



**HAL**  
open science

# Modélisation d'un Cycle Organique de Rankine (ORC) pour l'énergie thermique des mers

Perceval Raybaud, Kanhan Sanjivy, Franck Lucas, Olivier Marc

► **To cite this version:**

Perceval Raybaud, Kanhan Sanjivy, Franck Lucas, Olivier Marc. Modélisation d'un Cycle Organique de Rankine (ORC) pour l'énergie thermique des mers. Congrès National de la Recherche des IUT, Université de Haute-Alsace (UHA) Mulhouse - Colmar [Université de Haute-Alsace (UHA)], Mar 2024, Mulhouse, France. hal-04619745

**HAL Id: hal-04619745**

**<https://hal.science/hal-04619745v1>**

Submitted on 21 Jun 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Modélisation d'un Cycle Organique de Rankine (ORC) pour l'énergie thermique des mers

---

Perceval Raybaud<sup>1</sup> Kanhan Sanjivy<sup>2</sup> Franck Lucas<sup>3</sup> Olivier Marc<sup>4</sup>

raybaud.perceval@gmail.com [kanhan.sanjivy@doctorant.upf.pf](mailto:kanhan.sanjivy@doctorant.upf.pf)  
franck.lucas@upf.pf [olivier.marc@univ-reunion.fr](mailto:olivier.marc@univ-reunion.fr)

<sup>1,2,3</sup> Université de la Polynésie française  
Laboratoire de Géosciences du Pacifique Sud (GEPASUD)

<sup>2</sup> Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME)  
20 avenue du Grésillé- BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

<sup>4</sup> IUT, Saint-Pierre, La Réunion  
Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT)

**Thèmes** – Énergie - Environnement - Informatique

**Résumé** – L'énergie thermique des mers ETM (Ocean Thermal Energy Conversion ou OTEC en anglais) utilise les eaux en surface et en profondeur des océans pour produire de l'électricité. Il s'agit d'un système thermodynamique utilisant un Cycle Organique de Rankine (ORC) ouvert ou fermé, fonctionnant respectivement soit avec de l'eau de mer, soit avec un autre fluide de travail. En raison de la faible différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes (environ 20-23 °C), le rendement thermodynamique idéal d'un tel cycle est assez faible, autour de 7 %. Pour explorer le potentiel de cette technologie, un prototype à terre OTEC, de 14 kWe, a été développé au laboratoire PIMENT à l'île de la Réunion afin de tester différents types d'échangeurs de chaleur. Cet article présente la modélisation d'une centrale OTEC utilisant l'ammoniac comme fluide de travail. Les résultats de simulation de ce modèle sont ensuite comparés aux données expérimentales issues du prototype à terre du laboratoire PIMENT puis à d'autres résultats issus de la littérature scientifique pour valider le changement d'échelle. Les résultats obtenus par le modèle sur certaines variables comme les températures d'eau chaude et froide en sortie de cycle ou la puissance produite à la turbine sont proches de ceux attendus avec des écarts inférieurs à 0,15 °C pour les températures et inférieurs à 4% pour les puissances.

**Mots-Clés** – Énergie thermique des mers, OTEC, ORC, SWAC

# 1 Introduction

La problématique du réchauffement climatique à l'échelle mondiale incite à l'exploration de technologies innovantes. L'une d'elles est l'Énergie Thermique des Mers (ETM) ou « Ocean Thermal Energy Conversion » (OTEC). L'île de la Réunion étant un territoire insulaire, son mix énergétique est majoritairement composé de combustion à base d'énergies fossiles importées. Pour pallier cette dépendance extérieure, le Laboratoire PIMENT a réalisé un prototype à terre d'énergie thermique des mers (PAT ETM) pouvant théoriquement fournir 14 kWe [1]. Cette technologie utilise la différence de température entre l'eau de mer en surface et celle en profondeur pour réaliser un cycle thermodynamique. L'objectif de cette étude est de se baser sur les résultats obtenus expérimentalement avec le PAT ETM pour réaliser un modèle python permettant de trouver des points de fonctionnement stationnaire du cycle.

## 2 Principe d'un cycle ORC

Les températures entre les eaux en surface (Entre 25-28°C) et celles en profondeur (5°C) permettent un écart de température ( $\Delta T$ ) de 20 à 23°C. Cela fixe un rendement idéal de Carnot à 7% (faible mais inhérent à l'OTEC) qui diminue à 3% en conditions réelles d'utilisation. Pour fonctionner avec une température de source chaude assez basse, un Cycle Organique de Rankine (ORC) avec de l'ammoniac comme fluide de travail est choisi. L'ammoniac possède des propriétés thermodynamiques appropriées.

