

# L'ÉNERGIE THERMIQUE DES MERS

En 1869, dans son livre, *Vingt mille lieues sous les mers*, Jules Verne fait référence aux « eaux de surface et les eaux profondes des océans pour produire de l'électricité ». Cette idée d'utiliser la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes afin de produire de l'électricité est appelée ETM (énergie thermique des mers) en français et OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) en anglais.

Un prototype de centrale ETM est installé à La Réunion. Il n'est pas raccordé à l'océan et une pompe à chaleur simule les sources d'eau chaude et d'eau froide. L'ammoniac est le fluide de travail et son évolution est représentée sur la partie centrale de la figure 1. Le cycle réel de l'ammoniac est également représenté figure 2(a), ainsi qu'un cycle virtuel figure 2(b) expliqué ensuite.

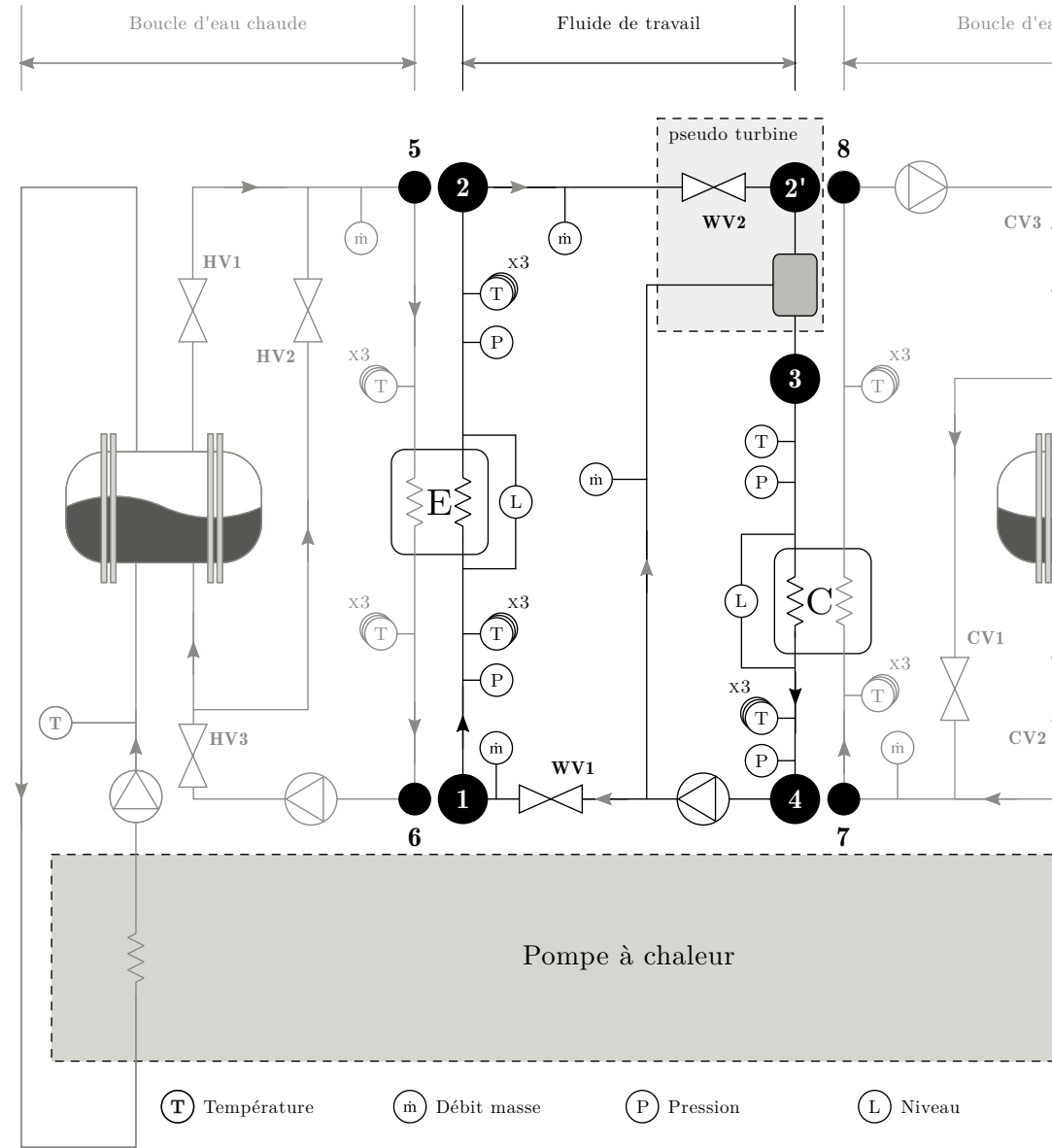


FIGURE 1 – Schéma global du prototype ETM

L'ammoniac passe dans un évaporateur E adiabatique et isobare à double flux sous la pression de 9 bar où l'eau chaude le fait s'évaporer en vapeur juste saturante (point 1 à

point 2).

