

L'énergie géothermique

EL KHAOUI Safae



Sommaire

- Introduction
- Les différents types de la géothermie
- Les différents centrales géothermiques
- Facteurs influenceurs des performances
- Cycles de production d'énergie électrique
- Les performances d'un cycle
- Rendement des cycles
- Comparaison du ORC et du KCS 11
- Fluides similaires au $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$
- Conclusion



Introduction

La géothermie une source renouvelable inépuisable, qui utilise la chaleur présente naturellement dans le sol pour produire de l'énergie de façon ininterrompue, avec une puissance constante, elle contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Les différents types de la géothermie

- **La géothermie à très basse énergie:** caractérisée par une température de sol $10^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 15^{\circ}\text{C}$
- **La géothermie à basse énergie:** caractérisée par une température de sol $30^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 100^{\circ}\text{C}$
- **La géothermie à moyenne énergie:** caractérisée par une température de sol $100^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 180^{\circ}\text{C}$
- **La géothermie à haute énergie:** caractérisée par une température de sol $180^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 380^{\circ}\text{C}$

Les centrales
géothermiques

Centrales à vapeur sèche

Centrales à condensation

**Centrales à
cycle combinée**

Facteurs influanceurs des performances



**FORAGES ET CIRCUIT DE
PRODUCTION**



**CYCLES
PRODUCTION D'ÉNERGIE
ÉLECTRIQUE**



**FLUIDE DE TRAVAIL DES
CYCLES**

Cycles de production d'énergie électrique

- Cycle de Carnot
- Cycle de Rankine
- Cycle de Rankine/Hirn
- Cycle Organique de Rankine (ORC)
- Cycle de Kalina

Cycle de Carnot

- **Procédé 1-2**: expansion isotherme à la température T_H .
- **Procédé 2-3**: expansion isentropique de température T_H à T_C .
- **Procédé 3-4**: compression isotherme à la température T_C .
- **Procédé 4-1**: compression isentropique de température T_C à T_H .

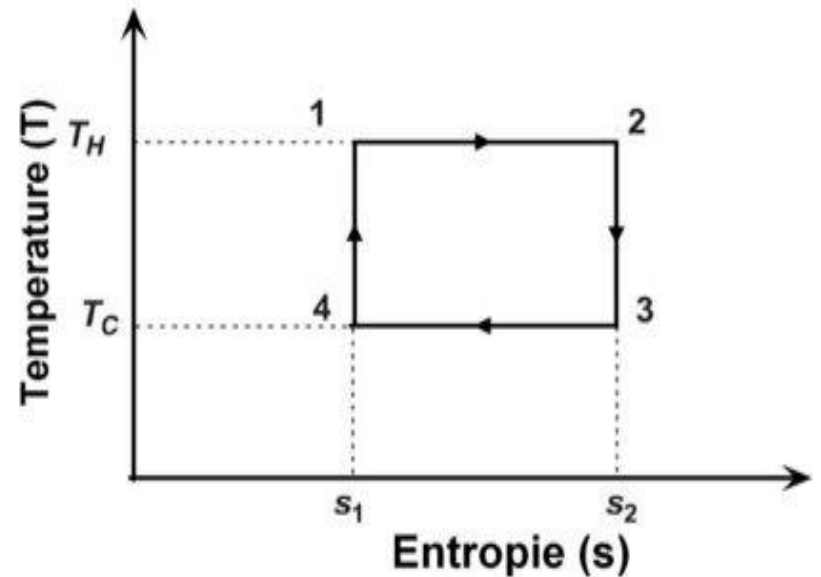


Diagramme T-S du Cycle de Carnot

Cycles de production d'énergie électrique

- Bilan d'entropie du processus 1-2: $Q_H / T_H = m(s_2 - s_1)$
- Bilan d'entropie du processus 3-4: $Q_C / T_C = m(s_3 - s_4)$
- Bilan énergétique du cycle: $W_{net} = Q_H - Q_C$
- Le rendement du cycle de Carnot :

$$\eta_{Carnot} = W_{net} / Q_H = (Q_H - Q_C) / Q_H = 1 - Q_C / Q_H$$

Reconnaissons que **s3 - s4 = s2 - s1** donc :

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

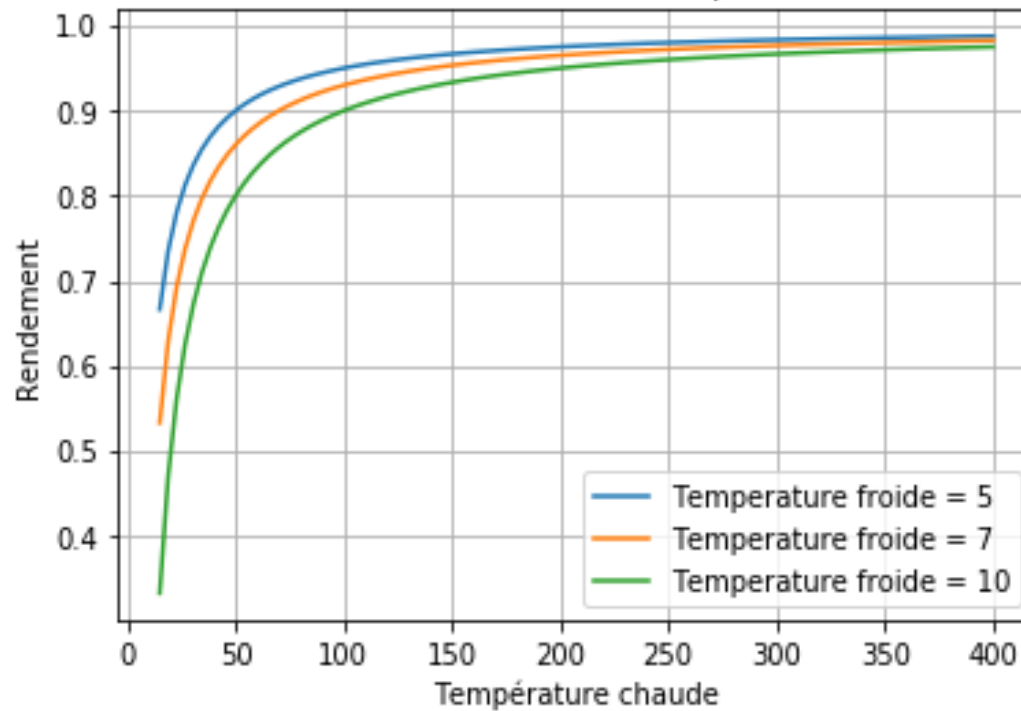
Le cycle de Carnot accomplit le rendement le plus élevé possible de n'importe quel cycle de puissance opérant entre deux températures fixées.

