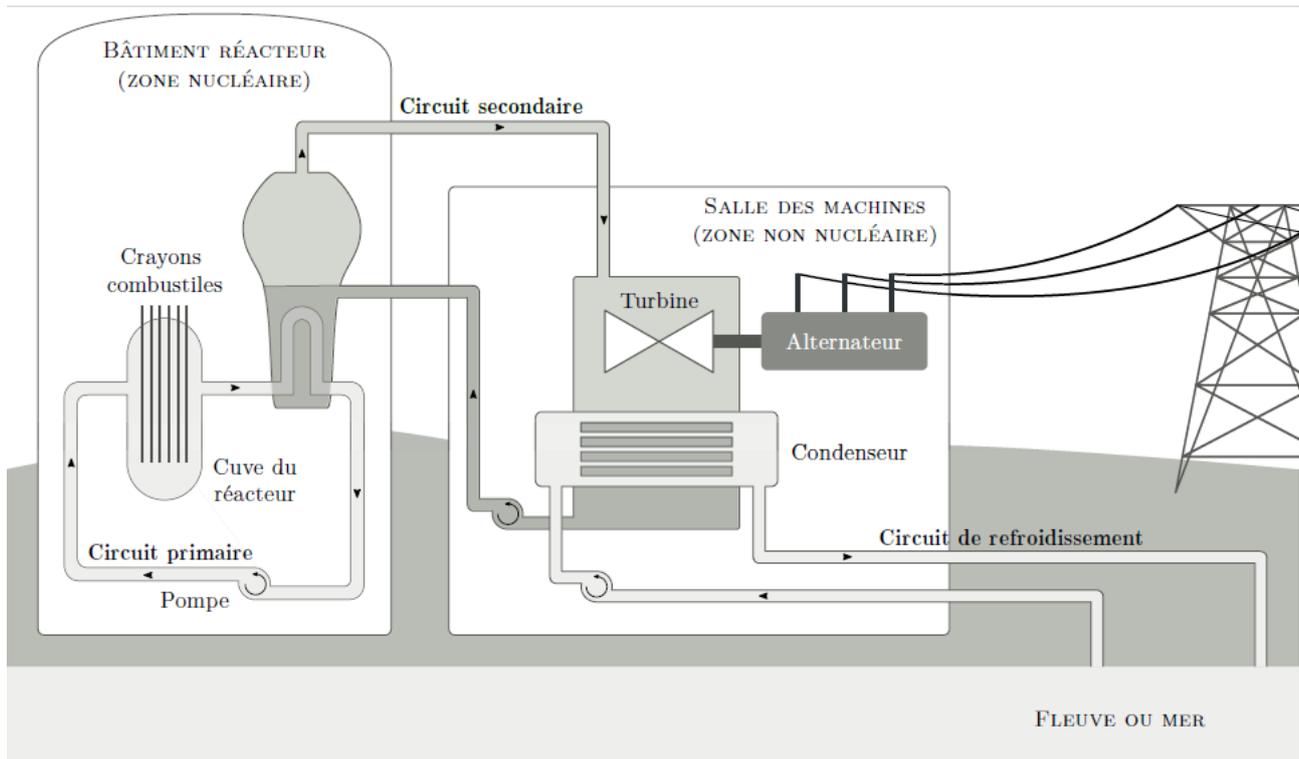
Etat	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
p en Bar	1.0	5.0	5.0	2.5	1.0
T en K	288	$T_2 = ?$	1123	955	735

L'installation fonctionne en régime stationnaire. On néglige l'énergie potentielle de pesanteur dans toute l'installation. On néglige l'énergie cinétique de l'air partout sauf dans l'état E_5 à la sortie de la tuyère, où la vitesse de l'air vaut c_5 . L'air est assimilé à un gaz parfait diatomique de coefficient $\gamma = 1.4$, de capacité thermique massique à pression constante $c_p = \frac{R\gamma}{(\gamma-1)M}$. La masse molaire de l'air est $M = 29$ g/mol. On rappelle que $R = 8,314$ SI.

1. Faire l'application numérique de c_p .
2. En appliquant le premier principe industriel à la tuyère, déterminer la valeur de c_5 .
3. En raisonnant de manière analogue, exprimez en fonction des températures les travaux w_{Comp} et w_{Turb} correspondant au transfert d'un kg d'air respectivement dans le compresseur et dans la turbine. Sachant que le travail récupéré dans la turbine sert exactement à entraîner le compresseur, calculer T_2 .
4. Calculer le transfert thermique q correspondant au transit d'un kg d'air dans la chambre de combustion. En déduire le rendement thermodynamique du turboréacteur défini par $r = \frac{(1/2)c_5^2}{q}$.

4 Étude du circuit secondaire d'une centrale nucléaire (centrale PSI 2024)

Une centrale nucléaire utilise l'énergie dégagée par la fission nucléaire des atomes d'uranium placés au coeur du réacteur. La chaleur générée par la fission est transférée à un fluide caloporteur, généralement de l'eau qui circule dans le circuit primaire. L'eau du circuit primaire est portée à très haute température par l'effet des réactions de fission nucléaire qui ont lieu au sein du coeur du réacteur. Elle passe ensuite dans un pressuriseur qui maintient sa pression constante et égale à $p = 155$ bar, puis effectue un échange thermique avec le circuit secondaire dans un générateur de vapeur : l'énergie thermique dégagée par l'eau du premier circuit vaporise alors l'eau du second, qui fait ensuite tourner plusieurs turbines génératrices d'énergie mécanique, elle-même enfin transformée en énergie électrique par un alternateur.