La vapeur produite est détendue de manière isenthalpique dans la vanne WV2 jusqu'à la pression de 6 bar (point 2 à point 2'). Une petite quantité de liquide froid, prélevée avant la vanne WV1, est injectée dans la vapeur chaude de façon à diminuer sa température (désurchauffe isobare) (point 2' à point 3). Ces transformations (détente et désurchauffe) sont contrôlées de telle sorte qu'elles donnent les mêmes propriétés au fluide que s'il avait été soumis à une détente isentropique dans une turbine jusqu'à la pression de 6 bar (point 2 au point 3 figure 2(b)).

Le fluide de travail est ensuite condensé en liquide juste saturant par un condenseur C adiabatique et isobare à double flux grâce à l'eau froide (point 3 à point 4) puis ramené vers l'évaporateur avec une pompe à la pression de 9 bar (point 4 à point 1) en fonctionnement isentropique (la pompe est notée P<sub>1</sub> sur la figure 2).

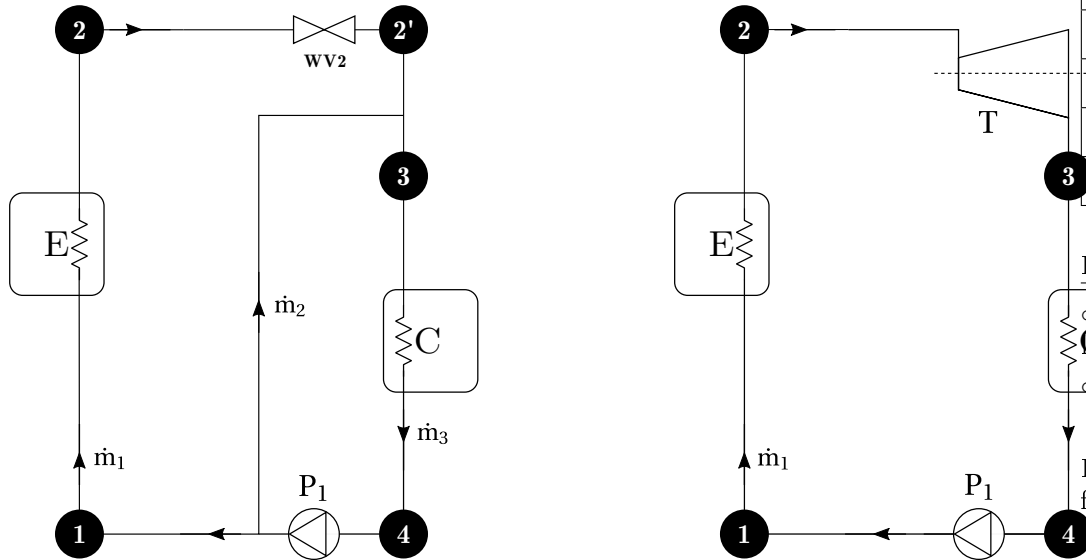


FIGURE 2 – Cycle réel (a) à gauche et cycle virtuel (b) à droite de l'ammoniac

La centrale fonctionne en régime stationnaire et on néglige les variations d'énergies potentielle et cinétique. Les liquides sont considérés comme incompressibles. Eau chaude et eau froide ont même débit massique. Les transformations isentropiques sont supposées adiabatiques et réversibles.