Cycles de production d'énergie électrique

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4
5 Tf = [5,7,10]
6 def F1(Tc):
7     return 1- (Tf[0]/Tc)
8 def F2(Tc):
9     return 1- (Tf[1]/Tc)
10 def F3(Tc):
11     return 1- (Tf[2]/Tc)
12
13 nbr_de_points = 100
14 Tc = np.linspace(15,400,nbr_de_points)
15 Y1,Y2,Y3 = np.zeros(nbr_de_points),np.zeros(nbr_de_points),np.zeros(nbr_de_points)
16
17 for i in range(nbr_de_points):
18     Y1[i] = F1(Tc[i])
19     Y2[i] = F2(Tc[i])
20     Y3[i] = F3(Tc[i])
21
22 plt.plot(Tc,Y1, label = "Temperature froide = 5 Celsius ")
23 plt.plot(Tc,Y2, label = "Temperature froide = 7 Celsius")
24 plt.plot(Tc,Y3, label = "Temperature froide = 10 Celsius")
25 plt.legend()
26 plt.xlabel("Température chaude")
27 plt.ylabel("Rendement")
28 plt.title("Variation du rendement en fonction de la température de la source chaude")
29 plt.grid()
30 plt.show()
31
```

Cycles de production d'énergie électrique

Variation du rendement en fonction de la température de la source chaude

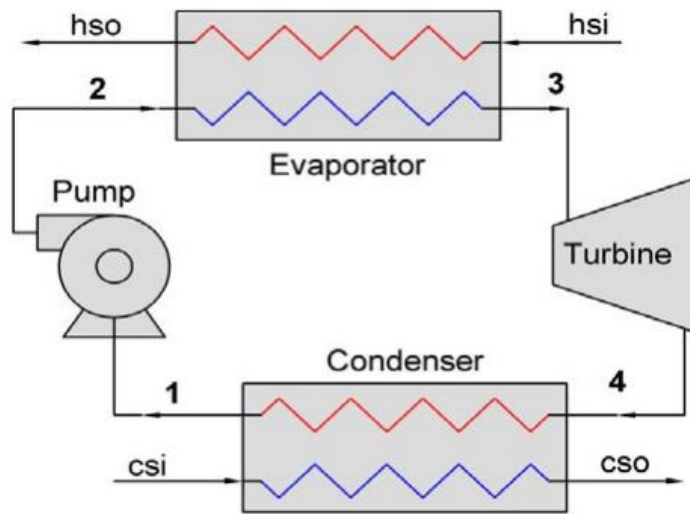


Cycle de Rankine

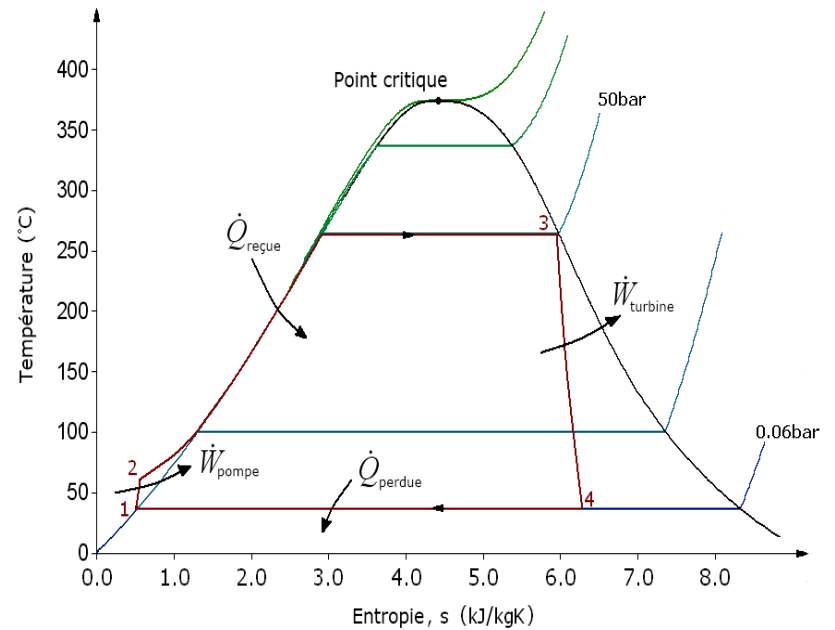
- **1→2** : Compression adiabatique et réversible (isentropique).
- **2→3** : Vaporisation isobare et irréversible.
- **3→4** : Détente adiabatique et réversible (isentropique).
- **4→1** : Liquéfaction isobare et irréversible.

L'évaporation isobare du fluide peut être divisée en deux étapes successives : chauffe du liquide de façon isobare uniquement puis évaporation isobare et isotherme.

Cycles de production d'énergie électrique



(a)

