

Exploration d'une centrale à vapeur simple

Exploration d'une centrale à vapeur à un niveau de pression, surchauffe à 447 °C

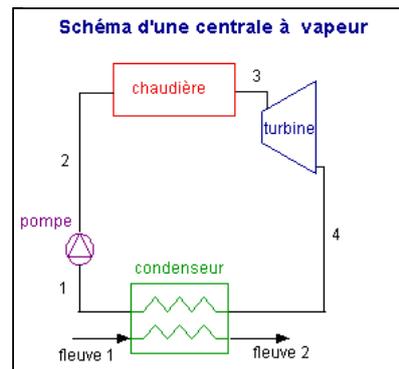
Introduction

L'objectif de cette exploration est de vous guider dans vos premiers pas d'utilisation de ThermoOptim, en vous faisant découvrir les principaux écrans et fonctionnalités associés à un modèle de centrale à vapeur simple.

Vous découvrirez comment les écrans des points et des transfos peuvent être paramétrés et calculés, les notions d'énergies utiles et payantes permettant de dresser les bilans énergétiques globaux.

Vous visualiserez les cycles dans le diagramme thermodynamique ($h, \ln(P)$) et vous effectuerez des études de sensibilité du cycle à la température extérieure et à la haute pression.

Une centrale à vapeur fonctionne selon le cycle de Hirn (ou de Rankine avec surchauffe), qui utilise un fluide condensable, l'eau, qui est refroidi à une pression et une température suffisantes pour qu'il soit entièrement liquéfié avant compression.



Dans ces conditions, le travail de compression devient quasiment négligeable devant le travail de détente (alors qu'il en représente environ 60 % dans une turbine à gaz). Le liquide comprimé est vaporisé et surchauffé dans la chaudière par échange thermique avec la source chaude, puis détendu et condensé.

1. Aspects technologiques

Au point 1 en sortie de condenseur, l'eau est à l'état liquide, à une température d'environ 27 °C. À cette température, la pression de saturation de l'eau est très faible (0,0356 bar).

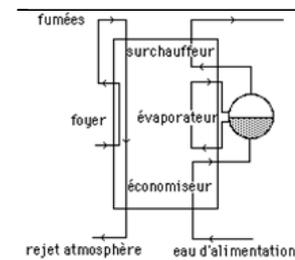
Ce schéma montre qu'une telle centrale comprend quatre composants : une pompe, une chaudière, une turbine et un condenseur, traversés par le même débit d'eau.

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

La pompe est généralement du type centrifuge, multiétagée compte tenu du très haut rapport de compression à réaliser.

La chaudière, généralement du type à tube d'eau, remplit trois fonctions successives :

- chauffer l'eau d'alimentation pressurisée jusqu'à la température de vaporisation à la pression correspondante ;
- vaporiser l'eau ;
- et enfin la surchauffer à la température désirée.



Elle se comporte donc comme un triple échangeur, et peut être représentée du point de vue des échanges thermiques par le schéma de la figure.

Chargement du modèle

Le chargement du modèle se fait par ouverture du fichier de schéma et d'un fichier de projet paramétré convenablement.

Commencez par charger le modèle, puis effectuez les autres activités proposées.

1. Charger le modèle

Cliquez sur le lien suivant :

Ouvrir un fichier dans Thermooptim

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

2. Découverte de Thermooptim

L'éditeur de schémas permet de décrire graphiquement et qualitativement le système étudié. Il comporte une palette présentant les différents composants représentables et un panneau de travail où ces composants sont placés et interconnectés par des liens vectoriels.

Le simulateur permet de quantifier puis de calculer le modèle décrit dans l'éditeur de schémas. Il comporte les listes des différents points, transfos, nœuds et échangeurs du modèle.

Affichez ces deux fenêtres et étudiez leur contenu.

Ce document vous fournit davantage d'informations sur ces deux écrans.

