

# Exploration d'un cycle fermé ORC à ammoniac

## Exploration d'un cycle OTEC fermé ORC à ammoniac

### Introduction

Les cycles organiques de Rankine sont des variantes des cycles à vapeur d'eau, que l'on utilise lorsque la source chaude à partir de laquelle on souhaite produire de la puissance mécanique est à basse ou moyenne température, ou bien lorsque la puissance installée est faible et que les installations à vapeur ne sont plus économiques.

Lorsque le niveau de température de la source chaude baisse, ou que la puissance installée diminue, typiquement au-dessous d'une dizaine de MW, les performances des cycles à vapeur d'eau se détériorent, et il devient préférable de recourir à d'autres fluides thermodynamiques.

Comme beaucoup de ceux-ci sont de nature organique, on a coutume de qualifier ces cycles d'organiques, mais d'autres types de fluides, comme par exemple l'ammoniac ou le dioxyde de carbone, peuvent être employés.

Nous présentons ici un exemple de cycle ORC destiné à produire de l'électricité à partir du gradient thermique des océans.

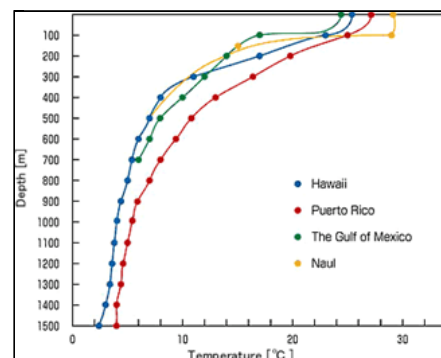
OTEC signifie en anglais Ocean Thermal Energy Conversion, et son équivalent en français est Energie Thermique des Mers (ETM).

Les cycles OTEC ont pour vocation de générer de l'électricité dans les eaux chaudes tropicales en utilisant la différence de température qui existe entre la surface à 26-28 °C et en profondeur où la température baisse jusqu'à 4 à 6 °C à partir de 1000 m, comme le montre cette figure.

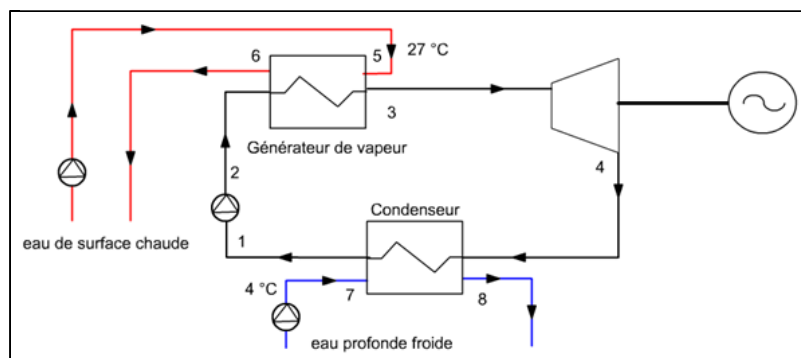
Les cycles fermés utilisent les eaux chaudes pour faire évaporer un liquide qui bout à une très basse température, tel que l'ammoniac ou un fluide organique. La vapeur produite entraîne une turbine, puis est condensée par échange thermique avec de l'eau froide provenant des couches profondes de l'océan.

Dans tous les cas, la nécessité de véhiculer de très grands débits et de pomper l'eau froide à très grande profondeur induit des consommations d'auxiliaires importantes. Même si nous ne le ferons pas dans cette exploration simplifiée, l'optimisation réelle d'un cycle OTEC doit impérativement prendre en compte ces valeurs.

Le cycle thermodynamique est analogue à celui d'un cycle de centrale à vapeur d'eau, excepté que le fluide de travail est de l'ammoniac. Le dimensionnement des échangeurs de chaleur est bien évidemment critique compte tenu du très faible écart de température entre les sources chaude et froide. Les valeurs des pincements doivent être aussi faibles que possible tout en restant réalistes.



### 1. Schéma du cycle OTEC fermé



Au point 1 en sortie de condenseur, le fluide de travail est à l'état liquide.

La pompe comprime l'ammoniac à 9 bar.

Le générateur de vapeur est un triple échangeur assurant la chauffe à l'état liquide, la vaporisation et une légère surchauffe de l'ammoniac.

La pompe et la turbine peuvent être supposées adiabatiques. Quant au générateur de vapeur et au condenseur, on peut en première approximation faire l'hypothèse qu'ils sont isobares.

