

Fiche-guide de TD sur la modélisation d'un système de génération d'électricité à partir d'un étang solaire à gradient inverse

1) Objectifs du TD

L'objectif du projet est d'étudier le fonctionnement de centrales électriques utilisant le gradient thermique inverse existant dans des étangs solaires (en anglais solar ponds, figure 3.1) et de montrer comment on peut les modéliser de manière réaliste avec ThermoOptim.

Le présent document est un extrait de la fiche-guide complète avec résultats, qui est réservée aux enseignants. C'est pour cette raison que la numérotation des figures comporte des lacunes.

Les étangs solaires à gradient inverse (solar ponds en anglais), sont des capteurs solaires d'un type particulier. Ce sont des réservoirs d'eau salée (NaCl ou MgCl₂) d'une surface de plusieurs milliers de m², dont le fond est recouvert d'une surface absorbante. Pour éviter la convection interne et les pertes de chaleur qui en résultent, l'étang est divisé verticalement en trois zones :

- une zone superficielle peu épaisse à basse concentration en sel (1 g/cm³), brassée par l'effet du vent et de la convection, qui est à température à peu près homogène
- une zone de 1 m à 1,5 m, de concentration saline croissant avec la profondeur, le gradient salin empêchant l'apparition de la convection
- une zone inférieure d'une hauteur de 2 à 4 m, de concentration saline homogène et très élevée (> 1,3 g/cm³, quelquefois même saturée), qui stocke la chaleur solaire.