Référez-vous pour plus d'explications à l'exploration de découverte de Thermooptim accessible depuis le menu situé en haut à gauche de l'écran du navigateur.

3. Composants principaux du modèle

Combien de composants principaux le cycle met-il en œuvre ?

*Ouvrez l'éditeur de schémas et comptez les composants du modèle, à l'exclusion des sources externes.
Cette question admet plusieurs réponses, selon que l'on considère les échangeurs multizones comme composés d'un ou plusieurs composants*

3 4 5 6 7

4. Énergie mécanique

Quel(s) composant(s) met(tent) en jeu de l'énergie mécanique ?

le condenseur et le vaporiseur la pompe et l'économiseur la pompe (compression liquide) et la turbine la pompe la turbine

5. Puissances mises en jeu

Entrez les valeurs dans les champs de texte situés ci-dessous, avec le point comme séparateur décimal. Votre réponse est évaluée par rapport à la bonne valeur, avec un intervalle correspondant à une précision qui dépend de la question.

Souvenez-vous que les énergies ou les puissances reçues par un système sont comptées positivement, et celles qu'il fournit à l'extérieur sont comptées négativement. Dans les écrans de Thermooptim, elles sont donc positives ou négatives, selon les cas.

Toutefois, dans ces exercices, n'entrez que les valeurs absolues des puissances mises en jeu (en kW)

quelle est la valeur de de la puissance produite par la turbine ?

quelle est la valeur de de la puissance consommée par la pompe ?

Valeur de la puissance mécanique nette ?

Valeur de la puissance thermique fournie au vaporiseur ?

Valeur de la puissance thermique totale fournie ?

Valeur du rendement ?

Paramétrage du modèle

Dans cette section, nous allons faire le lien entre l'énoncé du modèle et le paramétrage des principaux points et transfos

1. Paramétrage retenu

Au point 1 en sortie de condenseur, l'eau est à l'état liquide, à une température d'environ 27 °C. À cette température, la pression de saturation de l'eau est très faible (0,0356 bar).

Ouvrez le point 1 et examinez son paramétrage.

Sa pression est égale à 0,0356 bar, et l'option "imposer la température de saturation" a été choisie, le titre étant égal à 0, pour indiquer l'état liquide.

Rappelons que, pour un corps pur à l'équilibre liquide-vapeur, le titre est défini comme la masse de vapeur divisée par la masse totale de liquide et de vapeur.

Si vous changez la valeur de la pression, et que vous recalculiez le point, sa température est automatiquement modifiée.

Si vous entrez une autre valeur du titre, entre 0 et 1, par exemple 0,5, et que vous recalculiez le point, la température ne change pas, mais l'enthalpie h augmente fortement.

La pompe comprime l'eau liquide à environ 128 bar, ce qui représente un rapport de compression considérable (de l'ordre de 3600).

Ouvrez la transfo "compression liquide", qui représente la pompe, et examinez son paramétrage.

Elle relie le point 1 et le point 2, et son paramétrage est "adiabatique", "référence isentropique", avec un rendement isentropique égal à 1.

C'est dans le point 2 que la pression de 128 bar est définie.

Ouvrez le point 2. Son paramétrage est "non contraint", ce qui signifie que la pression et sa température sont indépendantes.

Lorsque la transfo "compression liquide" est calculée, la température du point 2 est déterminée.

Si vous changez la pression du point 2, par exemple en entrant 160 bar, la nouvelle température de fin de compression est calculée. Elle diffère très peu de la précédente.

L'eau sous pression est ensuite portée à haute température dans la chaudière, l'échauffement comportant les trois étapes suivantes :

- chauffage du liquide de près de 27 °C à environ 330 °C, température de début d'ébullition à 128 bar : évolution (2–3a) ;
- vaporisation à température constante 330 °C : évolution (3a–3b) ;
- surchauffe de 330 °C à 447 °C.

Le point 3a est paramétré de manière tout à fait analogue au point 1, l'option "imposer la température de saturation" étant choisie, et le titre étant 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.