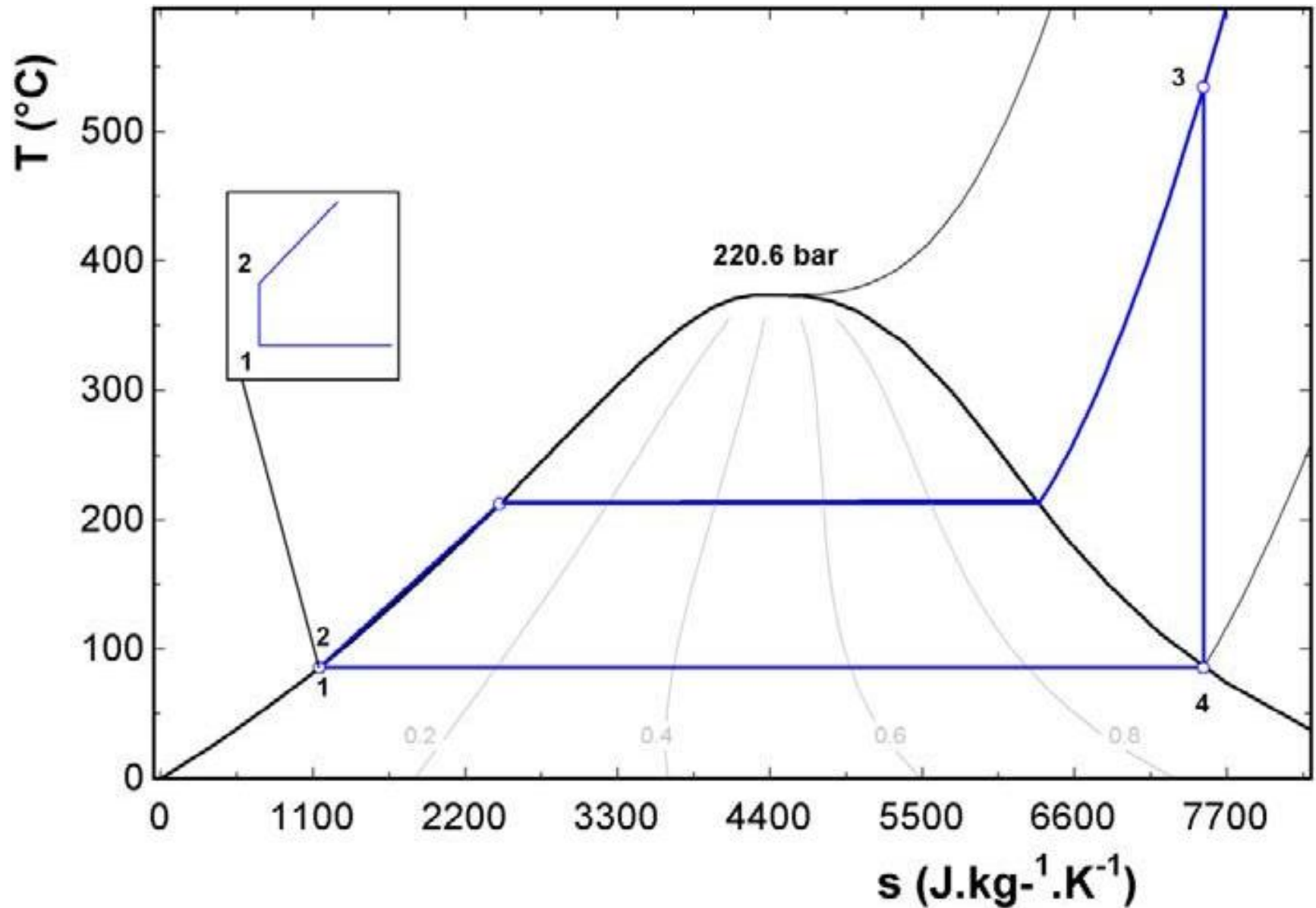


Cycle de Rankine/Hirn

La détente isentropique 3-4 correspond à une marche en régime humide et donc sujette à des limitations technologiques (érosion de la turbine si le titre en vapeur s'éloigne trop de la saturation vapeur: $x < 1$).

Pour obtenir en sortie de la turbine une vapeur saturée ($x=1$), Gustave-Adolphe Hirn (1815-1890), a proposé d'introduire en turbine une vapeur surchauffée.

Cycles de production d'énergie électrique



Cycles de production d'énergie électrique

Le cycle de Rankine réel diffère de celui idéal qui se présente dans l'irréversibilité du système et des pertes énergétique au niveau des 4 sous-système du cycle de Rankine:

- **Irréversibilité dans la pompe:**

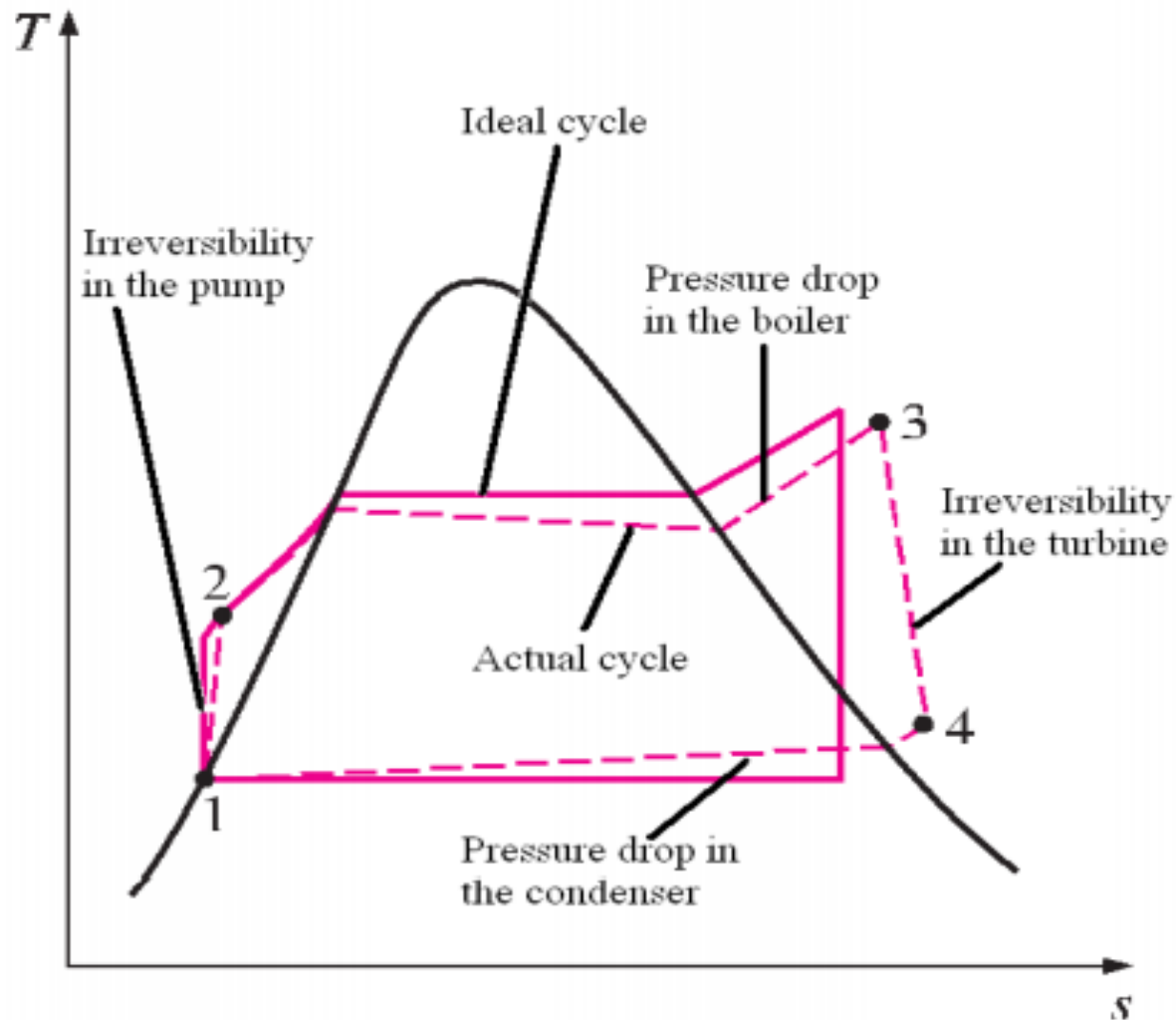
$$\eta_{is,p} = \frac{W_{is}}{W_r} = \frac{h_{p,out}^{is} - h_{p,in}}{h_{p,out} - h_{p,in}}$$

- **Irréversibilité dans la turbine:**

$$\eta_{is,t} = \frac{W_r}{W_{is}} = \frac{h_{t,in} - h_{t,out}}{h_{t,in} - h_{t,out}^{is}}$$

- **Frottement du fluide de travail:** le fluide de travail doit être pompé à une pression plus élevée que la pression demandée par le cycle idéal
- **Irréversibilités liées aux transferts de chaleur dans la chaudière et le condenseur.**
- **Perte thermique:** Pour compenser toutes ces pertes thermiques indésirables, plus de chaleur doit être transférée au fluide de travail dans la chaudière.

Cycles de production d'énergie électrique



Ecart entre le cycle de Rankine réel et idéal

Cycle organique de Rankine (ORC)

