



16 EXERCICE D'ÉNERGIE OcéANIQUE

Exercice 16.2.a : Projet thermique océanique NEMO en Martinique :

Baptisé NEMO, le projet vise à construire en Martinique une première centrale électrique offshore de 10,7 MW, capable d'alimenter 35 000 foyers, fonctionnant grâce à l'énergie thermique océanique. Son implantation au large de la commune de Bellefontaine réunit toutes les conditions pour que le projet soit un succès :

- Zone tropicale avec eau chaude en surface de 25°C ;
- Présence d'une importante fosse marine à proximité de la côte qui permet d'avoir une eau en profondeur de 5°C.

QUESTIONS

Question 1 : Quel type de cycle thermodynamique est le plus souvent utilisé dans le cas de l'énergie thermique océanique ?

Question 2 : Quel est le rendement théorique maximum que l'on puisse obtenir avec cette installation thermique ?

On considère maintenant une nouvelle température de surface de 27°C, et une nouvelle température à 1000 m de profondeur de 4°C. Le rendement de la turbine alternateur est de 90%, le rendement de transport d'électricité est de 98% et celui de distribution d'électricité est de 97%.

Question 3 : Quel est le rendement effectif maximum de l'installation ?

Voici le schéma de l'installation océanique pour réaliser le cycle thermodynamique afin de convertir le gradient de température océanique en énergie électrique :

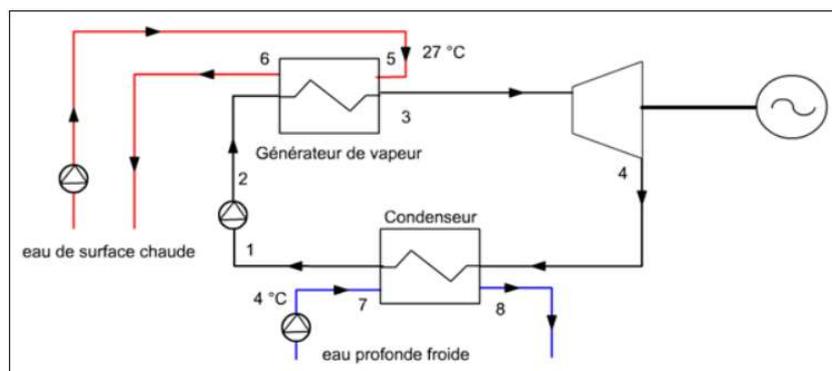


Figure 1 : Schéma d'un système à cycle fermé pour extraire de l'énergie thermique océanique (ref : [Mines Paris Tech](#))

Le liquide de travail thermodynamique utilisé est l'ammoniac (NH_3).

La pompe entre le point 1-2 et la turbine entre le point 3-4 peuvent être supposées adiabatiques. Le générateur de vapeur et le condenseur peuvent être considérés isobares. Ainsi :

- Au point 1, le liquide de travail est à une pression de 6,6 bars pour une température de 12°C. L'enthalpie de liquide saturé est à déterminer à l'aide des tables thermodynamiques du module 2.



- Au point 2, le liquide de travail est à une pression de 9 bars pour une température de 12°C. L'enthalpie de liquide saturé est de 284,4 kJ/kg.
- Au point 3, le liquide de travail est à une pression de 9 bars pour une température de 21.54°C. On aura alors une enthalpie de vapeur surchauffée de 1462,7 kJ/kg.
- Au point 4, le liquide de travail est à une pression de 6,6 bars pour une température de 21,54°C. On aura alors une enthalpie de vapeur surchauffée de 1482.4 kJ/kg.

Le débit de l'eau est de 15 000 kg/s et celui de l'ammoniac est de 153,8 kg/s.

La chaleur spécifique de l'eau est de 4,19 kJ/kg.K.

Question 4 : Quelle est la température de l'eau à la sortie du condenseur au point 8 ?

Question 5 : Quelle est la température de l'eau à la sortie du générateur de vapeur au point 6 ?





REPONSES

Question 1 : Quel type de cycle thermodynamique est utilisé le plus souvent dans le cas de l'énergie thermique océanique ?

C'est un cycle de Rankine organique qui est utilisé le plus souvent pour convertir le gradient de température océanique en électricité. Ce cycle permet d'employer un liquide de travail qui peut se vaporiser à plus faible température (faibles gradients) afin d'activer une turbine alternateur pour produire de l'électricité.

Question 2 : Quel est le rendement théorique maximum que l'on puisse obtenir avec cette installation thermique ?

Le rendement théorique maximum d'une machine thermique se retrouve avec la formule suivante :

$$r_{max} = 1 - \frac{T_{ck}}{T_{hk}}$$

Avec $T_c = 5^\circ\text{C}$ et $T_h = 25^\circ\text{C}$ on a en Kelvin $T_{ck} = T_c + 273,15 = 278,15 \text{ K}$; Pareil pour $T_{hk} = 298,15 \text{ K}$. Ainsi le rendement maximal de cette machine thermique océanique est de 6,7%.

Question 3 : Quel est le rendement effectif maximum de l'installation ?

