

Exploration d'une turbine à gaz simple

Turbine à gaz simple, taux de compression 16, température d'entrée turbine 1150 °C

Introduction

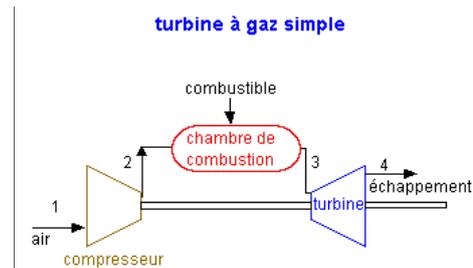
L'objectif de cette exploration est de vous guider dans vos premiers pas d'utilisation de ThermoOptim, en vous faisant découvrir les principaux écrans et fonctionnalités associés à un modèle de turbine à gaz simple.

Vous découvrirez l'agencement des écrans des points et des transfos, la manière dont ils peuvent être reparamétrés 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, la température d'entrée turbine et au taux de compression.

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz (aussi appelée turbine à combustion) est composée de trois éléments :

- un compresseur, centrifuge ou axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bars ;
- une chambre de combustion, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement ;
- une turbine, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion.



Sous cette forme, la turbine à gaz constitue un moteur à combustion interne à flux continu. On notera que le travail de compression représente environ 60 % du travail de détente.

Le terme de turbine à gaz provient de l'état du fluide de travail, qui reste toujours gazeux, et non du combustible utilisé, qui peut être aussi bien gazeux que liquide (les turbines à gaz utilisent généralement du gaz naturel ou des distillats légers comme le fioul domestique).

1. Paramétrage retenu

La turbine à gaz aspire de l'air à 25 °C et 1 bar, et le comprime à 16 bar dans un compresseur de rendement isentropique 0,85.

L'air comprimé entre dans la chambre de combustion brûlant du gaz naturel, puis les gaz brûlés sont détendus dans une turbine de rendement isentropique 0,85.

La température d'entrée dans la turbine est de 1065 °C et la combustion est supposée parfaite.

2. Aspects technologiques

Pour atteindre des taux de compression r de 20 ou 30, le **compresseur** est multiétagé, avec parfois une réfrigération intermédiaire destinée à réduire le travail consommé. Les rotors axiaux sont constitués d'un empilage de disques, soit montés sur un moyeu central, soit assemblés en tambour sur leur périphérie. Les matériaux utilisés vont des alliages d'aluminium ou de titane pour les premiers étages aux alliages d'acier et aux alliages réfractaires pour les derniers étages, qui peuvent supporter des températures atteignant 500 °C.

La **chambre de combustion** est normalement construite en alliage réfractaire. Divers types seront présentés plus loin.

Dans les turbines à gaz à cycle ouvert, les principales contraintes technologiques se situent au niveau des premiers étages de la **turbine de détente**, qui sont soumis au flux des gaz d'échappement à très haute température.

Les pièces les plus exposées sont en particulier les aubages du rotor, qui sont très difficiles à refroidir et, de plus, particulièrement sensibles à l'abrasion. Il importe donc d'utiliser un combustible très propre (absence de particules et de composants chimiques susceptibles de former des acides), et de limiter la température en fonction des caractéristiques mécaniques des aubages.

Les matériaux utilisés pour les aubages de la turbine sont des alliages réfractaires à base de nickel ou de cobalt, et on envisage de recourir à des céramiques dans l'avenir.

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 Thermoptim

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

2. Découverte de Thermoptim

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 Thermoptim 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.

Attention : pour répondre à cette question, ne comptabilisez pas parmi les composants les entrées et sorties de fluides

2 3 6

4. Énergie mécanique

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

le compresseur et la chambre de combustion la turbine et la chambre de combustion le compresseur et la turbine 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 Thermoptim, 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)

Valeur de la puissance de compression ?

Valeur de la puissance de la turbine ?

Valeur de la puissance mécanique nette ?

Valeur de la puissance thermique 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

L'état du point 1 en entrée de compresseur est connu : température de 25 °C et pression atmosphérique, supposée égale à 1 bar pour simplifier les choses.

Ouvrez le point 1 et examinez son paramétrage.

Sa pression est égale à 1 bar, et sa température à 25 °C.

La composition de l'air peut être affichée en cliquant sur le bouton à droite du nom du corps.

Le compresseur a été paramétré de la manière suivante : adiabatique, référence isentropique, de rendement isentropique égal à 0,85, et système ouvert. Son rapport de compression est calculé comme le rapport de la pression du point aval (2) à celle du point amont (1). Il vaut 16.

Ouvrez la transfo "compresseur", 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 0,85.