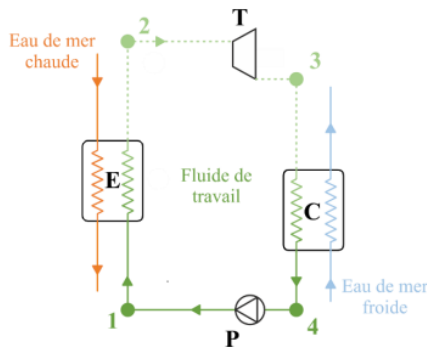


Figure 1 – Schéma du cycle ORC de l'OTEC

Dans un cycle ORC, l'ammoniac liquide va entrer dans l'évaporateur où il se réchauffe puis s'évapore (Figure 1 points 1 à 2). La vapeur d'ammoniac va passer dans une turbine pour générer de l'électricité. L'ammoniac détendu est alors diphasique (97% vapeur) et entre dans le condenseur. Il se condense et sort à l'état liquide puis passe dans une pompe pour continuer le cycle. Les phénomènes de surchauffe et de sous-refroidissement en sortie d'échangeurs sont négligés car peu présents dans les résultats du PAT ETM. Les équations qui régissent les

transferts thermiques dans les échangeurs ainsi que le travail fourni ou apporté dans les machines sont les suivantes :

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_{ft} \cdot \Delta H \quad (1)$$

$$\dot{Q}_2 = U \cdot S \cdot \Delta TLM \quad (2)$$

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}_{eau} \cdot cp \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$\dot{W} = \eta \cdot \dot{m}_{ft} \cdot \Delta H \quad (4)$$

L'équation (1) représente la puissance thermique reçue ou cédée par l'ammoniac lors de ses changements d'états ( $\Delta H$  la variation d'enthalpie de l'ammoniac). L'équation (2) représente la puissance thermique traversant les échangeurs entre l'eau et l'ammoniac ( $U$  le coefficient d'échange global,  $S$  la surface d'échange).

L'équation (3) représente la puissance thermique reçue ou cédée par l'eau de mer lors de son passage dans l'échangeur. Ces trois équations sont appliquées au condenseur et à l'évaporateur.

L'équation (4) représente le travail apporté à la pompe ou fourni par la turbine. Le terme  $\eta$  contient plusieurs rendements (isentropique, mécanique, générateur pour la turbine).

## 3 Modélisation du cycle

L'objectif de la modélisation est de déterminer un point de fonctionnement en régime stationnaire d'un cycle ORC tel que  $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3$ . Les étapes de résolution du modèle sont présentées ci-dessous :

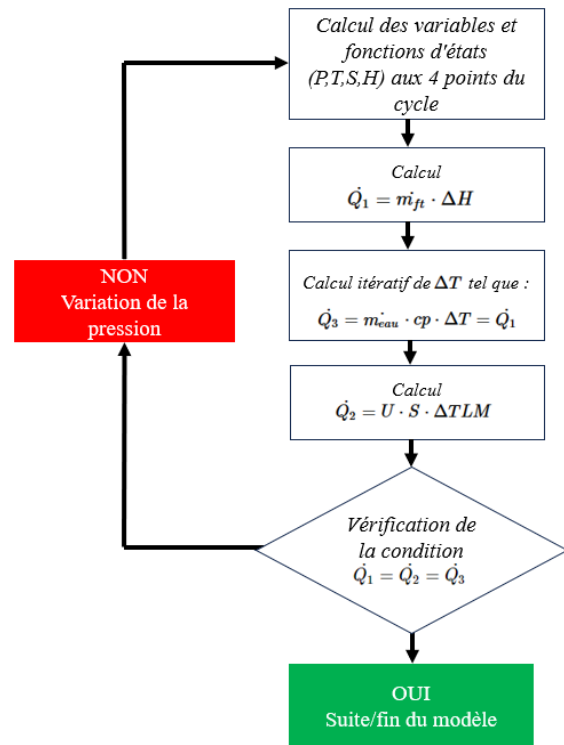


Figure 2 – Diagramme de flux du modèle

Le modèle est écrit sous python 3.7 et utilise comme librairie principale « CoolProp » qui permet de déterminer

les variables et fonctions d'états de l'ammoniac dans le cycle. L'itération se fait sur la pression car elle affecte les équations (1) et (2), jusqu'à la convergence des  $\dot{Q}$ .

Les entrées et sorties du modèles sont :

- Entrées : les températures d'eau de mer chaudes et froides entrantes, les débits d'eau de mer et d'ammoniac, les caractéristiques des échangeurs (Surfaces et coefficients d'échange global U) ainsi que des pressions initiales pour l'ammoniac dans les échangeurs.
- Sorties : les températures d'eau de mer en sortie des échangeurs, les pressions finales d'ammoniac ainsi que la puissance électrique nette en sortie.