$T_{2c} = 4^\circ\text{C}$ et $T_{2h} = 27^\circ\text{C}$. Le rendement maximum de la machine thermique avec la même formule que la question 2 est de 7,7 %. Le rendement effectif est le rendement qui se rapproche le plus du rendement réel de l'installation avec les données disponibles :

$$r_{effectif} = r_{max_thermique} * r_{transport_elec} * r_{distribution_elec} * r_{turbine_alternateur} = 6,6 \%$$

Aucune installation ne peut fonctionner avec plus de 2% de rendement effectif global.

Question 4 : Quelle est la température de l'eau profonde froide à la sortie du condenseur au point 8 ?

Bilan d'énergie :

$$\begin{aligned} \dot{E}_{entrante} &= \dot{E}_{sortante} \\ \dot{m}_{ammoniac} h_{ammoniac,entr\acute{e}e} + \dot{m}_{eau} h_{eau,entr\acute{e}e} &= \dot{m}_{eau} h_{eau,sortie} + \dot{m}_{ammoniac} h_{ammoniac,sortie} \\ \dot{m}_{ammoniac} (h_{ammoniac,entr\acute{e}e} - h_{ammoniac,sortie}) &= \dot{m}_{eau} (h_{eau,sortie} - h_{eau,entr\acute{e}e}) \end{aligned}$$

On a $\dot{m}_{eau} = 15\,000 \text{ kg/s}$ et $\dot{m}_{ammoniac} = 153,8 \text{ kg/s}$

Pour l'eau : on prend une chaleur spécifique constante de $4,19 \text{ kJ/kg.K}$ et $h = C_p \Delta T$

Pour l'ammoniac :

- Point 4 : l'ammoniac rentre sous forme de vapeur surchauffé : $h_{ammoniac,entr\acute{e}e} = 1482,4 \text{ kJ/kg}$
- Point 1 : l'ammoniac sort sous forme de liquide comprimé : $h_{ammoniac,sortie} = 237 \text{ kJ/kg}$ (table thermodynamique)

Ainsi avec la formule suivante on trouve la température de l'eau en sortie du condenseur T8 ($T_7 = 277,15 \text{ K} = 4^\circ\text{C}$) :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{eau} C_{p,eau} \Delta T &= \dot{m}_{ammoniac} (h_{ammoniac,entr\acute{e}e} - h_{ammoniac,sortie}) \\ \dot{m}_{eau} C_{p,eau} (T_8 - T_7) &= \dot{m}_{ammoniac} (h_{ammoniac,entr\acute{e}e} - h_{ammoniac,sortie}) \\ T_8 &= \frac{\dot{m}_{ammoniac} (h_{ammoniac,entr\acute{e}e} - h_{ammoniac,sortie})}{\dot{m}_{eau} C_{p,eau}} + T_7 = 280,15 \text{ K} = 7,0^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Question 5 : Quelle est la température de l'eau de surface chaude à la sortie du générateur de vapeur au point 6 ?

Bilan d'énergie (même chose) :

$$\begin{aligned} \dot{E}_{entrante} &= \dot{E}_{sortante} \\ \dot{m}_{ammoniac} h_{ammoniac,entr\acute{e}e} + \dot{m}_{eau} h_{eau,entr\acute{e}e} &= \dot{m}_{eau} h_{eau,sortie} + \dot{m}_{ammoniac} h_{ammoniac,sortie} \\ \dot{m}_{ammoniac} (h_{ammoniac,entr\acute{e}e} - h_{ammoniac,sortie}) &= \dot{m}_{eau} (h_{eau,sortie} - h_{eau,entr\acute{e}e}) \end{aligned}$$

On a $\dot{m}_{eau} = 15\,000 \text{ kg/s}$ et $\dot{m}_{ammoniac} = 153,8 \text{ kg/s}$





Pour l'eau : On prend une chaleur spécifique constante de 4,19 kJ/kg.K et $h=C_p.\Delta T$

Pour l'ammoniac :

- Point 2 : l'ammoniac entre sous forme de liquide comprimé : $h_{\text{ammoniac,entrée}} = 284,4 \text{ kJ/kg}$
- Point 3 : l'ammoniac sort sous forme de vapeur surchauffé : $h_{\text{ammoniac,sortie}} = 1462,74 \text{ kJ/kg}$

Ainsi avec la formule suivante on trouve la température de l'eau en sortie du générateur T6 ($T_5 = 300,15 \text{ K} = 27^\circ\text{C}$) :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{eau}} C_{p,\text{eau}} \Delta T &= \dot{m}_{\text{ammoniac}} (h_{\text{ammoniac,entrée}} - h_{\text{ammoniac,sortie}}) \\ \dot{m}_{\text{eau}} C_{p,\text{eau}} (T_6 - T_5) &= \dot{m}_{\text{ammoniac}} (h_{\text{ammoniac,entrée}} - h_{\text{ammoniac,sortie}}) \\ T_6 &= \frac{\dot{m}_{\text{ammoniac}} (h_{\text{ammoniac,entrée}} - h_{\text{ammoniac,sortie}})}{\dot{m}_{\text{eau}} C_{p,\text{eau}}} + T_5 = 297,15 \text{ K} = 24,1^\circ\text{C} \end{aligned}$$