Les cycles Organiques de Rankine (ORC) sont basés sur le cycle de Rankine « classique » à la différence que le fluide de travail est non pas l'eau, mais bien un fluide organique.

L'avantage des cycles ORC par rapport aux cycles de Rankine à eau dits « classiques » est de permettre une conception plus simple de la chaudière et de sa régulation lorsque le niveau de température de la source chaude est faible.

Cycles de production d'énergie électrique

Afin d'optimiser les performances du cycle organique de Rankine (ORC) on peut rajouter au cycle un échangeur qui joue le rôle d'un récupérateur.

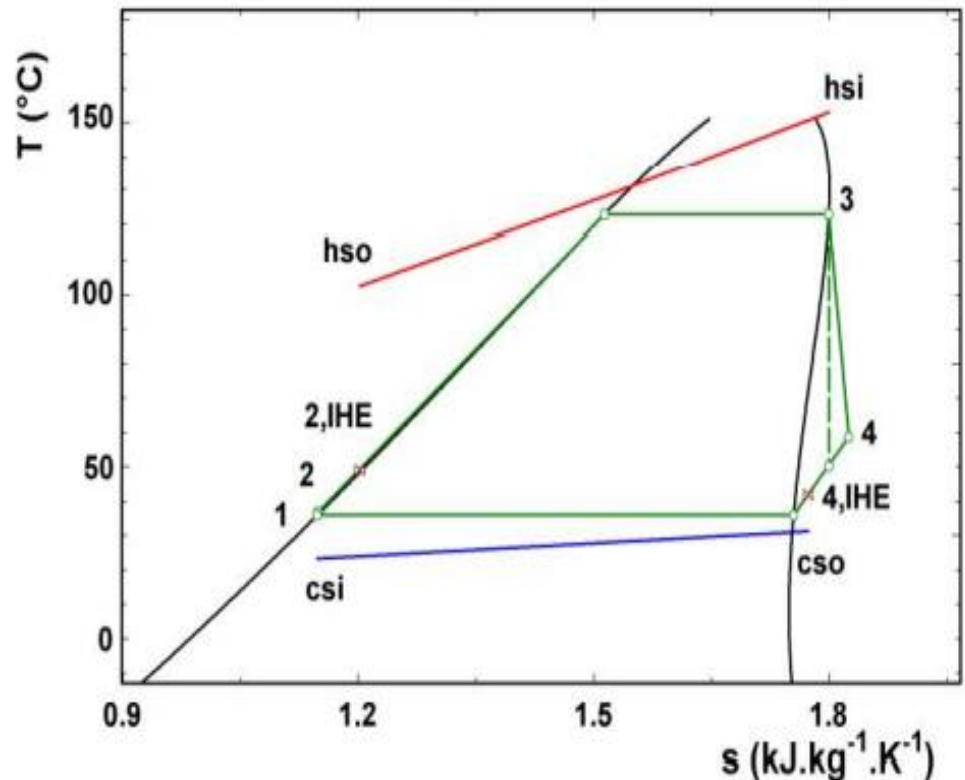
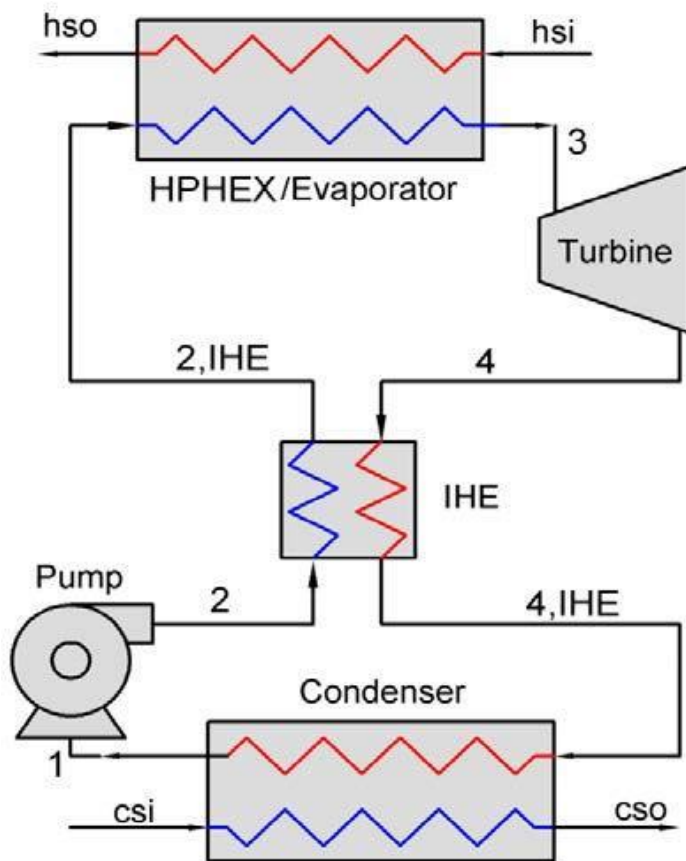


Diagramme TS du cycle ORC avec récupérateur

Cycle de Kalina

Le cycle de Kalina utilise des mélanges eau-ammoniac comme fluide de travail. Ils ont été développés initialement dans le but d'améliorer les rendements des installations à cycle combiné. Le principe de base joue sur l'utilisation des changements de concentration des phases durant les changements d'état du mélange.

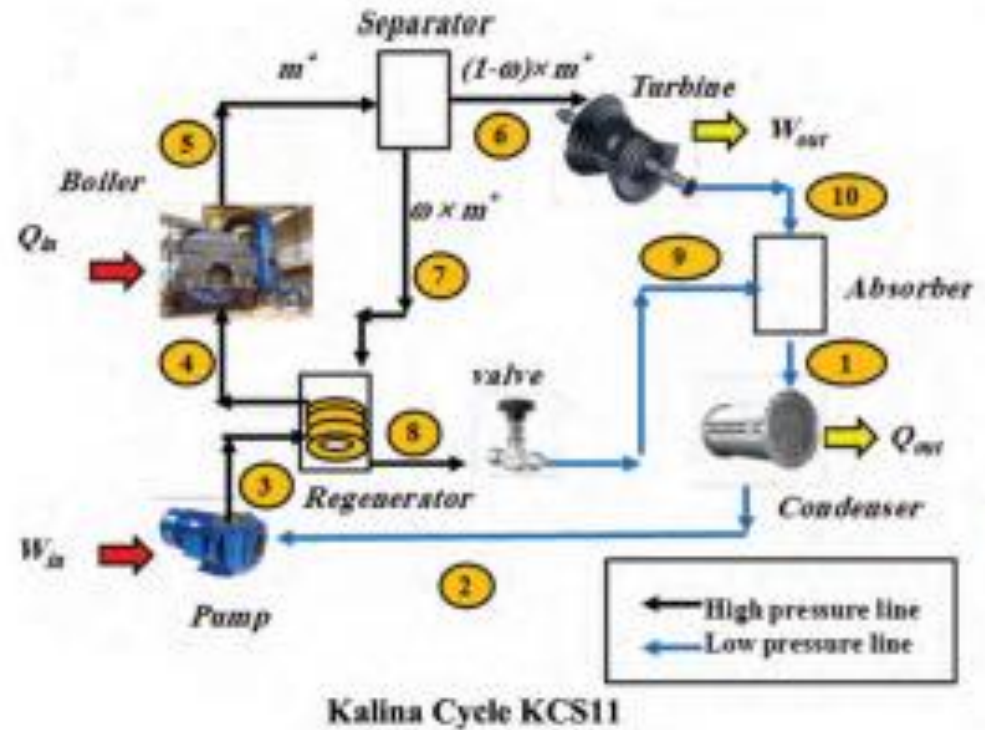
Deux cycles de Kalina ont été définis pour des applications géothermiques : KCSII et KCS12.

Il ressort de l'étude réalisée par l'Institut d'Energétique de l'Université de Pérougia (Italie) que le cycle KCS I 2 n'est réellement utilisable que pour des températures de source chaude supérieures à 210°C . Dans la présente étude la température de la source chaude doit pouvoir évoluer entre 100°C et 220°C donc seul le cycle KCS11 sera modélisé.

Cycles de production d'énergie électrique

KCS 11