Données	Débit massique	Température d'entrée (en °C)	Température de sortie (en °C)
Eau chaude	$\dot{m}_e$	$T_5 = 26$	$T_6 = 24,5$
Eau froide	$\dot{m}_e$	$T_7 = 5$	$T_8$

TABLE 1 – Données et notations relatives aux circuits d'eau.

On note  $x$  la fraction massique en vapeur de l'ammoniac. On donne ci-dessous le tableau 2 partiellement complété.

Point $i$	$T_i$ (°C)	$P_i$ (bar)	$x_i$	$h_i$ (kJ · kg <sup>-1</sup> )	$s_i$ (kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )
1	12	9		240	1,15
1'					
2					
2'		6			
3					
4					

TABLE 2 – Paramètres des points du cycle.

Données numériques :

- Capacité thermique massique de l'eau  $c_e = 4,0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Débits massiques de l'ammoniac  $\dot{m}_1 = 4,0 \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\dot{m}_2 = 5,0 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Les diagrammes d'état de l'ammoniac, nommé R717 en tant que fluide frigorigène, sont fournis dans les figure 3 à 6.

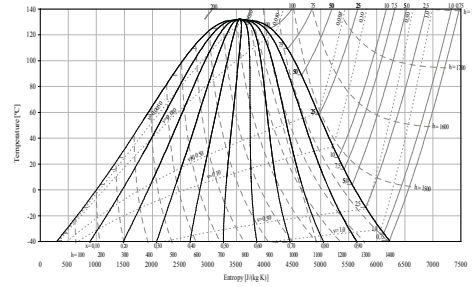
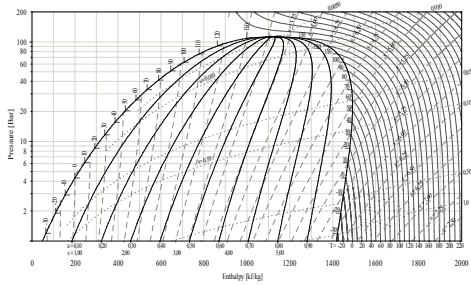


FIGURE 3 – Diagramme de l’ammoniac ( $P, h$ ) avec :  $s$  en  $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $v$  en  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  et  $T$  en  $^{\circ}\text{C}$

FIGURE 4 – Diagramme de l’ammoniac ( $T, s$ ) avec :  $h$  en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $v$  en  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  et  $p$  en bar

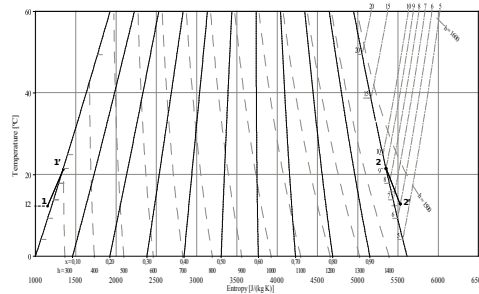
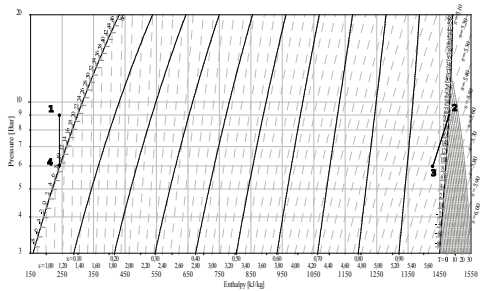
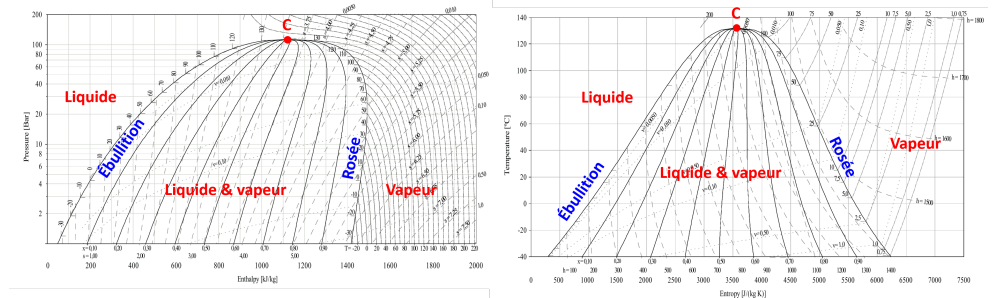