### Chargement d'un modèle

#### 1. Charger le modèle

Cliquez sur le lien suivant :

Ouvrir un fichier dans Thermoptim

Vous pouvez aussi ouvrir le fichier de schéma (OTEC\_CC.dia) grâce au menu "Fichier/Ouvrir" du menu de l'éditeur de schémas, et le fichier de projet (OTEC\_CC.prj) grâce au menu "Fichier de projet/Charger un projet" du menu du simulateur.

## Paramétrage du modèle

Dans cette section, nous allons nous intéresser essentiellement au paramétrage des échangeurs de chaleur.

### 1. Paramétrage du cycle ORC

Au point 1 en sortie de condenseur, le fluide de travail est à l'état liquide, à la pression de 6,6 bar. À cette pression, la température de saturation de l'ammoniac vaut environ 12 °C. Pour nous assurer que le point est bien à l'état liquide, nous le paramétrons à température de saturation imposée, avec un écart de -0,1 °C par rapport à la saturation.

La haute pression vaut 9 bar. La pompe est supposée parfaite et le rendement isentropique  $\eta$  de la turbine est égal à 0,9.

Le paramétrage du cycle ORC ne pose pas de problème particulier.

### 2. Paramétrage du condenseur

Intéressons-nous maintenant au paramétrage du condenseur qui est un échangeur relativement simple.

*Ouvrez l'échangeur "condenseur" et examinez son paramétrage.*

*Nous connaissons l'état de l'ammoniac en entrée et en sortie de condenseur, ainsi que son débit, qui sont donc des valeurs imposées.*

*Nous supposons par ailleurs que le débit de l'eau de refroidissement vaut 15 t/s (15 000 kg/s). Il s'agit de l'eau pompée à une profondeur de l'ordre de 1000 m, à la température 4 °C. Ces deux grandeurs sont donc elles aussi imposées, et cinq contraintes sont ainsi fixées.*

*La seule valeur à calculer est la température de sortie de l'eau.*

### 3. Paramétrage du générateur de vapeur

L'ammoniac sous pression est porté à haute température dans le générateur de vapeur, l'échauffement comportant les trois étapes suivantes :

- chauffage du liquide de près de 12 °C à 21,54 °C, température de début d'ébullition à 9 bar : évolution (2–3a) ;
- vaporisation à température constante 21,54 °C : évolution (3a–3b) ;
- légère surchauffe de 21,54 °C à 21,74 °C.

Examinons comment ce triple échangeur est paramétré.

*Nous connaissons l'état de l'ammoniac en entrée et en sortie de chacune des parties de l'échangeur, ainsi que son débit, qui sont donc des valeurs imposées.*

*Le point 3b est paramétré de manière analogue, à la réserve près que le titre est égal à 1, pour indiquer l'état de vapeur.*

*Le débit et la température d'entrée de l'eau chaude dans le surchauffeur sont connus, et donc imposés, ce qui permet de déterminer la température de l'eau du point de sortie de cet échangeur ("eau chaude 1"), qui est aussi le point d'entrée de l'eau dans l'échangeur suivant, le vaporiseur.*

*Cinq grandeurs étant connues dans cet échangeur, il peut lui aussi être calculé, ce qui permet de trouver la température de l'eau du point de sortie de cet échangeur ("eau chaude 2"), qui est aussi le point d'entrée de l'eau dans l'échangeur suivant, l'économiseur.*

*De proche en proche, le générateur de vapeur peut ainsi être calculé.*

### 4. Pincements dans les échangeurs

On appelle pincement d'un échangeur l'écart de température minimal entre le fluide chaud et le fluide froid. En règle générale, on retient des valeurs de pincement de l'ordre de 5 à 10 °C au moins, mais pour un cycle OTEC, l'écart de température entre les deux sources chaude et froide est si réduit que l'on est conduit à choisir des valeurs beaucoup plus faibles.

*Ouvrez l'échangeur "condenseur" et déterminez la valeur du pincement en calculant la différence minimale de température entre le fluide chaud et le fluide froid.*

Quelle est la valeur du pincement dans le condenseur ?

Dans le triple échangeur que constitue le générateur de vapeur, vérifiez que le pincement se situe au niveau du vaporiseur.

*Ouvrez l'échangeur "vaporiseur" et déterminez la valeur du pincement en calculant la différence minimale de température entre le fluide chaud et le fluide froid.*

Quelle est la valeur du pincement dans le générateur de vapeur ?

Comme vous pouvez le constater, ces deux valeurs sont très petites. Pour les atteindre, les surfaces des échangeurs de chaleur devront être très grandes.

## **Tracé du cycle dans le diagramme (h, ln(P))**

Nous allons maintenant étudier le tracé du cycle dans le diagramme (h, ln(P)).