Le KCS 11 se compose d'**une turbine**, d'**un absorbeur**, d'**un condenseur**, d'**un évaporateur**, d'**un séparateur**, d'**un régénérateur**, d'**une pompe** et d'**une vanne d'étranglement**.



Cycles de production d'énergie électrique

Dans **l'évaporateur**, le mélange ammoniac-eau est réchauffé par la source de chaleur basse température puis passe au séparateur. Dans **le séparateur**, la partie vapeur saturée du mélange se sépare du liquide. Le mélange riche en vapeurs saturées d'ammoniac se dilate ensuite à travers **la turbine** produisant une puissance de sortie, puis il passe à travers **l'absorbeur**. La solution ammoniac-eau quitte l'absorbeur vers le **condenseur** où elle est condensée puis elle est pompée pour augmenter sa pression jusqu'à celle correspondant à l'évaporateur. Le mélange liquide chaud saturé faible en ammoniac-eau quittant le séparateur est ensuite dirigé vers **le régénérateur** où il est refroidi par le mélange riche en ammoniac revenant à l'évaporateur. Après le régénérateur, la solution faible en ammoniac passe à travers **une vanne d'étranglement** pour abaisser sa pression.

Les performances d'un cycle

Afin de comparer différentes solutions technologiques entre elles, on définit certaines grandeurs représentatives des performances d'un cycle. Celles qui sont principalement utilisées pour l'étude des centrales géothermiques sont **le travail spécifique** et **le rendement énergétique**.

Les fluides de travail utilisés pour l'ORC sont: NH₃ et R134a (dans notre étude)

Rendement des cycles

Cycle de Rankine/Hirn

- Pour le cycle idéal:

$$W_{net} = W_t - W_p$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_h}$$

- Pour le cycle réel:

$$W_{net} = \eta_{is,t} W_t - \frac{W_p}{\eta_{is,p}} - W_{p,comp}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_h + Q_{loss}}$$

Rendement des cycles

$W_{p,comp}$: le travail additionnel nécessaire de la pompe pour compenser les chutes de pression du fluide de travail à travers des tuyaux et les composants du cycle.

Q_{loss} : la quantité de chaleur additionnelle nécessaire pour compenser la perte thermique du fluide de travail à travers le cycle (excluant le condenseur) à cause du transfert de chaleur entre le fluide de travail et l'environnement.

Rendement des cycles

KCS 11

La modélisation du KCS11 est réalisée en appliquant les équations d'énergie d'écoulement constant et de bilan massique aux divers composants du système en négligeant les changements d'énergie cinétique et potentielle et les pertes par friction. En supposant que la pompe (h_{pump}) et la turbine (h_{turb}) ont un rendement isentropique de 80 %, le travail spécifique requis par la pompe (w_{pump}) et le travail spécifique produit par la turbine (w_{turb}) ont été calculés par :

$$w_{\text{pump}} = \left(\frac{v_2 \times (P_3 - P_2)}{\eta_{\text{pump}}} \right) = h_3 - h_2$$

$$w_{\text{turb}} = \left((1 - \omega) \times \frac{h_6 - h_{10,s}}{\eta_{\text{turb}}} \right) = (1 - \omega) \times (h_6 - h_{10})$$

Rendement des cycles

Où:

w : le rapport du débit massique de la solution faible en ammoniac sortant du séparateur vers le régénérateur (état 7) et du débit massique de la solution riche en ammoniac entrant dans le séparateur (état 5).