FIGURE 5 – Agrandissement d’une partie du diagramme de l’ammoniac ( $P, h$ )

FIGURE 6 – Agrandissement d’une partie du diagramme de l’ammoniac ( $T, s$ )

1) Sur les diagrammes ( $P, h$ ) et ( $T, s$ ) des figures 3 et 4, mentionner les noms des courbes de saturation, puis indiquer la phase stable associée à chaque domaine. Faire apparaître le point critique que l’on définira et donner sa température et sa pression.

**Correction**



Le point critique C est le point d’intersection entre la courbe de rosée et la courbe d’ébullition, au-delà duquel les états liquide et gazeux sont indiscernables (état supercritique).

Graphiquement :

$$P_C = 110 \text{ bar} \quad \text{et} \quad T_C = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

On utilise désormais les diagrammes des figures 5 et 6 qui présentent des agrandissements de parties des diagrammes des documents réponses 1 et 2 sans les courbes isochores pour plus de lisibilité.

2) Déterminer  $T_{vap,HP}$  et  $T_{vap,BP}$ , les températures de vaporisation aux pressions respectives de 9 bar et 6 bar.

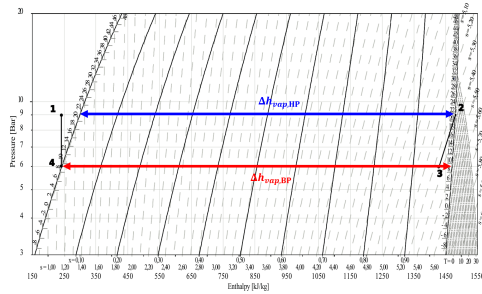
**Correction**

On peut lire graphiquement :

$$T_{vap,HP} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{et} \quad T_{vap,BP} = 9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3) Déterminer les valeurs numériques des enthalpies massiques de vaporisation  $\Delta h_{vap,HP}$  (à 9 bar) et  $\Delta h_{vap,BP}$  (à 6 bar).

**Correction**



On peut lire graphiquement :

$$\Delta h_{vap,HP} = 1180 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad \text{et} \quad \Delta h_{vap,BP} = 1220 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

4) La compression isentropique entre les points 4 et 1 est représentée sur le diagramme ( $P, h$ ) de la figure 5. Justifier sa forme.

**Correction**

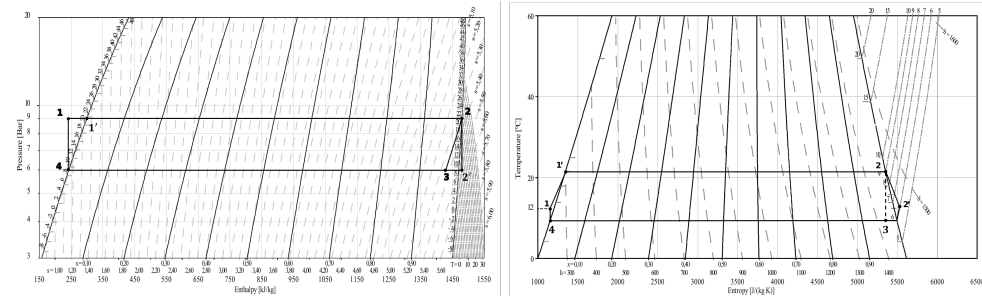
De 4 à 1 : état liquide. Or, pour une phase liquide idéale, l'entropie et l'enthalpie ne dépendent que de la température. Ainsi,

$$\Delta s = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta T = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta h = 0$$

On a bien une droite verticale.

