

Rapport de BE de Thermodynamique : Centrale ETM

Tran Ugo, [REDACTED] Nathan, [REDACTED] Edgar, [REDACTED] Wissal

Enseeiht, Toulouse, France

Département Mécaniques des Fluides, Energie et Environnement

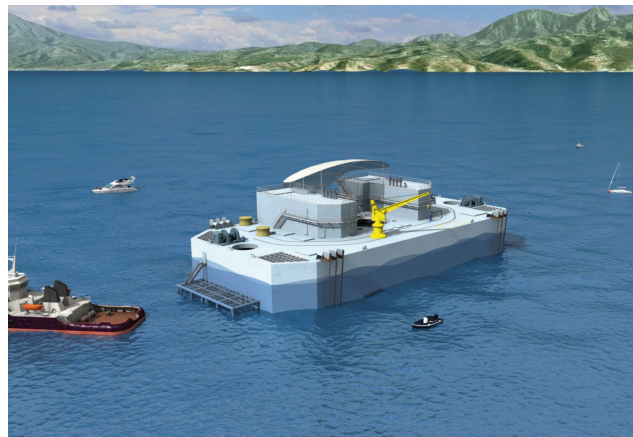


FIGURE 1: Centrale ETM

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Définition	3
1.2	Contexte	3
2	Notations	4
3	Fonctionnement du dispositif	4
3.1	Généralité	4
3.2	Cycles thermodynamique	5
3.2.1	Cycle fermé	5
3.2.2	Cycle ouvert	6
3.2.3	Cycle hybride	6
4	Fonctionnement et dimensionnement des composants	7
4.1	Evaporateur	7
4.2	Turbine	8
4.3	Condenseur	8
4.4	Générateur	9
4.5	Pompe	9
5	Approfondissement cycle ouvert/cycle fermé	10
5.1	Cycle fermé	10
5.2	Cycle ouvert	12
6	Etude d'un prototype réel	13
6.1	Présentation des prototypes existants	13
6.2	Présentation de l'installation expérimentale	13
6.3	Analyse énergétique du prototype et résultats	15
6.4	Conclusion partielle	17
7	Conclusion	17

1. Introduction

1.1. Définition

L'énergie thermique des mers (ETM) désigne l'utilisation des différences de température entre les couches superficielles et profondes des océans pour produire de l'électricité à partir d'un cycle thermodynamique. Ce processus repose sur l'exploitation des ressources thermiques renouvelables des mers et des océans par une centrale ETM.

1.2. Contexte

La demande énergétique mondiale continue de croître, mais seulement 13% provient actuellement de sources renouvelables. Face à cette nécessité croissante de transition énergétique, les énergies alternatives durables gagnent en importance. La nécessité de réduire notre empreinte carbone exige alors cette transition vers des sources d'énergie plus propres et renouvelables.

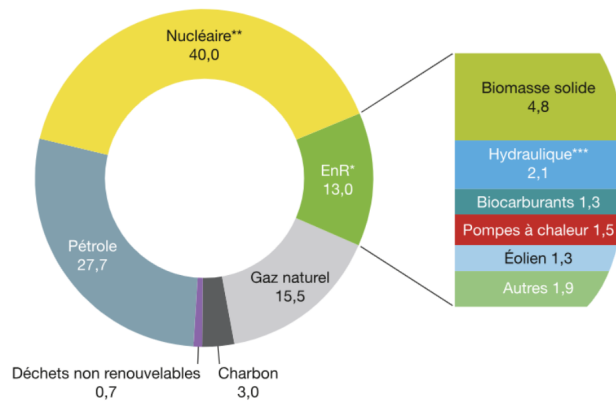


FIGURE 2: Répartition de la consommation d'énergie primaire par énergie totale

Nous étudierons tout d'abord le fonctionnement d'une centrale ETM et de ses différents composants. Notre étude portera sur les principes thermodynamique du système (cycles thermodynamiques, rendement du dispositif). Nous tirerons enfin des conclusions sur ce système vis à vis de sa localisation géographique et des critères environnementaux.