v2 : le volume spécifique à l'entrée de la pompe

h6 : l'enthalpie spécifique à l'entrée de la turbine

h10 : l'enthalpie spécifique à la sortie de la turbine

Ils sont obtenus en fonction de la température, de la pression et de la concentration en ammoniac dans la solution.

h10,s : l'enthalpie spécifique de la solution ammoniac-eau en supposant une expansion isentropique à travers la turbine.

Le détendeur après le régénérateur est supposé adiabatique, donc l'enthalpie du fluide à l'entrée est égale à celle à la sortie de la vanne :

$$h9 = h8$$

Rendement des cycles

Le séparateur et l'absorbeur sont supposés adiabatiques sans chauffage ou refroidissement externe appliqué :

$$h_5 - h_6 = \omega \times (h_7 - h_6)$$

$$h_1 - h_{10} = \omega \times (h_9 - h_{10})$$

Pour le régénérateur, en supposant aucune perte de chaleur vers l'environnement et une différence de température minimale (point de pincement) de 4 K, le taux d'énergie absorbée par la solution riche en ammoniac (état 3 à 4) est égal à la chaleur perdue par l'ammoniac solution faible (état 7 à état 8) donc :

$$h_4 - h_3 = \omega \times (h_7 - h_8)$$

Pour l'évaporateur et le condenseur, l'énergie spécifique absorbée de la source de chaleur et celui rejeté vers le dissipateur de chaleur sont donné par:

$$q_e = h_5 - h_4$$

$$q_c = h_1 - h_2$$

Rendement des cycles

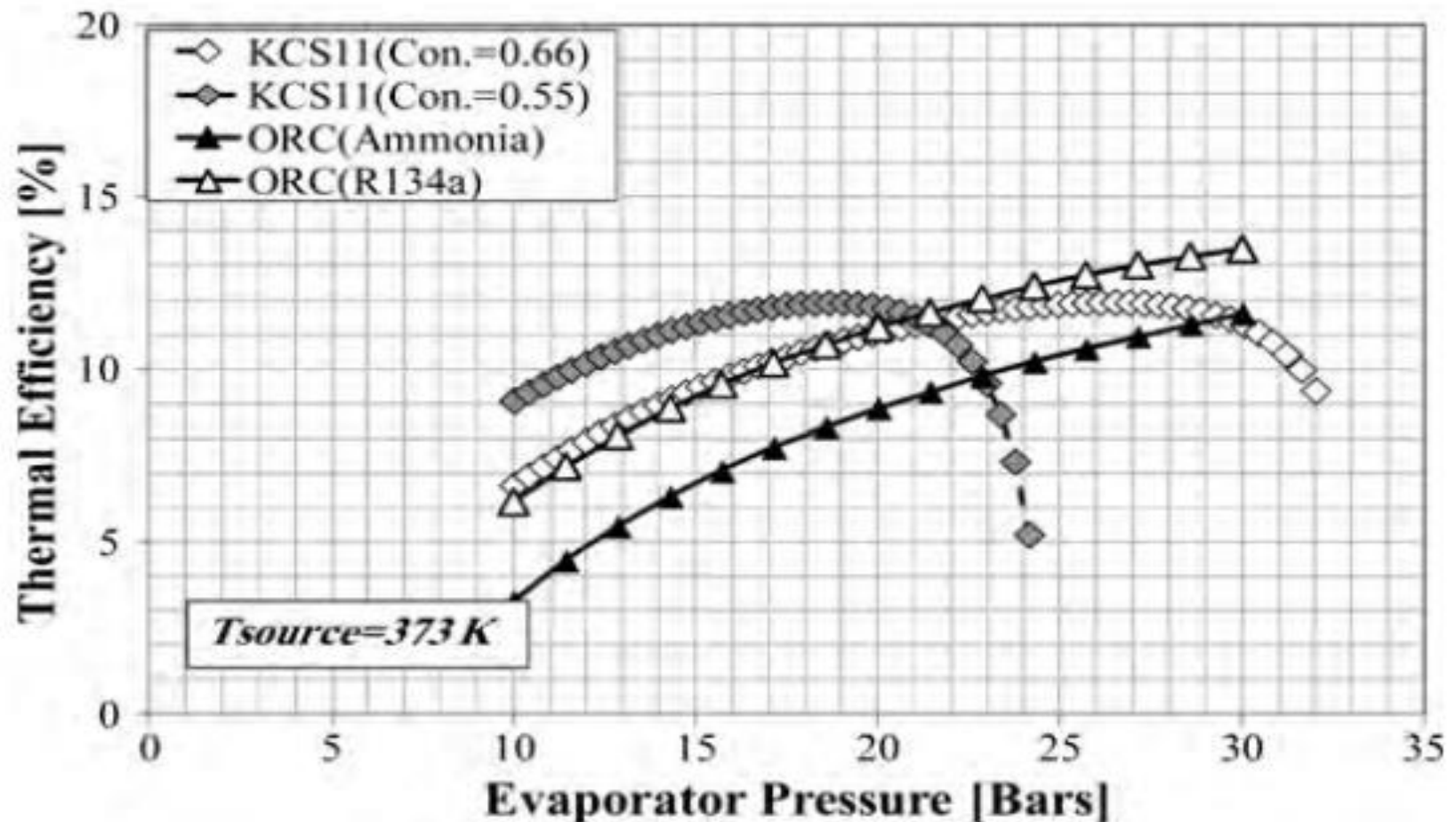
L'efficacité thermique du KCS11 peut lors être déterminée de:

$$\eta = \left(\frac{W_{\text{net}}}{q_c} \right) \times 100$$