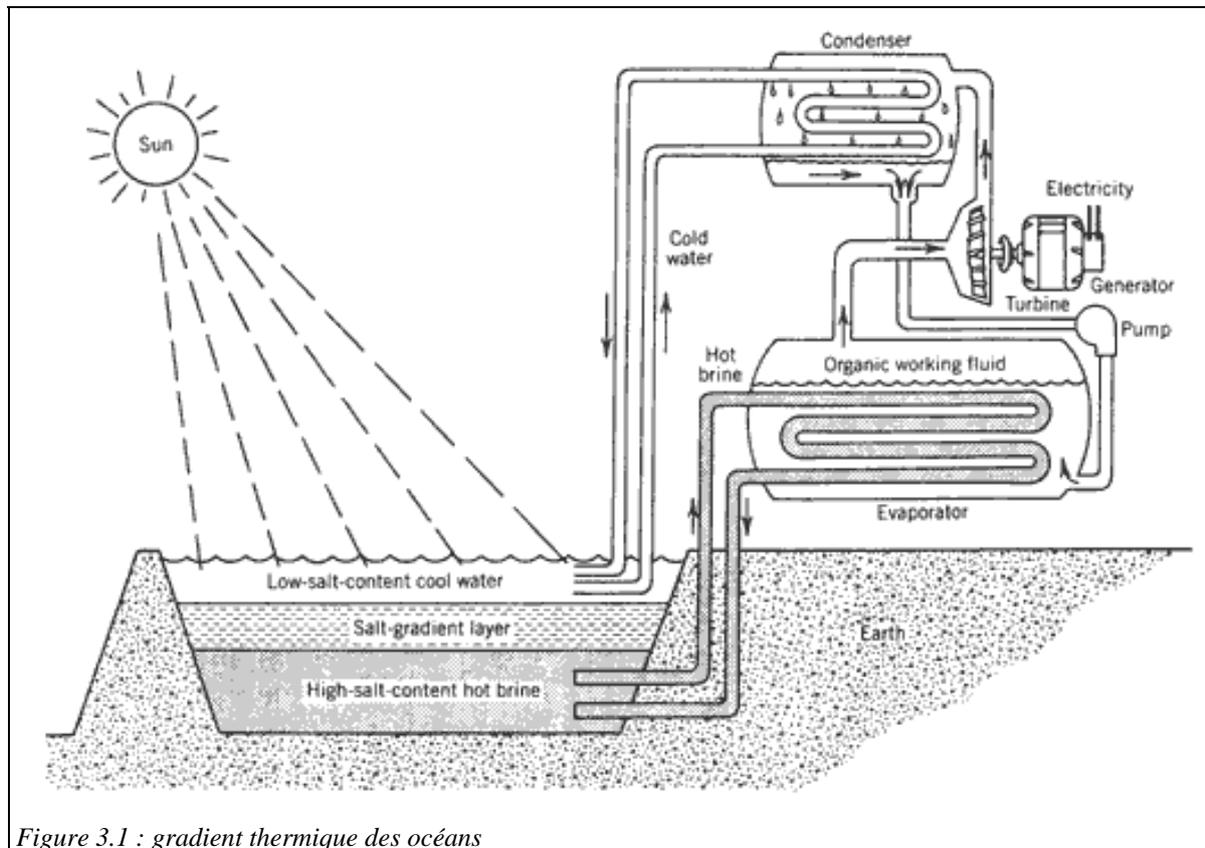


Figure 3.1 : gradient thermique des océans

Une telle configuration permet d'avoir une température de surface proche de celle de l'atmosphère (25 °C environ), tandis que le fond de l'étang atteint 90 °C ou plus. Les pertes thermiques sont donc réduites. L'eau

chaude est pompée et sert à évaporer un fluide thermodynamique, qui suit un cycle moteur et est condensé par échange avec l'eau de surface.

Les applications des étangs solaires à gradient inverse sont multiples : chauffage des locaux, réfrigération par absorption, production d'électricité grâce à un cycle thermodynamique fermé à vapeur.

Dans ce dernier cas, l'eau chaude est pompée et sert à évaporer un fluide thermodynamique, qui suit un cycle moteur et est condensé par échange avec l'air ambiant, par exemple dans un aéro-réfrigérant.

Quoique techniquement valide, le concept d'étang solaire à gradient inverse n'est pas rentable sur le plan économique, ce qui explique que les prototypes construits en Israël et aux Etats Unis (Université du Texas à El Paso) ne soient plus exploités.

Ce TD comporte relativement simple s'adresse à des élèves ayant déjà étudié les centrales à vapeur. Si ce n'est pas le cas, il faut prévoir qu'ils le fassent comme activité préalable.

A titre d'illustration des résultats de ce TD, nous fournissons en annexe de cette fiche-guide le rapport établi en 2004 par deux élèves de troisième année de l'Ecole des Mines de Paris, à l'occasion d'un projet sur ce thème correspondant à 9 h de TD (ils ont travaillé au delà de ce qui leur était strictement demandé).

2) Références

Le site <http://www.solarpond.utep.edu> de l'étang solaire d'El Paso (figure 3.1) aux Etats Unis comporte de nombreuses informations directement pertinentes pour ce TD.

De nombreuses références sur les étangs solaires sont aussi disponibles dans des revues spécialisées comme Solar Energy, notamment sous le nom de H. Tabor, l'un des grands spécialistes mondiaux du sujet. Toutefois, la plupart de ces documents traitent de la physique des étangs, et non des cycles thermodynamiques associés.

3) TD principal

Le cycle thermodynamique est relativement simple : il s'agit d'un cycle de Rankine dont la modélisation dans Thermoptim ne pose pas de problème particulier. L'objectif du travail est de modéliser un tel cycle et d'en calculer le rendement, puis d'en dresser le bilan exergétique. On cherchera, parmi les fluides thermodynamiques disponibles dans Thermoptim (ammoniac, butane, propane, R134a), celui qui conduit aux meilleures performances.

Le dimensionnement des échangeurs de chaleur est bien évidemment critique compte tenu du faible écart de température entre les sources chaude et froide. Les valeurs des pincements doivent être aussi faibles que possible tout en restant réalistes. Bien évidemment, lorsque l'on cherche à comparer les performances de cycles utilisant différents fluides, les valeurs des pincements doivent être à peu près les mêmes.

On pourra constater que, bien que le rendement énergétique du cycle soit très faible ($< 9\%$), son rendement exergétique peut être correct.

Le débit d'eau chaude est égal à 12 kg/s, sa température est de 90 °C, et la température de l'eau froide est égale à 25 °C.