C'est dans le point 2 que la pression de 16 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 "compresseur" est calculée, la température du point 2 est déterminée.

Si vous changez la pression du point 2, par exemple en entrant 20 bar, la nouvelle température de fin de compression est calculée. Elle diffère de la précédente.

La combustion n'est pas modélisée en tant que telle dans ce modèle simplifié. Elle est remplacée par une transfo de type "échange" qui permet de porter à 1065 °C la température de l'air comprimé. Son paramétrage ne pose pas de problème particulier

L'évolution (3–4) est une détente adiabatique irréversible de 16 bar à 1 bar, de rendement isentropique $\eta=0,85$.

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 0,85.

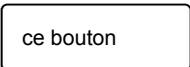
C'est dans le point 4 que la pression de sortie de 1 bar est définie.

Si vous modifiez la valeur du rendement isentropique, la nouvelle température de sortie est calculée.

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

1. Première étape : chargement du diagramme des frigoristes de l'air

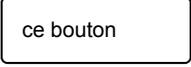
Nous allons maintenant étudier le cycle dans le diagramme (h, ln(P)), qui permet de lire les enthalpies mises en jeu directement sur l'axe des abscisses

Cliquez sur 

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 "Gaz idéaux").

Une fois le diagramme ouvert, sélectionnez "(h,p)" dans le menu "Graphe", et cliquez sur la ligne "Charger un gaz de la base" dans le menu Editeur de gaz, et choisissez "air" parmi les Gaz composés protégés.

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 

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 "TAG_GI_25Fin.txt" dans la liste des cycles disponibles. Cliquez ensuite sur la ligne "Points reliés" du menu Cycle.

3. Analyse du cycle

Le point 1 se trouve proche de l'axe des abscisses, à l'intersection entre l'isotherme verticale $T = 25\text{ °C}$ et l'isobare $P = 1\text{ bar}$. La compression adiabatique non réversible conduit au point 2, sur l'isobare $P = 16\text{ bar}$.

La variation d'enthalpie entre les points 1 et 2 est proportionnelle à la puissance consommée par le compresseur.

L'échauffement dans la chambre de combustion conduit au point 3, à l'intersection de l'isobare $P = 16\text{ bar}$ et de l'isotherme $T = 1065\text{ °C}$.

La variation d'enthalpie entre les points 2 et 3 est proportionnelle à la puissance fournie à la chambre de combustion.

L'évolution (3–4) est une détente adiabatique non réversible de 16 bar à 1 bar. La variation d'enthalpie entre les points 3 et 4 est proportionnelle à la puissance générée par la turbine.

Variation des performances lorsque la température de l'air varie

Le modèle précédent supposait que la température extérieure était égale à 25 °C .

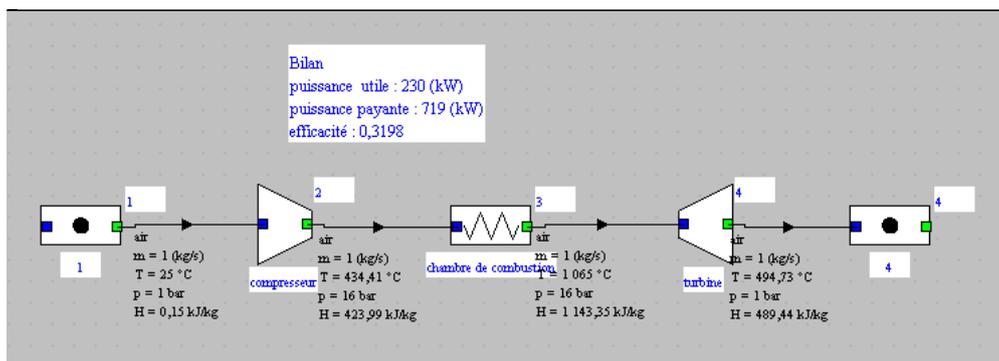
On s'intéresse maintenant au fonctionnement de la centrale lorsque la température extérieure vaut 35 °C .

Entrez cette valeur dans le point 1, puis recalculez-le.

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

1. Diminution du travail utile

L'augmentation de la température de l'air a pour effet de diminuer le travail utile



À titre de comparaison, voici les valeurs des performances du cycle avec température d'air de 25 °C (première partie de l'exploration)

de quelle valeur diminue le travail utile ?

de quelle valeur diminue l'énergie payante ?

2. Bilan premier principe

quelle est la valeur de la puissance de compression ?

3. puissance produite par la turbine

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

4. valeur du rendement

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 du compresseur 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 (425 °C, 16 bar).

Entrez ces valeurs dans l'écran du point 2, puis recalculez-le.

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

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

Il est ainsi possible de paramétrer une compression ou 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.