2. Notations

\dot{m}_i : le débit massique au point i

\dot{q}_{12} : le flux thermique de l'eau chaude transmis à l'ammoniac

\dot{q}_{34} : le flux thermique dans le condenseur

h_i : l'enthalpie au point i

\dot{W}_T : La puissance mécanique fourni par la turbine

η_{meca} : Le rendement mécanique de la turbine

\dot{W}_{gen} : La puissance récupérable par le générateur

η_{elec} : Le rendement électrique du générateur

P_i : La pression au point i

v_i : La vitesse du fluide au point i

ρ : la masse volumique du fluide

g : la constante de gravitation

$\dot{W}_{p_{meca}}$: La puissance consommé par la pompe pour compresser le fluide

ν : Le volume massique du fluide

$\dot{W}_{p_{elec}}$: La puissance électrique consommé par la pompe

η_{elec} : Le rendement électrique de la pompe

3. Fonctionnement du dispositif

3.1. Généralité

Le principe de fonctionnement du cycle ETM est une application du second principe de la thermodynamique. En effet, il est possible de faire fonctionner une machine thermique pour produire un travail, en utilisant la différence de température entre l'eau de surface (source chaude) et l'eau profonde (source froide) prélevée à 1000 m de profondeur. L'objectif final étant la production d'électricité, il existe différents types de procédés : le cycle fermé, le cycle ouvert et le cycle hybride. De plus, ces cycles peuvent être installés sur terre (onshore) ou en mer (offshore).

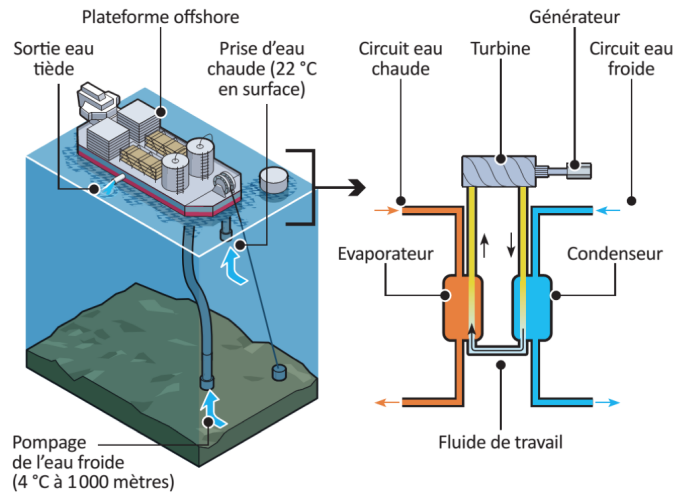


FIGURE 3: Schéma d'une centrale ETM (énergie thermique des mers)

3.2. Cycles thermodynamique

3.2.1. Cycle fermé

L'eau chaude de surface est pompée dans un évaporateur où le fluide de travail qui reçoit la chaleur se vaporise. La vapeur ainsi produite se détend dans une turbine puis se condense à basse pression dans le condenseur où la chaleur est transférée à la source froide.

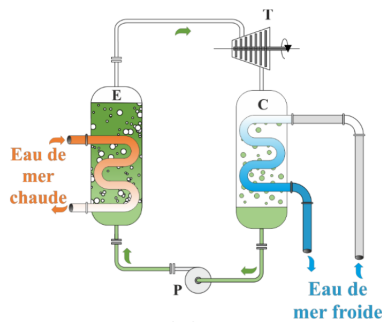


FIGURE 4: Cycle thermodynamique fermé

Le fluide qui vient d'être condensé est réintroduit dans l'évaporateur pour un nouveau cycle. Ce fonctionnement correspond au cycle de Rankine. Pour l'ETM, le fluide de travail, le plus couramment utilisé est l'ammoniac.

3.2.2. Cycle ouvert

Dans le cycle ouvert, le fluide de travail est l'eau de mer. L'eau de mer chaude est introduite dans la chambre sous vide d'un évaporateur dit « flash ».