5) Représenter sur les diagrammes ( $P, h$ ) et ( $T, s$ ) des figures 5 et 6 le cycle effectué par l'ammoniac dans le dispositif ETM. On fera apparaître en particulier les points 1, 2, 2', 3, 4 et 1' (liquide juste saturant à 9 bar).

**Correction**



6) Compléter le tableau 2.

**Correction**

Point $i$	$T_i$ (°C)	$P_i$ (bar)	$x_i$	$h_i$ (kJ · kg <sup>-1</sup> )	$s_i$ (kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )
1	12	9	0	240	1,15
1'	21,4	9	0	300	1,34
2	21,4	9	1	1477	5,35
2'	12,9	6	1	1417	5,53
3	9,5	6	0,97	1421	5,35
4	9,5	6	0	240	1,15

7) En déduire la valeur de  $c_a$ , capacité thermique massique de l'ammoniac liquide.

**Correction**

Pour un liquide idéal :

$$\Delta h = c \Delta T \quad \Rightarrow \quad c_a = \frac{h_{1'} - h_1}{T_{1'} - T_1} = 6,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

8) Expliquer pourquoi on utilise l'ammoniac comme fluide de travail et non de l'eau. Donner néanmoins un inconvénient de l'utilisation de l'ammoniac.

**Correction**

L'ammoniac a une meilleure conductivité et capacité thermique que l'eau. En revanche, l'ammoniac est toxique ou potentiellement inflammable et corrosif.

9) Établir l'expression suivante du premier principe industriel dans le cas d'un système ouvert à une entrée et une sortie, en écoulement permanent avec un débit massique  $D_m$ , en explicitant bien toutes les hypothèses :

$$D_m (h_s - h_e) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$$

où  $h_s$  désigne l'enthalpie massique de sortie,  $h_e$  l'enthalpie massique d'entrée,  $\mathcal{P}_u$  la puissance utile reçue par le système due aux pièces mobiles et  $\mathcal{P}_{th}$  la puissance thermique reçue par le système.

**Correction**

Démonstration de cours. Il faut penser à :

- bien définir le système fermé à partir du système ouvert ;
- négliger toute variation d'énergie mécanique ;
- appliquer le premier principe au système fermé ;
- utiliser le régime stationnaire pour dire que  $dY = 0$  pour le système fermé ;
- déterminer le travail des forces de pression pour faire apparaître l'enthalpie.

En raison de la taille réduite du prototype, une véritable turbine capable de produire la puissance nécessaire n'était pas disponible. Néanmoins, en considérant le cycle virtuel représenté sur la figure 2(b), où la détente isentropique du point 2 au point 3 est attribuée à une turbine virtuelle, on peut calculer le rendement du cycle.

10) Exprimer et calculer  $\mathcal{P}_{th,E,R}$  et  $\mathcal{P}_{th,E,V}$ , les puissances thermiques reçues par l'ammoniac au niveau de l'évaporateur lors des cycles respectivement réel et virtuel, puis commenter leur signe.

**Correction**

Le premier principe industriel donne :

$$\mathcal{P}_{th,E,R} = \mathcal{P}_{th,E,V} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) = 495 \text{ kW}$$

Ces puissances sont positives car une vaporisation est endothermique.

11) Exprimer, en fonction des températures,  $\mathcal{P}_{th,ec}$ , la puissance reçue par l'eau chaude au niveau de l'évaporateur (cf. figure 1).