Le paramétrage du point 3 est totalement défini dans cet énoncé : sa pression et sa température sont connues et il suffit de les entrer et de calculer le point.

L'évolution (3–4) est une détente adiabatique irréversible de 128 bar à 0,0356 bar, de rendement isentropique $\eta = 0,9$.

Cette évolution est modélisée par la transfo "turbine".

L'état amont du fluide est celui du point 3, dont la pression et la température sont connues.

Pour l'aval, seule la pression est connue.

Ouvrez la transfo "turbine", et examinez son paramétrage.

Elle relie le point 3 et le point 4, et son paramétrage est "adiabatique", "référence isentropique", avec un rendement isentropique égal à 0,9.

C'est dans le point 4 que la pression de sortie de 0,0356 bar est définie.

L'état de sortie est diphasique, ce qui signifie que la température est égale à celle de saturation à cette pression. Le titre, égal à 0,775, est déterminé lorsqu'on calcule la transfo.

Si vous modifiez la valeur du rendement isentropique, le nouveau titre de sortie est calculé.

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

Nous allons maintenant étudier le cycle dans le diagramme (h, ln(P)), qui permet de lire les enthalpies mises en jeu directement sur l'axe des abscisses.

1. Première étape : chargement du diagramme des frigorigènes de l'eau

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 "eau" 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, dont le tracé a été préalablement affiné afin d'être plus précis

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 "cycle_allègeFrFin.txt" dans la liste des cycles disponibles. Cliquez ensuite sur la ligne "Points reliés" du menu Cycle.

repérage du cycle sur le diagramme

Repérage de quelques points caractéristiques dans le diagramme

Entrez un point en zone liquide

Quel est le point en zone diphasique ?

Quel est le point dont la température est la plus élevée ?

3. Analyse du cycle

La compression à l'état liquide est ici représentée par le segment (1-2) quasiment vertical très visible.

Si l'on néglige les pertes de charge dans le générateur de vapeur ou la chaudière, l'ensemble de l'échauffement correspond à l'horizontale (2-3), les trois parties représentant l'économiseur, le vaporiseur et le surchauffeur apparaissent très distinctement.

La détente irréversible se traduit par une courbe plus pentue que l'adiabatique réversible, le point 4 étant situé dans la zone d'équilibre liquide-vapeur.

Enfin, la condensation isobare est aussi horizontale.

Vous retrouvez ici les valeurs que vous aviez estimées lors de l'exercice précédent de construction du cycle sur diagramme.

Influence de la température de condensation

Le modèle précédent supposait que la température extérieure était suffisamment basse pour pouvoir condenser à 20 °C environ, ce qui correspond à une situation hivernale. On s'intéresse maintenant au fonctionnement de la centrale en été, la température de condensation passant à 40 °C (et la pression de condensation à 0,074 bar). Le projet correspondant est chargé en émulant Thermooptim.

Reparamétrez vous-même le modèle, sachant que, si vous rencontrez une difficulté, le projet corrigé peut être chargé en émulant Thermooptim.

1. Charger le modèle

Cliquez sur le lien suivant :

Ouvrir un fichier dans Thermooptim

Vous pouvez aussi ouvrir le fichier de schéma (vap_allgeee40.dia) grâce au menu "Fichier/Ouvrir" du menu de l'éditeur de schémas, et le fichier de projet (vap_allgeee40.prj) grâce au menu "Fichier de projet/Charger un projet" du menu du simulateur.