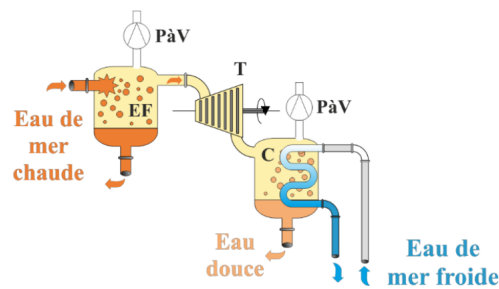


FIGURE 5: Cycle thermodynamique ouvert

Elle va alors entrer en ébullition et produire de la vapeur, si la pression de la chambre est inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau. Cette vapeur est ensuite condensée dans le condenseur en contact de l'eau froide profonde. Les eaux rejetées, que l'on appellera « effluents », sont évacuées suffisamment en profondeur pour éviter le mélange avec l'eau prélevée en surface pour la source chaude.

3.2.3. Cycle hybride

Ce cycle utilise les deux précédentes techniques, car on retrouve le cycle fermé en premier lieu, avec toujours le cycle de l'ammoniac qui traverse l'évaporateur, le turbogénérateur et le condenseur, c'est-à-dire un cycle thermodynamique qui produit de l'électricité. La nouvelle technique intègre un deuxième étage qui va produire de l'eau potable, grâce à cycle ouvert en utilisant le différentiel d'eau après le cycle fermé.

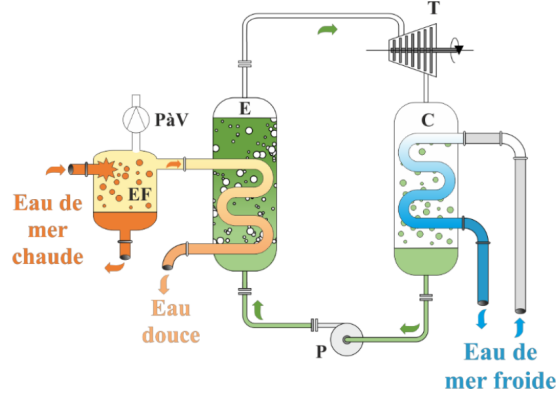


FIGURE 6: Cycle thermodynamique hybride

4. Fonctionnement et dimensionnement des composants

4.1. Evaporateur

L'évaporateur est un échangeur de chaleur qui absorbe l'énergie provenant du médium à refroidir (ici l'eau chaude) par le biais d'un liquide s'évaporant après avoir été détendu (ici l'ammoniac NH_3).

Au début de l'évaporation nous observons un mélange vapeur+liquide, mais la proportion de liquide est à ce moment-là majoritaire, puis petit à petit le fluide absorbe la chaleur contenue dans l'eau, cet échange thermique va permettre d'inverser la proportion vapeur/liquide, pour n'avoir finalement que de la vapeur en sortie de l'évaporateur.

L'application du premier principe de la thermodynamique des systèmes ouverts à l'évaporateur (Fig.6) donne :

$$q_{12} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$$

Or en régime stationnaire les débits massiques sont égaux, donc :

$$q_{12} = \dot{m}_2 (h_2 - h_1) \quad (1)$$

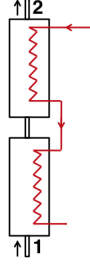


FIGURE 7: Schéma de principe d'un évaporateur

4.2. Turbine

La turbine est un dispositif rotatif convertissant partiellement l'énergie interne d'un liquide (ici le fluide frigorigène : ammoniac NH_3) en énergie mécanique au moyen d'aubes disposées sur un arbre tournant à grande vitesse.

L'énergie entrante de du liquide est caractérisée notamment par sa vitesse, sa pression, son enthalpie. L'énergie mécanique sortante de la turbine entraîne un autre mécanisme rotatif, ici un générateur.

Le travail mécanique fourni par la turbine s'exprime comme :

$$\dot{W}_T = \dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_2) \cdot \eta_{meca} \quad (2)$$

4.3. Condenseur

Le condenseur est un appareil dont la fonction principale est de liquéfier (ou condenser) de la vapeur, c'est-à-dire la faire passer d'un gaz à un liquide, au moyen d'une surface froide (ici l'eau froide) maintenu froid par la circulation d'un fluide réfrigérant. La chaleur latente du corps est transférée dans le fluide réfrigérant, ce qui consiste en un changement de phase à température constante.