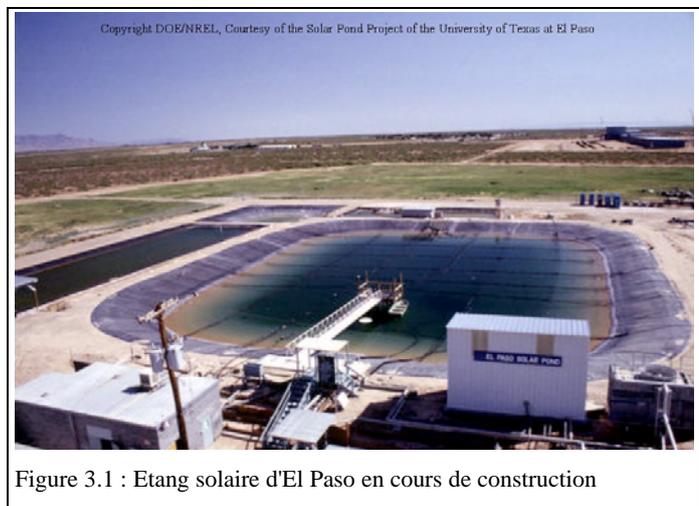


Figure 3.1 : Etang solaire d'El Paso en cours de construction

L'ensemble des autres valeurs doit être déterminé, en justifiant les hypothèses faites. On estimera les ordres de grandeur de dimensionnement du système (surfaces d'échange, sections de passage...), en n'oubliant pas de tenir compte de la puissance de pompage, a priori non négligeable.

3.1 Démarche de résolution

La modélisation dans ThermoOptim d'un tel système conduit à un schéma du type d'une centrale à vapeur., mais dont le rendement est très faible compte tenu du petit écart de température entre les deux sources.

Pour des élèves ayant déjà modélisé un cycle à vapeur simple (si ce n'est pas le cas, il faut qu'ils commencent par travailler sur les séances S25 et S26¹), la seule difficulté concerne la construction et le paramétrage de l'échangeur de chaleur en trois parties.

La manière de résoudre cette difficulté est expliquée en détail en fin de séance S18² sur la thermodynamique des échangeurs, dans un exercice où sont paramétrés les échangeurs représentant une chaudière pour le cycle à vapeur simple de la séance S26.

Le paramétrage du cycle est quant à lui moins classique. Nous supposons dans un premier temps que le fluide de travail sélectionné est de l'ammoniac.

La pompe peut être considérée isentropique, mais pas la turbine, dont le rendement isentropique peut par exemple être évalué égal à 0,9.

Pour dimensionner les échangeurs, il faut fixer les valeurs des écarts de température minimaux entre les fluides, c'est-à-dire des pincements. Plus ils seront faibles, meilleur sera le cycle thermodynamique, mais aussi plus grandes devront être les surfaces d'échange. Par ailleurs les pincements dépendent des fluides mis en jeu, les coefficients d'échange thermique étant plus faibles pour les gaz que pour les liquides, et surtout pour les fluides changeant de phase.

Pour l'écart de température entre les sources chaude et froide, nous choisirons des pincements aussi faibles que possibles : 10 °C au niveau de la surchauffe (échange gaz-liquide), 11 °C en fin d'économiseur (échange liquide-liquide), 8 °C en fin de condenseur (échange liquide-diphase).

La nécessité de disposer d'un écart de température suffisant entre la source chaude et le fluide de travail conduit ainsi à sélectionner une température de surchauffe de 80 °C et une température de vaporisation de 72,5 °C, soit une haute pression de 35 bars.

La nécessité de disposer d'un écart de température suffisant entre la source froide et l'ammoniac conduit ainsi à sélectionner une température de condensation de 36 °C, soit une basse pression de 14 bars.

Le débit d'eau chaude étant donné, il faut commencer par estimer le débit du fluide de travail, en le modifiant ultérieurement jusqu'à obtenir une valeur cohérente avec le pincement choisi en fin d'économiseur. Une fois cette valeur obtenue, le débit d'eau de refroidissement peut être directement déterminé par l'échangeur "condenseur" si l'on impose sa température de sortie (par exemple 28 °C).

3.2 Consommations des auxiliaires

Cherchez maintenant à quantifier les consommations des auxiliaires, notamment des pompes de circulation des saumures chaude et froide.

¹ Séance S25 : <http://www.thermooptim.org/SE/seances/S25/seance.html>

Séance S26 : <http://www.thermooptim.org/SE/seances/S26/seance.html>

² Séance S18 : <http://www.thermooptim.org/SE/seances/S18/seance.html>

3.3 Etudes de sensibilité

Sur la base de ces résultats, il est possible de mener plusieurs études de sensibilité, tout d'abord en changeant de fluide thermodynamique, comme demandé par l'énoncé, et aussi en modifiant éventuellement le cycle pour réduire les irréversibilités.

On peut en particulier se demander quel est l'intérêt de la surchauffe, qui conduit à augmenter l'écart de température entre le vaporiseur et la source chaude.