Affichage du cycle avec condensation à 40 °C

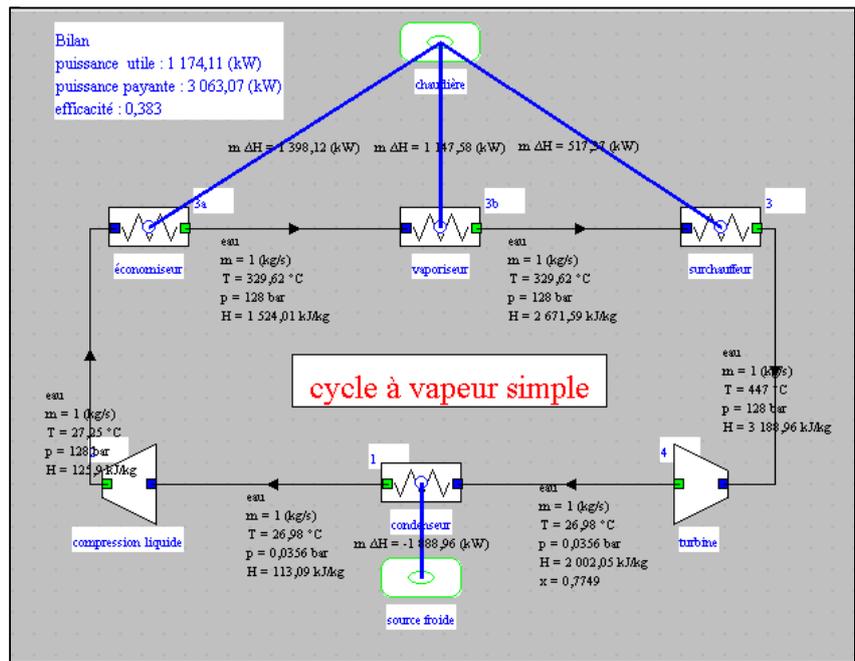
Le chargement du tracé du cycle avec condensation à 40 °C permet de le superposer au cycle initial. Dans le diagramme (h, ln(P)), l'augmentation de la pression et de la température de condensation apparaît nettement.

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 "cycle_allgeee40FrFin.txt" dans la liste des cycles disponibles. Cliquez ensuite sur la ligne "Points reliés" du menu Cycle.

2. Diminution du travail utile

L'augmentation de la température de condensation a pour effet de diminuer le travail utile.



À titre de comparaison, ce synoptique vous fournit les valeurs des performances de la centrale condensant à 20 °C (première partie de l'exploration).

De quelle valeur diminue le travail utile ?

De quelle valeur diminue la puissance payante ?

3. Bilan premier principe

Quelle est la valeur de la puissance utile ?

Quelle est la valeur de la puissance payante ?

Quelle est la valeur du rendement ?

Deuxième étape : effacement du cycle à condensation à 40 °C

Pour la suite du scénario, nous effaçons le cycle à condensation à 40 °C

Cliquez sur

Vous pouvez aussi effacer le cycle devenu inutile en opérant comme suit : Affichez le Gestionnaire de cycles à partir du menu Cycle. Cliquez sur le bouton "Mettre à jour la table des cycles", et désélectionnez les lignes que vous ne souhaitez pas voir apparaître sur le diagramme.

Influence de la haute pression

Le modèle précédent supposait que la pression HP valait 128 bar.

On s'intéresse maintenant au fonctionnement de la centrale avec une pression HP de 150 bar.

Vous allez reparamétrer le modèle vous-même, sachant que le projet corrigé peut être chargé en émulant Thermoptim si vous rencontrez une difficulté.

1. Charger le modèle

Cliquez sur le lien suivant :

Vous pouvez aussi ouvrir le fichier de schéma (vap_allgee150.dia) grâce au menu "Fichier/Ouvrir" du menu de l'éditeur de schémas, et le fichier de projet (vap_allgee150.prj) grâce au menu "Fichier de projet/Charger un projet" du menu du simulateur.

Superposition du nouveau cycle dans le diagramme (h, ln(P))

Le chargement du tracé du cycle avec haute pression à 150 bar permet de le superposer au cycle initial.

Dans le diagramme (h, ln(P)), l'augmentation de la pression et de la température de condensation apparaît nettement.

