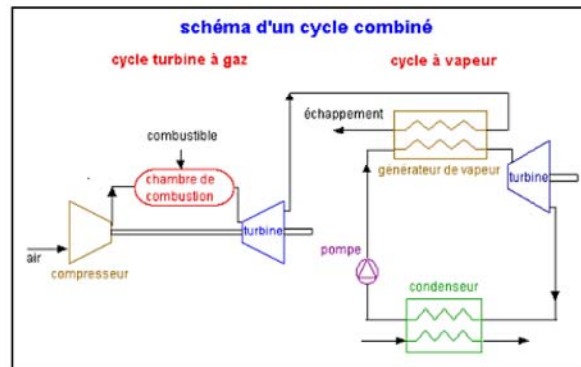


Exploration d'un cycle cycle combiné

Cycle combiné à un niveau de pression

Introduction

Nous avons vu que la régénération permet d'augmenter sensiblement le rendement du cycle de Brayton, mais que le pourcentage d'énergie ainsi récupéré est d'autant plus faible que les niveaux de température et de pression auxquels travaille ce cycle sont plus élevés. Dans les turbines à gaz modernes, la régénération est rarement possible ou économiquement intéressante.



On appelle cycle combiné l'intégration en une seule unité de production de deux technologies complémentaires en terme de niveau de température : les turbines à gaz, qui fonctionnent à haute température et les centrales à vapeur, qui opèrent à des températures plus basses (entre 450 °C et 30 °C environ).

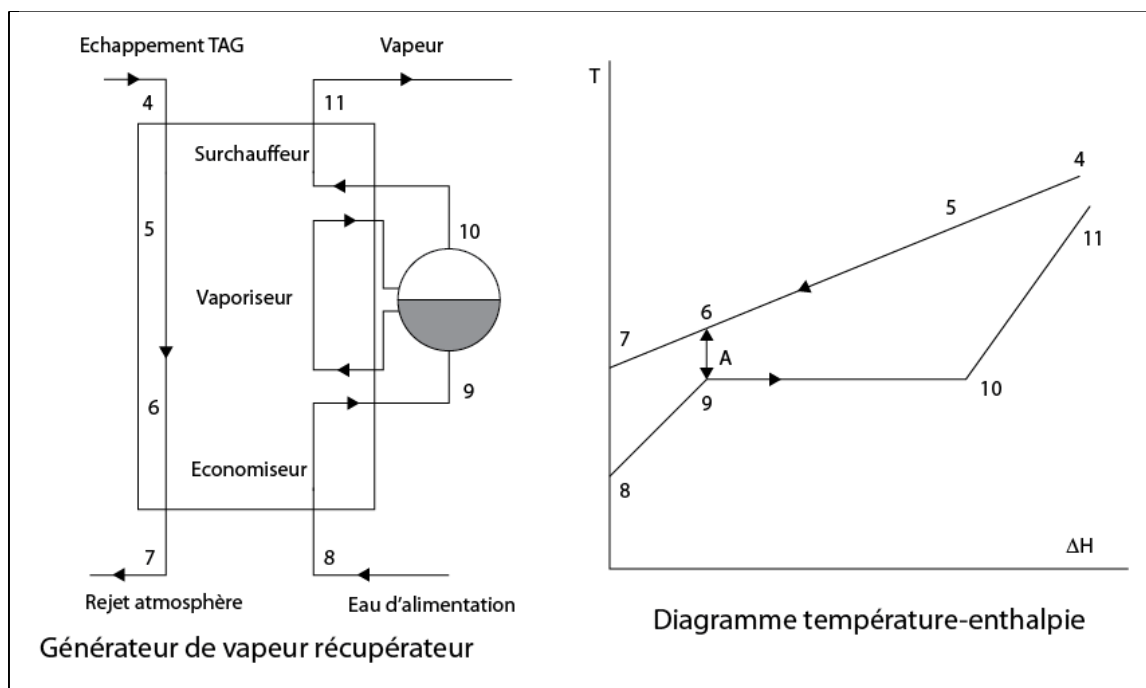
Les cycles combinés permettent ainsi de valoriser l'enthalpie résiduelle des gaz d'échappement d'une turbine à gaz en s'en servant comme source chaude pour un deuxième cycle de production d'énergie mécanique.

L'échangeur interne qui permet de transférer au cycle à vapeur l'enthalpie résiduelle des gaz sortant de la turbine s'appelle un générateur de vapeur récupérateur ou GVR.

1. Échanges de chaleur dans le GVR

Dans une centrale à cycle combiné, la veine des gaz chauds sortant de la turbine à gaz doit être refroidie par l'eau du cycle de récupération à vapeur. Dans un cycle à un seul niveau de pression, cette eau entre dans l'échangeur à l'état liquide à environ 30 °C, après avoir été comprimée par les pompes d'alimentation situées en aval du condenseur.