De même que pour l'évaporateur on a d'après le premier principe de la thermodynamique appliqué au condenseur :

$$\dot{q}_{34} = \dot{m}_4 (h_4 - h_3) \quad (3)$$

4.4. Générateur

Le générateur permet de convertir l'énergie mécanique de rotation de la turbine en énergie électrique. Cette énergie électrique correspond à la puissance brute récupérable du système. On peut définir cette puissance par :

$$\dot{W}_{gen} = \dot{W}_T \cdot \eta_{elec} \quad (4)$$

4.5. Pompe

Les pompes permettent de la mise en mouvement d'un fluide dans une conduite. À partir du calcul des pertes de charge, il est possible de déterminer la consommation des pompes.

D'après le théorème de Bernoulli, si l'écoulement va de 1 vers 2 puis 3 et enfin 4 on a :

$$B_1 = B_2 = B_3 = B_4 \quad (5)$$

Avec $B_i = P_i + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_i^2 + \rho \cdot g \cdot z_i$

Le travail consommé par la pompe (idéale) pour compresser le fluide entre 4 et 1 s'écrit :

$$\dot{W}_{p_meca} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_4) = \nu \cdot (P_1 - P_4) \quad (6)$$

La puissance électrique consommée par la pompe découle du travail mécanique fourni et du rendement électrique :

$$\dot{W}_{p_{elec}} = \frac{\dot{W}_{p_{meca}}}{\eta_{elec}} \quad (7)$$

5. Approfondissement cycle ouvert/cycle fermé

5.1. Cycle fermé

Le cycle fermé d'une centrale ETM peut être assimilé au cycle de Rankine. Il peut être schématisé de la manière suivante :

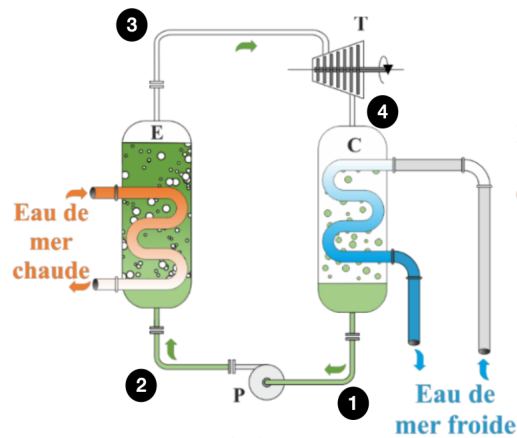


FIGURE 8: Cycle thermodynamique fermé

On y voit 4 éléments principaux :

- Une pompe (P)
- une turbine (T)
- un condenseur (C)
- un évaporateur (E)

Au passage dans la pompe entre (1) et (2), le fluide va subir une compression isentropique (adiabatique réversible). Le fluide est alors sous forme liquide.

Entre (2) et (3), dans l'évaporateur, le fluide va se vaporiser entièrement de manière isobare en 2 étapes : tout d'abord le fluide va se réchauffer pour

arriver à l'état de liquide saturant (2'), ensuite il va se vaporiser à température et pression constante. Cette transformation est irréversible.

Lorsque le fluide va passer dans la turbine, le fluide va subir une détente isentropique et il arrive en (4) sous forme de vapeur humide pour enfin se liquéfier complètement de manière isobare dans le condenseur et revenir en (1), cette étape aussi étant irréversible.

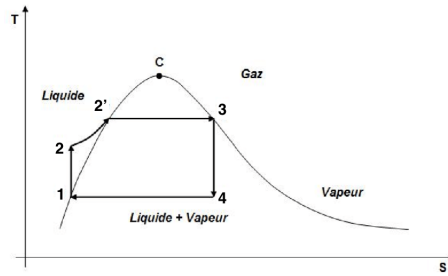


FIGURE 9: Diagramme (T,S) du fluide de travail

Le cycle de Rankine est le cycle fermé réalisable physiquement le plus proche du cycle de Carnot puisque les deux idothermes du cycle de Carnot sont remplacés par des isobares dans le cycle de Rankine.