4.1 Préliminaire

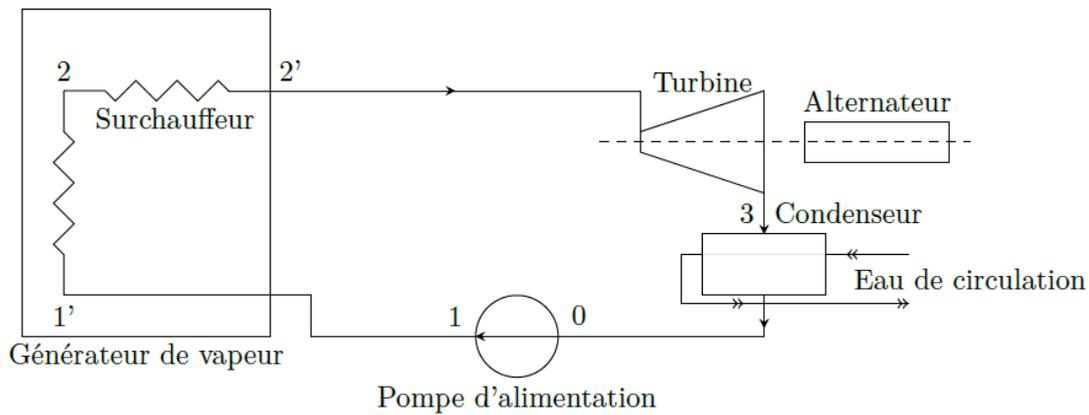
On considère un fluide en écoulement stationnaire, sans variation notable de son énergie mécanique, dans une machine. Il y entre dans l'état E (pression p_e , température T_e , enthalpie massique h_e) et en sort dans l'état S (pression p_s , température T_s , enthalpie massique h_s). On note w_u le travail utile massique et q le transfert thermique massique reçus algébriquement par le fluide lors de la traversée de la machine.

Q1. Établir soigneusement la relation vérifiée dans ce cas par $h_s - h_e$, w_u et q .

4.2 Cycle de Hirn

Le circuit secondaire peut se décomposer de la façon suivante :

- la pompe d'alimentation porte l'eau liquide juste saturée (état 0) de la basse pression $p_3 = 0,040$ bar du condenseur à la pression $p_e = 85,8$ bar du générateur de vapeur (GV) de façon isentropique (état 1) ;
- l'eau liquide entre ensuite dans le générateur de vapeur, où elle est chauffée de façon isobare jusqu'à la température T_2 du changement d'état (état 1' - liquide juste saturant), puis est totalement vaporisée jusqu'à l'état 2 (vapeur saturante sèche). Le surchauffeur (2 - 2') fonctionne de façon isobare ;
- la vapeur sèche produite (état 2') subit ensuite une détente isentropique dans une turbine calorifugée amenant le système dans l'état 3, à la température T_0 ;
- le mélange diphasé (état 3) pénètre ensuite dans le condenseur pour y être totalement condensé (état 0).



On se place en régime stationnaire. On suppose l'eau liquide incompressible et on néglige le travail consommé par la pompe devant les autres termes énergétiques de l'installation. Dans la suite, les grandeurs thermodynamiques indicées par i sont relatives à l'état i .

On donne $T_0 \approx T_1 = 29^{\text{circ}}\text{C}$, $T_2 = 300^\circ\text{C}$ et $T_{2'} = 500^\circ\text{C}$, ainsi qu'un extrait de tables thermodynamiques pour l'eau sur le tableau 1.

Pression de vapeur saturante (bar)	Température ($^\circ\text{C}$)	Liquide juste saturé		Vapeur saturante sèche	
		s	h	s	h
85,8	300	3,25	1345	5,70	
0,040	29	0,42	121	8,47	2554

Tableau 1 Quelques données thermodynamiques pour l'eau. L'enthalpie massique h est exprimée en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et l'entropie massique en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Les données suivantes sont également fournies :

- chaleur latente massique de vaporisation de l'eau à T_2 : $L_v(T_2) = 1404 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;
- enthalpie et entropie massiques respectives de la vapeur d'eau sèche à 500°C et $85,8 \text{ bar}$: $h = 3391 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $s = 6,68 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- Variation d'entropie d'une phase condensée incompressible entre les températures T_1 et T_2 :

$$\Delta S = C \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

Q2. Expliquer pourquoi $T_0 \approx T_1$ et $h_0 \approx h_1$. Préciser l'allure d'une transformation isentropique dans le domaine liquide du diagramme des frigoristes (p, h).

Q3. Donner le nom des différentes courbes du diagramme des frigoristes (p, h) du document réponse 1 et y représenter précisément le cycle décrit par le fluide.

Q4. Calculer, à partir de données du tableau 1 pour plus de précision, le titre massique en vapeur ainsi que l'enthalpie massique de la vapeur à la sortie de la turbine. Positionner le point représentatif de cet état sur le diagramme des frigoristes du document réponse 1.

Q5. Définir et calculer l'efficacité η de ce cycle.

Q6. Établir l'expression de l'efficacité de Carnot η_c d'une machine cyclique ditherme fonctionnant en moteur entre une source chaude à la température T_C et une source froide à la température T_F . La calculer en prenant respectivement pour T_F et T_C les températures minimale et maximale du fluide dans le circuit secondaire. Commenter en justifiant l'écart éventuel avec la valeur de l'efficacité obtenue à la question précédente.