**Correction**

Le premier principe industriel donne :

$$\mathcal{P}_{th,ec} = \dot{m}_e c_e (T_6 - T_5)$$

12) En déduire l'expression et la valeur numérique de  $\dot{m}_e$ .

**Correction**

Puisque E est calorifugée,

$$\mathcal{P}_{th,ec} = -\mathcal{P}_{th,E,R} \Rightarrow \dot{m}_e = -\frac{\mathcal{P}_{th,E,R}}{c_e (T_6 - T_5)} = 82 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

13) Justifier que l'évolution de l'ammoniac traversant la vanne WV2 est isenthalpique.

**Correction**

L'évolution dans la vanne est adiabatique et se fait sans pièces mécaniques mobiles.

14) Au niveau du surchauffeur, situé entre les points 2' et 3, donner une relation entre  $\dot{m}_1$ ,  $\dot{m}_2$  et  $\dot{m}_3$ . Calculer  $\dot{m}_3$ .

**Correction**

On est en régime stationnaire, par conservation de la masse :

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 0,45 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

15) Exprimer et calculer  $\mathcal{P}_{C,R}$  et  $\mathcal{P}_{C,V}$ , puissances reçues par l'ammoniac au niveau du condenseur lors des cycles respectivement réel et virtuel, puis commenter leur signe.

**Correction**

Le premier principe industriel donne :

$$\mathcal{P}_{C,R} = \dot{m}_3 (h_4 - h_3) = -531 \text{ kW} \quad \text{et} \quad \mathcal{P}_{C,V} = \dot{m}_1 (h_4 - h_3) = -472 \text{ kW}$$

Ces puissances sont négatives car une condensation est exothermique.

16) Exprimer dans le cas réel  $\mathcal{P}_{ef}$ , la puissance reçue par l'eau froide au niveau du condenseur, puis en déduire la valeur de  $T_8$ .

**Correction**

Puisque C est calorifugée,

$$\mathcal{P}_{th,ef} = -\mathcal{P}_{th,C,R} = \dot{m}_e c_e (T_8 - T_7) \Rightarrow T_8 = T_7 - \frac{\mathcal{P}_{th,C,R}}{\dot{m}_e c_e} = 6,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

17) Exprimer et calculer  $\mathcal{P}_{T,V}$ , puissance utile reçue par l'ammoniac dans la turbine T entre les points 2 et 3 du cycle virtuel. Commenter son signe.

**Correction**

Le premier principe industriel donne :

$$\mathcal{P}_{T,V} = \dot{m}_1 (h_3 - h_2) = -22,4 \text{ kW}$$

Cette puissance est négative car l'ammoniac donne réellement du travail aux pâles

de la turbine (moteur). .

18) Exprimer et calculer  $\mathcal{P}_{P_1,R}$  et  $\mathcal{P}_{P_1,V}$ , puissances utiles reçues par l'ammoniac au niveau de la pompe  $P_1$  lors des cycles respectivement réel et virtuel.

**Correction**

Le premier principe industriel donne :

$$\mathcal{P}_{P_1,R} = \dot{m}_3 (h_1 - h_4) = 0 \quad \text{et} \quad \mathcal{P}_{P_1,V} = \dot{m}_1 (h_1 - h_4) = 0$$

Ces deux puissances sont nulles car  $h_1 = h_4$  (compression isentropique d'un liquide).

19) Déduire de l'étude précédente le rendement  $\eta_V$  du cycle virtuel.

**Correction**

Avec tout ce qui précède :

$$\eta_V = -\frac{\mathcal{P}_{T,V}}{\mathcal{P}_{th,E,V}} = 4,5 \%$$

20) Le rendement obtenu est surestimé. Proposer des justifications.

**Correction**

Le rendement est surestimé : les pertes dans la turbine sont négligées, l'évaporateur n'est pas parfaitement calorifugé, des causes d'irréversibilités négligées.