Pour les calculs, nous utiliserons le Prototype A Terre d'Énergie Thermique des Mers (PAT ETM) de $\dot{W}_T = 15kW$ situé sur l'île de La Réunion. Nous prendrons la température d'eau de mer froide à $T_f = 5^\circ C$ et l'eau de mer chaude à $T_f = 25^\circ C$.

Pour délivrer une puissance $\dot{W}_T = 15kW$, avec une différence de température entre la source chaude et la source froide de 20K, sachant que la capacité calorifique massique de l'ammoniac est $c_a = 2,06kJK^{-1}kg^{-1}$, en utilisant la formule $\dot{W}_T = \dot{m}.c_a.\Delta T$, on a besoin d'un débit $\dot{m} = 0,36kg s^{-1}$.

Le premier principe de la thermodynamique donne

$$\dot{W}_T + \dot{W}_{pmeca} + q_{23} + q_{41} = 0$$

avec

$$\begin{aligned}
\dot{q}_{23} &= \dot{m}_1(h_3 - h_2) \\
\dot{q}_{41} &= \dot{m}_1(h_1 - h_4) \\
\dot{W}_T &= \dot{m}_1(h_4 - h_3) \\
\dot{W}_{pmeca} &= \dot{m}_1(h_2 - h_1)
\end{aligned}$$

On peut alors calculer le rendement Thermique de l'installation :

$$e = \frac{-W_T}{\dot{q}_{23} + \dot{W}_{pmeca}}$$

On peut alors faire l'application numérique à partir des valeurs suivantes :

Point	Température (°C)	Pression (bar)	Puissance (kW)	Réel	Virtuel
2	12.37	8.83	\dot{Q}_{evap}	436.04	436.04
2'	20.54	8.72	\dot{Q}_{cond}	-438.92	-425.17
3	15.7	6.89	\dot{W}_{turb}	0	-13.74
4	10.81	6.33	\dot{W}_{pomp}	2.98	2.89
1	10.67	6.4	\dot{Q}_{em}	-0.093	-0.093

FIGURE 10: Valeurs numériques sur le cycle fermé

On trouve : $e = 3\%$

5.2. Cycle ouvert

On retrouve les mêmes éléments dans le cycle ouvert que dans le cycle fermé, une pompe (P) qui va servir à pomper de l'eau de mer, un évaporateur (E) qui a une double fonction : évaporer l'eau et dans le même temps la désaliniser. Une turbine (T) qui va transformer la chaleur en travail mécanique puis électrique et enfin un condenseur qui va permettre de rejeter de l'eau désaliniser dans la mer.

La production d'eau douce est certes inutile pour produire de l'électricité mais celle-ci peut être récupérée et servir à alimenter en eau les pays qui en manquent (qui sont pour la plupart situés autour de l'équateur, tout comme les centrales ETM).

6. Etude d'un prototype réel

6.1. Présentation des prototypes existants

De nombreux pays ont déjà installé une ou plusieurs centrale ETM. Comme le montre le tableau suivant, le cycle fermé est utilisé dans la majorité des cas.

Pays	Année de lancement	Lieu d'installation	Cycle	Températures (°C)		Puissance (kW)
				Basses	Hautes	
Belgique	1928	Côte	Ouvert	10 °C	30 °C	50 kW
Chine	2013	Laboratoire	Fermé	5 à 15 °C	24 à 30 °C	0,05 kW
Corée du Sud	2014	Côte	Fermé	5 °C	26 °C	20 kW
Cuba	1930	Côte	Ouvert	13 °C	27 °C	22 kW
Etats-Unis	1979	Large	Fermé	6 °C	26 °C	53 kW
	1993	Côte	Ouvert			255 kW
	2014		Fermé	5 à 7 °C	24 à 28 °C	100 kW
Fidji	2012	Laboratoire	Fermé	4 à 5 °C	24 à 30 °C	0,02 kW
France	2011	Côte	Fermé	5 °C	23 à 28 °C	15 kW
Japon	1977	Laboratoire	Fermé	5 à 24 °C	26 à 42 °C	1 kW
	1980	Large		10 °C	24 °C	
	1981	Côte		6 °C	30 °C	120 kW
	1982			12 °C	29 °C	50 kW
	1985					75 kW
	1995			7 °C	28 °C	5 kW
	2003					30 kW
	2013			8 à 9 °C	26 à 29 °C	50 kW