Cliquez sur

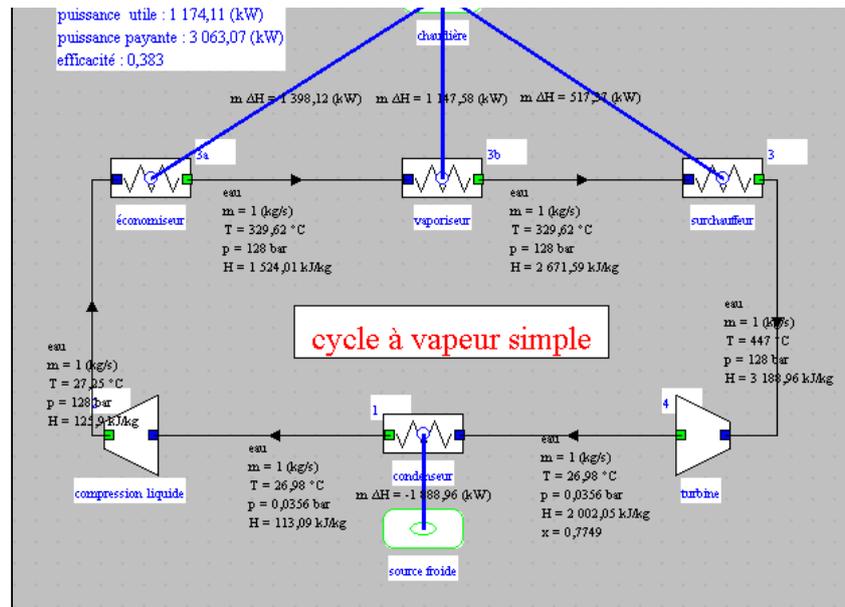
Vous pouvez aussi ouvrir ce cycle de la manière suivante : dans la fenêtre du diagramme, choisissez "Charger un cycle" dans le menu Cycle, et sélectionnez "cycle_allgee150FrFin.txt" dans la liste des cycles disponibles. Cliquez ensuite sur la ligne "Points reliés" du menu Cycle.

2. Diminution du travail utile

L'augmentation de la pression a pour effet de diminuer légèrement le travail utile, mais la puissance payante chute davantage et l'efficacité augmente un peu.

Bilan





À titre de comparaison, ce synoptique vous fournit les valeurs des performances de la centrale condensant à 20 °C (première partie de l'exploration).

De quelle valeur diminue le travail utile ?

De quelle valeur diminue la puissance payante ?

3. Bilan premier principe

Quelle est la valeur de la puissance utile ?

Quelle est la valeur de la puissance payante ?

Quelle est la valeur du rendement ?

Détermination du rendement isentropique lorsque l'état du point de sortie est connu

Le modèle précédent supposait que le rendement isentropique de la turbine était connu.

On s'intéresse maintenant au paramétrage du modèle lorsqu'on connaît non pas sa valeur mais celle de l'état du point de sortie (0,0356 bar, température de saturation imposée, $x = 0,83$).

Entrez ces valeurs dans l'écran du point 4, puis recalculer-le.

Dans l'écran de la transfo "turbine", sélectionnez en bas à droite l'option "Calculer le rendement, le point aval étant connu", puis recalculer-la transfo.

quelle est la nouvelle valeur du rendement isentropique de détente ? (entrez sa valeur entre 0 et 1, avec le "." comme séparateur décimal)

Il est ainsi possible de paramétrer une détente connaissant soit son rendement isentropique, soit l'état de son point aval.

Conclusion

Cette exploration vous a permis de découvrir Thermoptim et de commencer à utiliser ce progiciel pour effectuer des paramétrages d'un modèle simple.

Vous pouvez en effectuer d'autres pour analyser la sensibilité du modèle à divers paramètres, comme par exemple le rendement isentropique de la turbine.

Nous vous recommandons de lire la documentation de Thermoptim, et notamment les deux premiers tomes de son manuel de référence.

D'autres explorations dirigées vous permettront d'étudier des variantes de ce cycle permettant d'en améliorer les performances.