#### 4 Résultats du modèle et comparaison à la littérature scientifique

La première étape de vérification du modèle consiste à comparer ses résultats aux données expérimentales du PAT ETM. Ces résultats se trouvent dans le tableau ci-dessous :

Table 1 – Comparaison du modèle avec les résultats expérimentaux du PAT ETM

Variables	PAT ETM	Modèle	Intervalle d'incertitude
$\dot{Q}_{evap} (kW)$	442,0 ± 3,1	<b>444,6</b>	438,9 < <b>444,6</b> < 445,1
$\dot{Q}_{cond} (kW)$	430,2 ± 2,5	<b>429,8</b>	427,6 < <b>429,8</b> < 432,7
$\dot{W}_{turbine} (kW)$	14,23 ± 0,3	<b>14,6</b>	14,5 < <b>14,6</b>
$T_{eau froide sortie} (°C)$	8,69 ± 0,1	<b>8,7</b>	8,6 < <b>8,7</b> < 8,8
$T_{eau chaude sortie} (°C)$	25,69 ± 0,1	<b>25,6</b>	25,6 < <b>25,6</b> < 25,8

Les résultats d'échanges thermiques, de travaux mécaniques et de températures d'eau de mer en sortie du cycle obtenus sont satisfaisants car dans le domaine d'incertitude des expérimentations. La valeur du travail mécanique disponible à la turbine du modèle est légèrement supérieure à celle mesurée mais cela peut s'expliquer par le fait que l'installation du PAT ETM possédait une pseudo-turbine simulant la détente de l'ammoniac vapeur. Cette comparaison expérimentale a permis une première validation du modèle comme étant une approximation correcte du fonctionnement d'un cycle ORC en régime stationnaire.

Une phase de recherche bibliographique a été réalisée afin de comparer les résultats du modèle aux résultats d'autres modèles de systèmes OTEC présents dans des articles de la littérature scientifique. Les résultats de cette comparaison inter-modèle se trouvent ci-dessous :

Table 2 – Comparaison du modèle avec les résultats de

puissance de turbine et de température d'eau froide en sortie de cycle pour différentes simulations OTEC

$\dot{W}_{turbine} (kW)$	Articles	Modèle	Erreur (%)
Satoru GOTO <i>et al.</i> [2]	18,62	18,2	2,2
Hirofumi HARA <i>et al.</i> [3]	100	103,6	3,6
Hirofumi HARA <i>et al.</i> [4]	1000	962	3,8
C.Bernardoni <i>et al.</i> [5]	3936	3661	6,9
$T_{eau froide sortie} (°C)$	Articles	Modèle	$\Delta T (°C)$
Satoru GOTO <i>et al.</i> [2]	9,02	9,02	<0,1
Hirofumi HARA <i>et al.</i> [3]	6,8	6,7	-0,1
Hirofumi HARA <i>et al.</i> [4]	8,04	7,9	-0,14
C.Bernardoni <i>et al.</i> [5]	7,26	7,11	-0,15

La table 2 ci-dessus montre la comparaison des résultats du modèle avec les résultats des simulations des articles choisis, pour les valeurs de travail produit à la turbine et de la température d'eau froide en sortie d'échangeur. Malgré le changement d'échelle des centrales OTEC, les résultats concordent car les écarts de températures restent inférieurs à 0,15°C et que le travail à la turbine est estimé à 4% d'écart près sauf pour le dernier article.

#### 5 Conclusions et perspectives

Cette étude a permis l'élaboration d'un modèle de cycle ORC applicable à l'OTEC pour déterminer des points de fonctionnement en régime permanent. Une amélioration du modèle est en cours pour affiner les résultats avec le calcul interne du rendement isentropique de la turbine. Une perspective de couplage d'un OTEC avec un système de climatisation par eau de mer profonde (SWAC) placé en série est également en cours.

#### Références

- [1] Thèse Alexandre DIJOUX, « Influence du fluide de travail, de la technologie des échangeurs et du pilotage dynamique d'un cycle ORC sur l'intérêt et les performances d'un système de conversion d'Energie Thermique des Mers », 17/12/2020
- [2] Satoru GOTO, « Web application for OTEC Simulator using Double stage Rankine cycle », dans IFAC PapersOnline 50-1(2017) 121-128
- [3] Hirofumi HARA, « Simulation study on enhancing hydrogen production in an ocean thermal energy (OTEC) system utilizing solar collector », dans Jurnal Teknologi, October 2015
- [4] Hirofumi HARA, « Design optimization of power generation and desalination application in Malaysia utilizing ocean thermal energy », dans Jurnal Teknologi, October 2015
- [5] C. Bernardoni, « Techno-economic analysis of closed OTEC cycles for power generation », dans Renewable Energy 132 (2019) 1018-1033