Exemples de prototypes d'exploitation de l'énergie thermique des mers dans le monde - 2017

FIGURE 11: Répartition mondiale des centrales ETM

Nous allons nous intéresser plus particulièrement au prototype installé à la Réunion, pour lequel nous avons accès à des résultats expérimentaux intéressants, qui utilise un cycle de Rankine (voir Fig.9).

6.2. Présentation de l'installation expérimentale

Le prototype installé à la réunion utilise comme fluide de travail l'ammoniac. Malgré sa toxicité, ce fluide possède une courbe de pression / température de saturation bien adaptée à l'ETM ainsi qu'une forte chaleur latente de vaporisation (qui permet des économies au niveau de la consommation électrique de la pompe). Le dispositif est installé selon le schéma suivant :

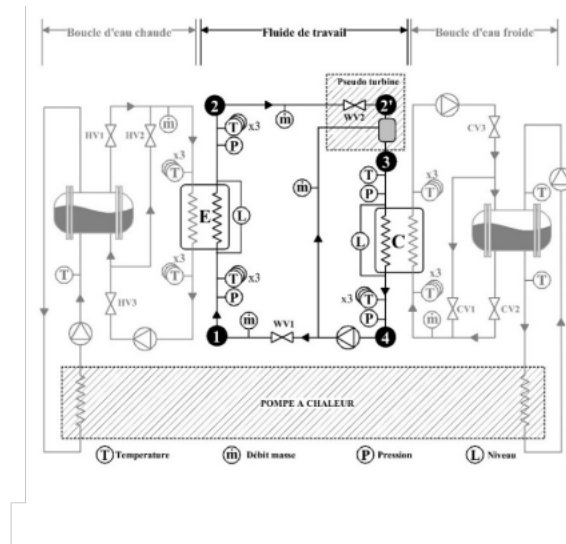


FIGURE 12: Schéma global de l'installation expérimentale ETM



FIGURE 13: Installation à la Réunion

Tiré de : "Frantz Sinama, Audrey Journoud, Alexandre Dijoux, Franck Lucas, Bertrand Clauzade, et al.. Etude expérimentale d'un prototype ETM à La Réunion. Congrès de la Société Française de Thermique 2016, May 2016,

Toulouse, France”

Comme présenté sur le schéma de l’installation, le dispositif n’utilise pas de turbine réelle. En effet, à cause de problèmes de disponibilité de turbines dimensionnées pour ce dispositif sur le marché, ce prototype présente une ”pseudo-turbine”, qui a pour but de simuler le cycle de Rankine.

6.3. Analyse énergétique du prototype et résultats

La mise au point des conditions d’essai a permis de fixer les valeurs suivantes afin de mener l’analyse du dispositif.

Paramètres	Valeurs
Température EC	27,0 °C
Débit massique EC	43,6 kg / s
Température EF	5,3 °C
Débit massique EF	31,6 kg / s
Débit de masse R717	0.357 kg / s

FIGURE 14: Conditions pour l’essai présenté

Afin de déterminer le bilan énergétique de l’installation, deux cycles ont été déterminés. Le premier est le cycle réel de l’installation (R) n’utilisant pas de turbine, et le deuxième est le cycle virtuel de l’installation (V) avec une turbine permettant de calculer la puissance brute équivalente fournie par le dispositif.

Les bilans énergétiques sur ces deux cycles mènent aux équations suivantes et après résolution au tableau de résultats expérimentaux suivant.