### **1. Première étape : chargement du diagramme des frigorisés de l'ammoniac**

Cliquez sur

ce bouton

Vous pouvez aussi ouvrir le diagramme grâce à la ligne "Diagramme Interactifs" du menu "Spécial" de l'écran du simulateur, qui ouvre une interface qui relie le simulateur et le diagramme. Double-cliquez dans le champ situé en haut à gauche de cette interface pour choisir le type de diagramme souhaité (ici "Vapeurs condensables").

Une fois le diagramme ouvert, choisissez "ammoniac" dans le menu Corps, et sélectionnez "(h,p)" dans le menu "Graphe".

### **2. Deuxième étape : chargement d'un cycle pré-enregistré correspondant au projet chargé**

Cliquez sur

ce bouton

Vous pouvez aussi ouvrir ce cycle de la manière suivante : dans la fenêtre du diagramme, choisissez "Charger un cycle" dans le menu Cycle, et sélectionnez "cycleOTEC\_NH3.txt" dans la liste des cycles disponibles. Cliquez ensuite sur la ligne "Points reliés" du menu Cycle.

On retrouve bien l'allure habituelle du cycle. La surchauffe étant très faible, la détente a lieu en presque totalité dans la zone d'équilibre liquide-vapeur.

## **Changement de fluide**

Dans le modèle précédent, le fluide était de l'ammoniac. Nous allons maintenant voir comment il est possible de changer de fluide sans avoir à complètement reconstruire le modèle.

Cependant, comme la loi de pression saturante du nouveau fluide sera différente de celle de l'ammoniac, un certain nombre d'éléments devront être reparamétrés.

### **1. Paramétrage du modèle**

Commençons par remplacer l'ammoniac par du butane en utilisant le gestionnaire de corps.

Pour changer de fluide, activez la ligne Gestionnaire de corps dans le menu Spécial du simulateur.

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquez sur "Afficher les corps".

Dans la liste, s'affichent deux corps, l'ammoniac et l'eau, avec leur type (vapeur). Sélectionnez "ammoniac". La liste des points correspondants s'affiche dans la liste du bas.

Cliquez alors sur "Remplacer le corps", et sélectionnez "butane" dans la liste des vapeurs condensables.

Des messages s'affichent pour indiquer que les échangeurs ne sont plus calculables. Cliquez sur "OK" à chaque fois.

Si vous affichez les valeurs dans l'éditeur de schémas, vous voyez que les températures de vaporisation et de condensation sont de 74,7 °C et 61,3 °C, c'est-à-dire beaucoup trop élevées.

Nous allons maintenant déterminer les pressions haute et basse du cycle à butane.

Ouvrez le point 4 en sortie de turbine et entrez 12 °C dans la champ des températures, puis cliquez sur "imposer la pression de saturation".

La valeur de la pression de saturation est alors calculée : 1,594 bar.

Cliquez alors sur "non contraint", et entrez 1,6 bar comme valeur de la pression, puis calculez le point.

Ouvrez le point 2 en sortie de pompe et entrez 22 °C dans la champ des températures, puis cliquez sur "imposer la pression de saturation".

La valeur de la pression de saturation est alors calculée : 2,218 bar.

Cliquez alors sur "non contraint", et entrez 2,2 bar comme valeur de la pression, puis calculez le point.

Recalculez ensuite plusieurs fois dans l'écran du simulateur jusqu'à ce que le bilan se stabilise.

Répondez "OK" aux messages d'erreur qui sont affichés tant que le modèle n'est pas complètement reparamétré.

Notez que nous n'avons utilisé "imposer la pression de saturation" que comme paramétrage provisoire et non définitif, car, dans les modèles de cycles, il est en règle générale préférable de considérer comme connues les pressions plutôt que les températures. Ceci vient en particulier de ce que l'isobare est l'évolution de référence pour les transferts de chaleur ou les combustions en système ouvert.

## 2. Ajustement du débit de butane

Le modèle que nous venons d'obtenir est cohérent avec celui dont le fluide de travail était l'ammoniac, mais sa puissance est beaucoup plus faible : 3,13 MW au lieu de 9,6 MW.

Il est donc nécessaire de tripler environ le débit de butane, ce que vous pouvez faire en le modifiant dans la transfo dont le débit est imposé, c'est-à-dire l'économiseur.

En entrant une valeur de 840 kg/s, vous obtenez une puissance comparable.