Elle est ensuite échauffée dans l'économiseur jusqu'à la température d'ébullition correspondant à sa pression. Elle est alors vaporisée, à température constante, puis surchauffée, avant d'être détendue dans la turbine à vapeur. Ce schéma représente les échanges de chaleur au sein de l'échangeur entre les gaz chauds et l'eau.



Le diagramme enthalpique associé montre que, si l'on s'impose pour des raisons techniques une valeur minimale des pincements (différences de température entre les deux fluides), entre les points 6 et 9 d'une part, et entre les points 4 et 11 d'autre part, les échanges de chaleur se font en fait avec des écarts beaucoup plus grands dans la quasi-totalité de l'échangeur. Ceci provient de la nécessité de vaporiser l'eau, qui induit un "palier" très important à température constante.

Les pertes dans le GVR et celles à l'échappement sont liées. Leur réduction correspond donc à un enjeu important. L'échange de chaleur idéal correspondrait au cas où la courbe de refroidissement des gaz et celle d'échauffement de l'eau seraient parallèles. L'échangeur fonctionnerait alors à contre-courant et les irréversibilités seraient minimales. Ceci est malheureusement irréalisable avec de l'eau, et le cycle à un seul niveau de pression comporte de fortes irréversibilités internes.

Chargement du modèle

1. Charger le modèle

Cliquez sur le lien suivant :

Ouvrir un fichier dans Thermoptim

Vous pouvez aussi ouvrir le fichier de schéma (CC1P.dia) grâce au menu "Fichier/Ouvrir" du menu de l'éditeur de schémas, et le fichier de projet (CC1P.prj) grâce au menu "Fichier de projet/Charger un projet" du menu du simulateur.

Paramétrage du modèle

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

1. Paramétrage de la turbine à gaz (TAG)

Le paramétrage de la turbine à gaz est analogue à celui des explorations dirigées précédentes.

Le débit aspiré est égal à 550 kg/s, et les rendements polytropiques du compresseur et de la turbine valent 0,85, la température d'entrée turbine étant fixée à 1120 °C.

Avec ce paramétrage, la température des gaz sortant de la turbine est égale à 559,4 °C.

2. Paramétrage du cycle à vapeur

La pompe (transfo "compression liquide") est à débit imposé, ici égal à 74 kg/s.

La haute pression vaut 120 bar, et la température de surchauffe 520 °C.

La turbine à vapeur a un rendement isentropique de 0,85, et la pression de condensation vaut 0,03 bar, ce qui correspond à une température de saturation de 24,1 °C.

3. Paramétrage du générateur de vapeur

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

- chauffage du liquide de près de 24 °C à 323,4 °C, température de début d'ébullition à 120 bar : évolution (2–3a) ;
- vaporisation à température constante 323,4 °C : évolution (3a–3b) ;
- surchauffe de 323,4 °C à 520 °C.

Examinons comment ce triple échangeur est paramétré.

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

Le point 3a est paramétré à température de saturation imposée à la pression de 120 bar, et son titre est égal à 0, pour indiquer l'état liquide.

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. Une surchauffe de 0,1 °C a été prise en compte pour faciliter le calcul des échangeurs.

Le débit et la température d'entrée de la veine de gaz chauds dans le surchauffeur sont connus, et donc imposés, ce qui permet de déterminer la température de la veine de gaz du point de sortie de cet

échangeur ("gaz 1"), qui est aussi le point d'entrée de la veine de gaz dans l'échangeur suivant, le vaporiseur.

Cinq grandeurs étant connues dans ce second échangeur, il peut lui aussi être calculé, ce qui permet de trouver la température de la veine de gaz de son point de sortie ("gaz 2"), qui est aussi le point d'entrée de la veine de gaz 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.

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 ?