3.4 Représentation dans des diagrammes thermodynamiques

Une fois les points du cycle déterminés, il est facile de les représenter dans un diagramme thermodynamique tel que le diagramme entropique en utilisant les fonctionnalités que propose Thermoptim (figure 3.3).

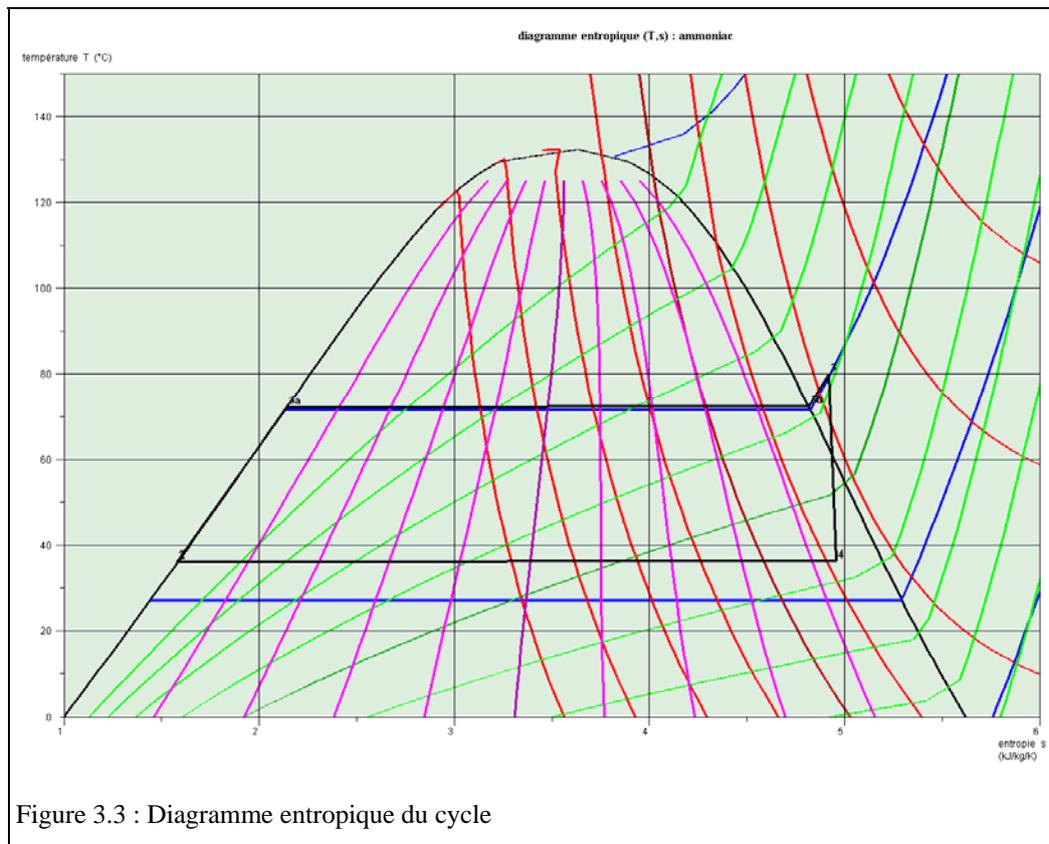


Figure 3.3 : Diagramme entropique du cycle

4) Variante : bilan exergétique du cycle

Nous ne proposons ici qu'une variante, mais de nombreuses autres peuvent être imaginées, en fonction du temps disponible, du niveau des élèves, de leur nombre, et des objectifs pédagogiques poursuivis.

Il est possible de demander aux élèves de dresser le bilan exergétique du cycle, s'ils disposent de suffisamment de temps. Le grand intérêt de ce travail est de leur montrer que des cycles à très faible rendement (du fait du faible gradient thermique disponible) peuvent malgré tout avoir un assez bon rendement exergétique.

La séance Diapason S06³ leur fournira si nécessaire des explications sur la manière de procéder, la séance S28⁴ étant consacrée au bilan exergétique du cycle à vapeur simple.

³ Séance S06 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S06/seance.html>

Le bilan exergétique du cycle à ammoniac peut être établi sans difficulté particulière, en considérant que l'environnement est à la température de 25 °C, et que la source chaude est à 90 °C.

Ce qui est le plus remarquable est que le rendement exergétique est très élevé (47 %), alors que le rendement énergétique est très faible : cela signifie que, bien que l'écart des températures des sources soit faible, les performances de l'installation sont très bonnes.

⁴ Séance S28 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S28/seance.html>