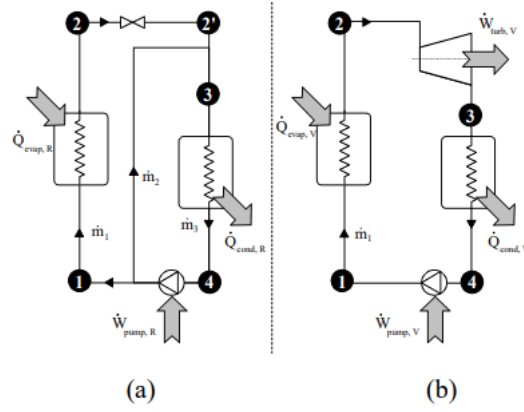


FIGURE 15: Cycle réel (a) et cycle virtuel (b)

$$\begin{cases} \dot{Q}_{evap, V} = \dot{Q}_{evap, R} = \dot{m}_1 \cdot (h_2 - h_1) \\ \dot{W}_{pump, V} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_4) ; \dot{W}_{pump, R} = \dot{m}_3 \cdot (h_1 - h_4) \\ \dot{W}_{turb, V} = \dot{m}_1 \cdot (h_3 - h_2) \\ \dot{Q}_{cond, V} = \dot{m}_1 \cdot (h_4 - h_3) ; \dot{Q}_{cond, R} = \dot{m}_3 \cdot (h_4 - h_3) \end{cases}$$

FIGURE 16: Equations de résolution

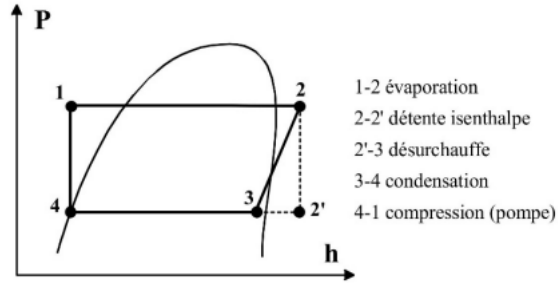


FIGURE 17: Diagramme (P,h) du fluide de travail

Ces expériences mènent ainsi à une puissance brute fournie par la pompe de 13.74 kW. En prenant en compte la consommation de la pompe, la puissance

Point	Température (°C)	Pression (bar)	Puissance (kW)	Réel	Virtuel
1	12.37	8.83	\dot{Q}_{evap}	436.04	436.04
2	20.54	8.72	\dot{Q}_{cond}	-438.92	-425.17
2'	15.7	6.89	\dot{W}_{turb}	0	-13.74
3	10.81	6.33	\dot{W}_{pump}	2.98	2.89
4	10.67	6.4	\dot{Q}_{rem}	-0.093	-0.093

Tableau 3 : Bilan énergétique des cycles réel et virtuel

FIGURE 18: Résultats expérimentaux

nette obtenue tombe à 10.86 kW et le rendement de cette installation vaut alors 2,49%.

6.4. Conclusion partielle

Nous observons donc un faible rendement pour ce dispositif. Du fait de la faible différence de température entre la source chaude et la source froide, une attention particulière doit être portée sur le dimensionnement des différents échangeurs afin de maximiser ce rendement.

7. Conclusion

L'Énergie Thermique des Mers représente un avenir prometteur dans notre quête d'énergies propres et durables. Les centrales ETM ont le potentiel de remodeler notre approvisionnement énergétique en exploitant une ressource abondante et renouvelable, l'océan. Le choix entre les cycles fermé et ouvert dans les centrales ETM est crucial pour maximiser l'efficacité énergétique. Les cycles fermés, bien que nécessitant des investissements technologiques plus importants, offrent souvent une efficacité énergétique supérieure en raison de leur capacité à maintenir des températures plus stables et contrôlées. À l'inverse, les cycles ouverts peuvent être moins complexes et moins coûteux à mettre en place, mais ils peuvent présenter des défis liés à la corrosion et à la gestion des flux d'eau.

En regardant vers l'avenir, les progrès technologiques dans les deux approches du cycle, ainsi que notre capacité à surmonter les défis techniques, auront un impact significatif sur l'adoption et l'efficacité globale des centrales ETM. En fin de compte, ces installations pourraient non seulement contribuer à diversifier notre mix énergétique, mais aussi à réduire notre empreinte carbone tout en assurant une source d'énergie stable et durable pour les générations à venir. L'ETM offre ainsi une voie vers un avenir énergétique plus propre, plus fiable et plus respectueux de l'environnement.