où la puissance nette est déterminée par :

$$W_{\text{net}} = (1 - w) (h_6 - h_{10}) - (h_3 - h_2)$$

Comparaison du ORC et du KCS 11



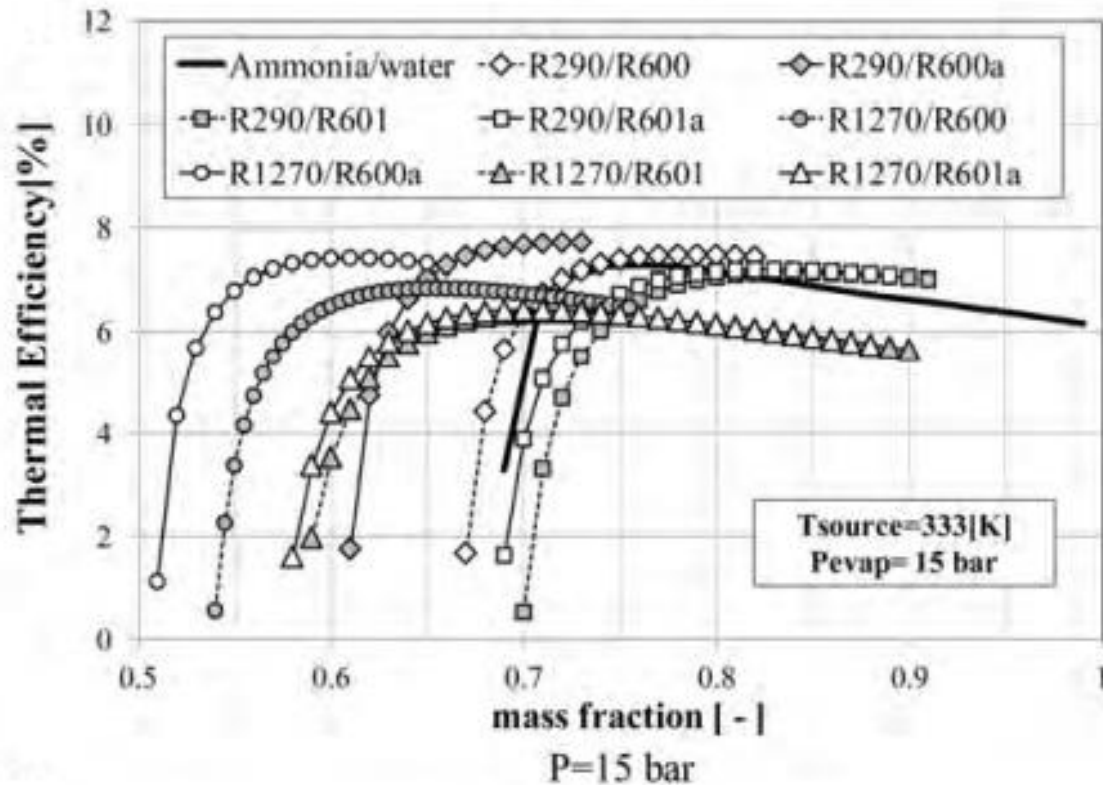
Comparaison du ORC et du KCS 11

On constate que le rendement thermique du cycle Kalina avec une concentration ammoniac-eau de 0,55 est significativement supérieur à celui de l'ORC utilisant l'ammoniac et le R134a à des pressions d'évaporation inférieures à 20 bars.

Fluides similaires au $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$

Les précautions concernant la toxicité de l'ammoniac ont conduit à étudier le potentiel d'autres paires de travail non toxiques qui peuvent soit surpasser, soit avoir une performance comparable à celle de l'ammoniac-eau.

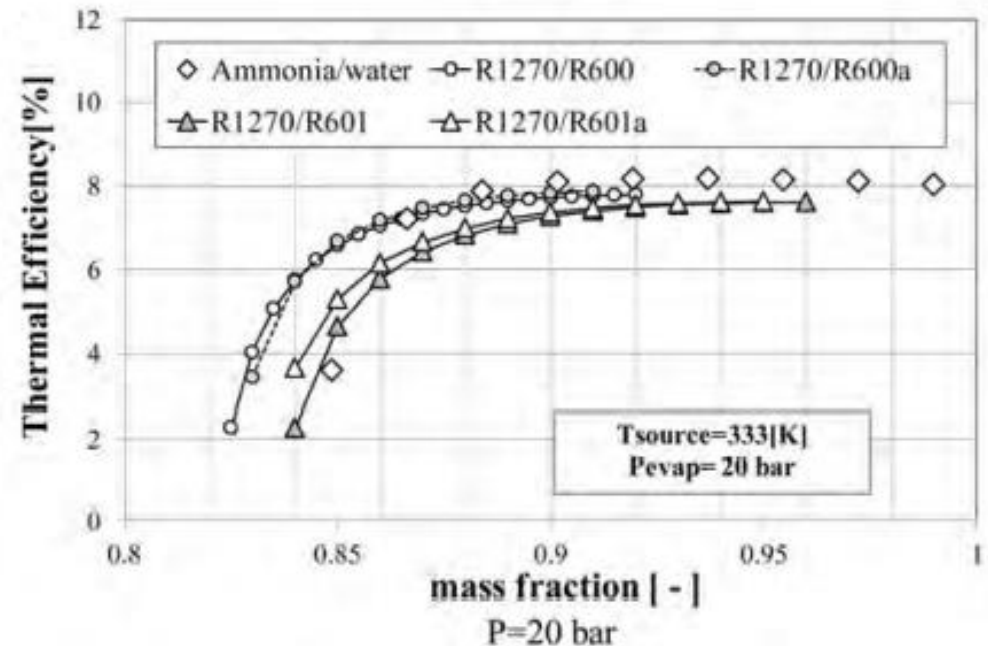
Fluides similaires au NH₃-H₂O



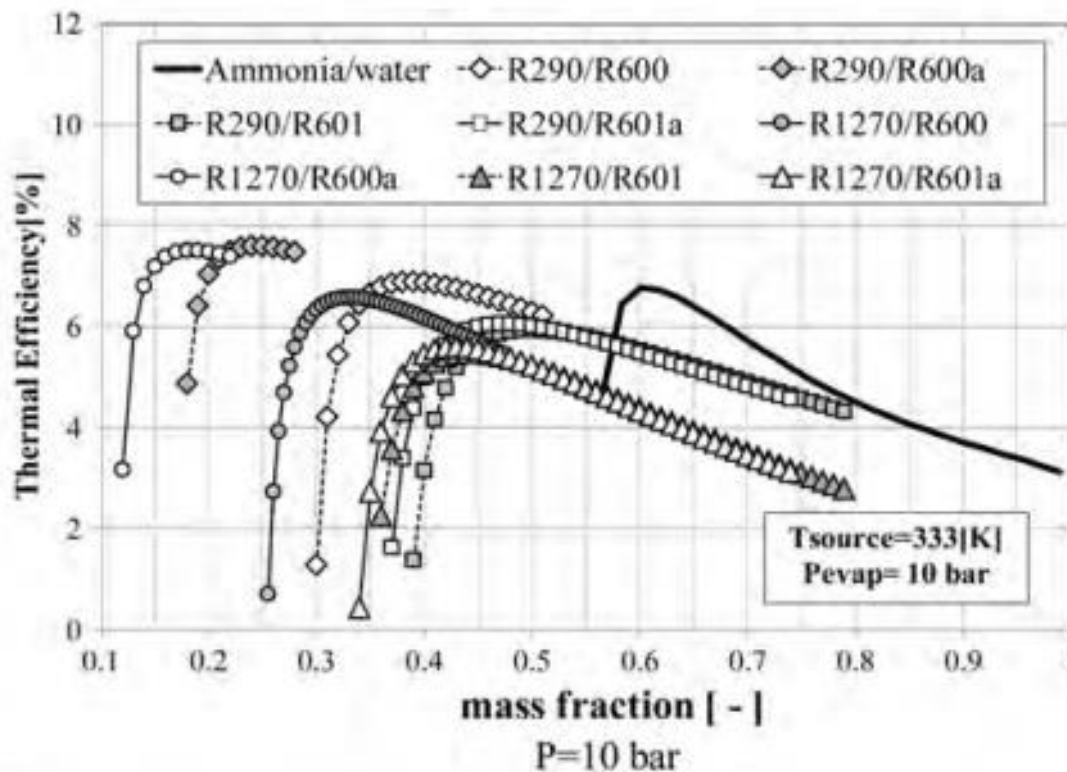
Cette figure montre que les mélanges R290-R600a, R1270-R600a, R290-R600 et R1270-R600 ont des **performances comparables** à celles du mélange NH₃-H₂O pour la fraction massique de 0,55 - 0,8.

Fluides similaires au NH3-H2O

Cette figure montre que les mélanges de propylène ont des **performances comparables** avec celui du mélange ammoniac-eau pour la fraction massique de 0,85 à 0,95.



Fluides similaires au NH₃-H₂O



Cette figure montre que R290 -R600a et R1270 - R600a **surpasse** l'ammoniac -eau à la fraction massique de 0,15- 0,25 et R290-R600 et R1270 -R600 ont **performances comparables** à celles de l'ammoniac-eau mélange pour la fraction massique de 0,3 -0,5.



Conclusion