

1- Centrale thermique

Pour le dimensionnement d'une centrale thermique dont le fluide caloporteur est de l'eau, on cherche à déterminer les chaleurs échangées au cours des différentes transformations que subit le fluide au cours du cycle. La Figure 1 représente le schéma fonctionnel de la centrale. À l'entrée de la chaudière, on a du liquide saturé à une pression de 0,7 MPa. En sortie, on a essentiellement de la vapeur sous une pression de 0,7 MPa. Cette vapeur entraîne une turbine dont l'arbre est lié au rotor d'un générateur de puissance (non représenté). En sortie de la turbine, on a un mélange liquide/vapeur, dont le titre vaut 90%, sous la pression de 15 kPa. Un condenseur refroidit alors le mélange liquide/vapeur pour l'amener à un titre de 10% à la pression amont du condenseur. La pompe permet la compression adiabatique du mélange. Dans l'ensemble du problème, on raisonnera sur une masse m de fluide en considérant des grandeurs massiques. On notera h_L l'enthalpie massique de la phase liquide (d'une masse m_L), et h_V celle de la phase gazeuse (d'une masse m_V).

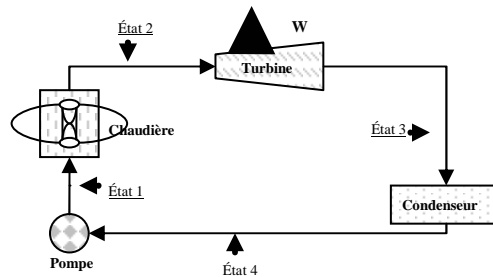


Figure 1 : Schéma fonctionnel d'une centrale électrique

1a. Que valent m_L et m_V en fonction de m (la masse totale de fluide), et du titre x ? Dans le cas où le mélange se réduit à un liquide saturé, écrire l'enthalpie H du mélange en fonction de m_L et h_L ? Écrire H dans le cas de la vapeur saturée en fonction de m_V et h_V ?

1b. On s'intéresse maintenant au cas où les deux phases coexistent. Écrire la formule littérale de l'enthalpie $H(m_L, m_V, h_L, h_V)$ et $H(m, h_L, h_V, x)$? Que vaut H quand le titre x tend vers 0 et quand x tend vers 1 ?

1c. À l'aide des tables thermodynamiques de l'eau, déterminer les enthalpies massiques (h_1, h_2, h_3, h_4), et les températures (T_1, T_2, T_3, T_4), dans les états successifs 1, 2, 3 et 4 rencontrés par le fluide au cours de son cycle de transformations.

1d. Le calcul des chaleurs échangées nécessite de les relier à des fonctions d'état (énergie interne ou enthalpie). Identifier les transformations isobares d'une part, isothermes d'autre part, au cours du cycle (spécifier les états initiaux et finaux pour chacune en terme de pression, température, titre). En déduire les échanges de chaleur massiques lors des transformations isothermes du cycle.

1e. Pour une transformation à pression constante d'un corps homogène de chaleur massique c , que vaut la variation d'enthalpie (ΔH) d'une masse m de ce corps en fonction des températures de l'état initial (T_i) et final (T_f). Que vaut-elle si la transformation est isotherme ? Pouvez-vous expliquer pourquoi, dans le cas de la centrale thermique, les transformations isothermes s'accompagnent d'une variation d'enthalpie ?

1f. Rappelez l'expression de la quantité de chaleur Q dans le cas d'un changement de phase, notamment transition liquide/vapeur, en fonction de m (la masse), et L_V la chaleur latente de vaporisation. Précisez les unités usuelles utilisées pour exprimer L_V .

1g. D'après vos calculs, que vaut L_V à une température de 164,47 °C sous une pression de 0,7 MPa ? Que vaut-elle quand la température est de 53,97 °C, la pression valant 15 kPa ?

1h. La chaleur latente de vaporisation peut s'exprimer de façon assez précise par la formule de Regnault suivante, avec L_V en kcal/kg et θ en °C : $L_V = 597,5 - 0,592 \times \theta$. Cette relation corrobore-t-elle vos résultats ? Les tables étant assez précises, on prendra pour valeur vraie de L_V celle obtenue par votre calcul sur les enthalpies massiques. Calculer l'erreur d'estimation de la formule de Regnault en pourcentage de la valeur vraie pour les deux cas considérés.

1i. Calculer les variations d'entropie massique (Δs_{ij}), en reprenant les valeurs d'enthalpie que vous avez calculées, au cours des différentes transformations du fluide dans la centrale thermique, sachant que les transformations dans la pompe et la turbine sont adiabatiques réversibles. Ces valeurs sont-elles compatibles avec celles fournies par les tables ?

1j. Conclusion quant à la valeur de la variation d'entropie pour l'ensemble du cycle ?

2- Dans l'air, la tension de vapeur saturante peut s'exprimer par la relation suivante (avec T en [K]) :

$$e_{sat} [Pa] = 611.2 \times \exp\left(\frac{17.67(T - 273.16)}{T - 29.66}\right).$$

2a. Masse d'un litre d'air sec à 0°C (composition en volume : 78% N₂, 21% O₂, 0.9% Ar, 0.03% CO₂) ?