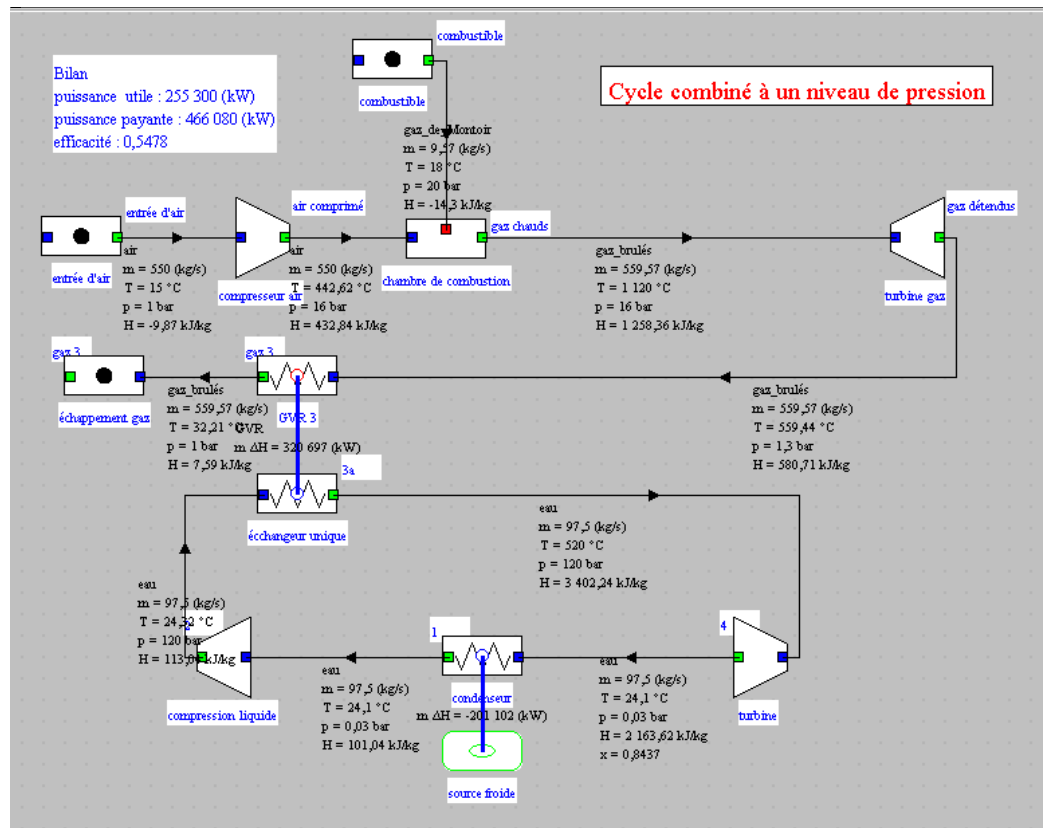
5. Performances globales du cycle combiné

Avec ce paramétrage, le rendement du cycle combiné est de 48,6 %, et la puissance mécanique fournie de 226,5 MW.

6. Importance de modéliser le GVR sous forme de trois échangeurs

Il est fondamental de modéliser le GVR sous forme de trois échangeurs couplés, et non pas comme un seul échangeur, car l'existence du pincement entre l'économiseur et le vaporiseur serait alors masquée.

Pour illustrer ce point, nous avons construit un modèle erroné où l'échangeur est modélisé comme un échangeur unique.



Ce modèle donne l'illusion que l'on peut refroidir les gaz jusqu'à 32 °C en conservant le même pincement que dans le modèle exact.

Le rendement passe à 54,8 % et la puissance à 255,3 MW.

Ces résultats optimistes sont la conséquence de l'erreur sur la modélisation du GVR contre laquelle il est primordial d'être en garde.

Ce modèle est disponible si vous voulez le charger. Ses fichiers de schéma et de projet s'appellent CC1Faux.dia et CC1Faux.prj.

Étude paramétrique du cycle combiné

Exercice : étudiez l'influence de la haute pression et du débit du cycle à vapeur sur les performances du cycle, en maintenant la même valeur du pincement du GVR.

Diminuez la valeur de la pression du point 2, en entrant la valeur 100 bar, puis recalculez le point et la transfo "compression liquide".

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

Vous constatez que le rendement et la puissance du cycle baissent légèrement, mais que le pincement au niveau du vaporiseur a augmenté.

Il est alors possible d'augmenter légèrement le débit du cycle à vapeur dans la la transfo "compression liquide", puis de recalculer le projet, jusqu'à retrouver le pincement initial.

Les performances du cycle combiné augmentent alors, ce qui montre qu'il existe plusieurs couples (pression HP, débit de vapeur) qui conduisent à des résultats assez proches : l'optimum est plat.

Conclusion

Cette exploration vous a permis de découvrir un cycle combiné à un niveau de pression modélisé dans ThermoOptim.

Cet exemple montre qu'avec un cycle à vapeur à un seul niveau de pression, il est impossible de refroidir les gaz en dessous de 163 °C, ce qui représente une perte significative.

Pour améliorer les performances du cycle, on utilise plusieurs circuits de vapeur à des niveaux de pressions différents (deux, trois ou même quatre).

Leur modélisation ne pose pas de problème particulier, mais leur optimisation est un problème complexe, car, pour obtenir le meilleur refroidissement de la veine de gaz chauds, on dispose de nombreux degrés de liberté sur les niveaux de pression, sur les débits correspondants, et sur le placement des échangeurs (en série ou en parallèle).

La conception d'un tel cycle est facilitée si on dispose d'outils méthodologiques appropriés, comme la méthode du pincement.