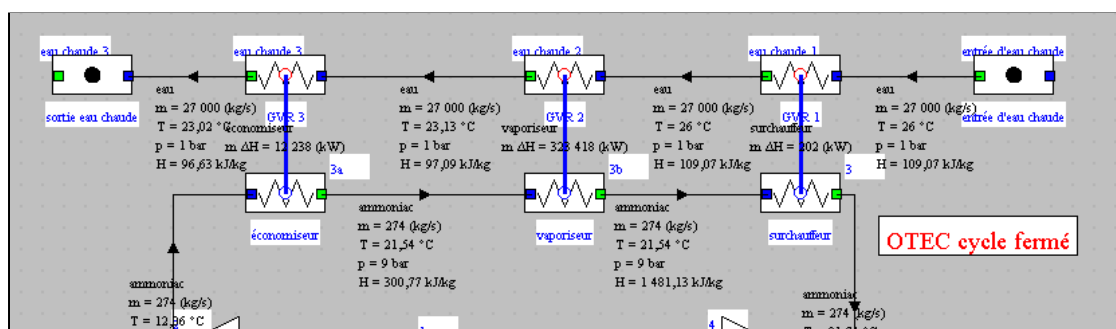
Si vous rencontrez une difficulté, chargez le nouveau modèle de cycle ORC au butane.

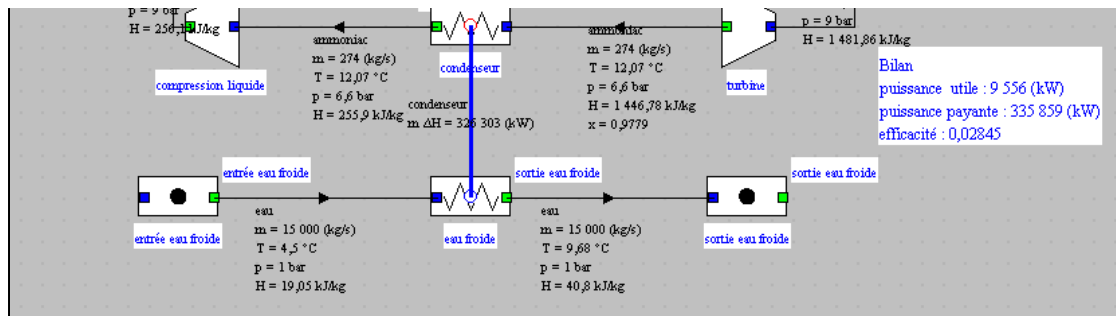
## 3. Chargement du modèle de cycle ORC au butane

Cliquez sur le lien suivant : [Ouvrir un fichier dans Thermoptim](#)

Vous pouvez aussi ouvrir le fichier de schéma (OTEC\_CC\_but.dia) grâce au menu "Fichier/Ouvrir" du menu de l'éditeur de schémas, et le fichier de projet (OTEC\_CC\_but.prj) grâce au menu "Fichier de projet/Charger un projet" du menu du simulateur.

Vous pouvez maintenant comparer ce cycle avec celui à l'ammoniac.





#### 4. Affichage du cycle dans le diagramme du butane

Pour afficher le cycle dans le diagramme du butane, vous pouvez opérer comme suit.

Commencez par fermer la fenêtre du diagramme des frigorigènes de l'ammoniac.

Ouvrez l'interface entre le simulateur et les diagrammes en activant la ligne "Diagramme interactifs" du menu "Spécial" du simulateur.

Double-cliquez dans le champ situé en haut à gauche de cette interface pour choisir le type de diagramme souhaité (ici "Vapeurs condensables").

Une fois le diagramme ouvert, choisissez "butane" dans le menu Corps, et sélectionnez "(h,p)" dans le menu "Graphe".

Revenez à l'interface entre le simulateur et les diagrammes et cliquez sur "Mettre à jour la table des points".

Désélectionnez tous les points dont le corps est l'eau, puis cliquez sur "Mettre à jour le diagramme à partir du simulateur". Les points apparaissent alors dans le diagramme.

Reliez-les entre eux en sélectionnant la ligne "Points reliés" du menu "Cycle". Les points sont reliés entre eux, mais le cycle n'est pas complètement fermé.

Vous pouvez aussi cliquer sur

Vous pouvez aussi ouvrir ce cycle de la manière suivante : dans la fenêtre du diagramme, choisissez "Charger un cycle" dans le menu Cycle, et sélectionnez "cycleOTEC\_but.txt" dans la liste des cycles disponibles. Cliquez ensuite sur la ligne "Points reliés" du menu Cycle.

Comme vous pouvez le remarquer, la détente prend place entièrement dans la zone vapeur, alors qu'elle se déroulait en zone humide avec l'ammoniac. Cela vient de la forme des courbes des adiabatiques réversibles ou isentropiques.

### Conclusion

Cette exploration vous a permis de découvrir un cycle ORC modélisé dans Thermoptim et de voir comment il est possible de changer de fluide.

Vous pouvez utiliser ce modèle pour analyser la sensibilité du modèle à divers paramètres, comme par exemple le rendement isentropique de la turbine.