2b. Quelle est l'humidité spécifique d'une masse d'air saturée à 15 °C ?

2c. Quelle est la pression partielle de vapeur d'eau d'une masse d'air à 9,3°C d'une humidité relative de 82% ?
Quelle est son humidité spécifique ?

3- Soit 1 m³ d'air humide à 20 °C et 1 bar, ayant une humidité relative de 50%. On comprime cet air humide de manière isotherme jusqu'à 10 bars. Les effets thermiques sur la pression seront négligés.

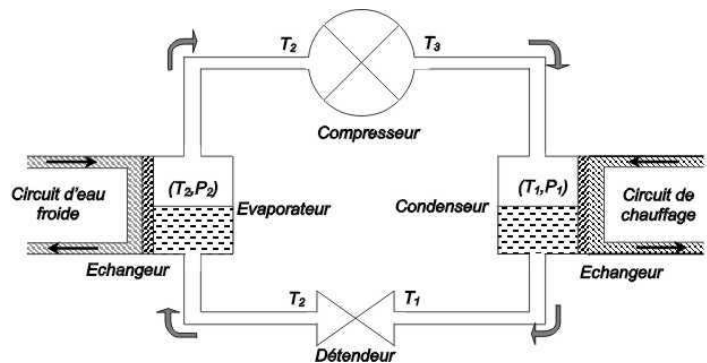
3a. Calculer l'humidité absolue dans l'état initial (s'aider de l'exercice précédent).

3b. Supposant l'état final constitué de vapeur d'eau saturée, calculer l'humidité absolue de l'air humide.

3c. Calculer la masse d'eau condensée.

4- Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur à compression de fluide utilise du fréon 22 (CHF₂Cl), sa phase gazeuse étant assimilée à un gaz parfait de masse molaire M = 86,5 g.mol⁻¹, et $\gamma = 1,2$. L'énergie cinétique macroscopique ainsi que l'énergie potentielle de pesanteur seront négligées et on considérera un fonctionnement en régime permanent de l'installation. Les calculs seront réalisés pour une masse m = 1 kg de fréon. On rappelle que le cycle du réfrigérant est le suivant :



le liquide réfrigérant sous haute pression P₁ passe à travers un détendeur vers une zone de pression plus faible P₂. Le liquide y subit une détente de Joule-Thomson durant laquelle une partie se vaporise. Le réfrigérant, partiellement vaporisé, entre ensuite dans un évaporateur (et se trouve en contact avec un circuit d'eau froide qui constitue la " source froide ", dont la température est néanmoins plus élevée que celle du réfrigérant), où il absorbe de la chaleur et s'évapore complètement à température et pression constantes.

La vapeur toujours à basse pression P₂ est ensuite comprimée dans un compresseur et ressort à l'état de vapeur chaude à la même haute pression P₁ (transformation adiabatique réversible). Il est alors temps de mettre en contact dans le condenseur (par l'intermédiaire d'un échangeur) cette vapeur chaude avec l'eau du circuit de chauffage (qui circule dans le sol de l'habitation et qui constitue la " source chaude ", dont la température est cependant plus faible que celle du réfrigérant sortant juste du compresseur). L'eau de chauffage reçoit de l'énergie thermique alors que la vapeur chaude se condense entièrement à pression constante P₁. Le liquide, sortant du condenseur, rencontre de nouveau le détendeur et le cycle se poursuit. En traversant le détendeur, le fréon liquide subit une détente adiabatique passant de (P₁ = 12,65 bar, T₁ = 305 K) à (P₂ = 5 bar, T₂ = 273 K). Dans l'évaporateur, il subit une évaporation complète sous la pression de vapeur saturante P₂ et à la température T₂. Le fréon gazeux sort du compresseur à la température T₃ et sous la pression P₁. Dans le condenseur, le fréon gazeux se refroidit, puis se liquéfie complètement sous la pression de vapeur saturante P₁ et à la température T₁. On note l_v(T) la chaleur latente massique de vaporisation du fréon à la température T, avec l_v(T₁) = 219 kJ/kg et l_v(T₂) = 244,5 kJ/kg. La capacité thermique massique c_L du fréon liquide sera considérée indépendante de T et de P (c_L = 1,38 kJ.kg⁻¹.K⁻¹).

4a. Passage dans le détendeur à parois adiabatiques : la détente étant isenthalpique, en déduire le titre en fréon gazeux à la sortie du détendeur. Calculer la variation d'entropie Δs₁ du fréon.

4b. Passage dans l'évaporateur : évaluer le transfert thermique q₂ reçu par le fréon. Calculer sa variation d'entropie Δs₂.

4c. Étude de la compression : en supposant la compression adiabatique réversible, déterminer T₃ puis le travail reçu w₃ par le fréon en fonction des données. Calculer la variation d'entropie Δs₃ du fréon.

4d. Passage dans le condenseur : calculer le transfert thermique q₄ reçu par le fréon puis sa variation d'entropie Δs₄.

4e. Vérifier les bilans enthalpiques et entropiques du cycle. Le compresseur est entraîné par un moteur électrique de rendement électromécanique η_M = 0,8. Évaluer le COP de cette pompe à chaleur. Quel avantage présente ce chauffage par rapport au chauffage électrique ?