

THERMOPTIM®

PRISE EN MAIN

**EXEMPLE D'UN CYCLE DE
TURBINE A GAZ AVEC COMBUSTION**

VERSION JAVA 1.5

© R. GICQUEL MARS 2020

SOMMAIRE

PRISE EN MAIN DE THERMOPTIM.....	3
NOTIONS DE BASE	3
CALCUL D'UNE TURBINE A GAZ	4
CREATION DU SCHEMA	4
CREATION DES ELEMENTS DU SIMULATEUR	7
PARAMETRAGE DES POINTS	8
PARAMETRAGE DES TRANSFOS.....	9
TRACE DU CYCLE SUR DIAGRAMME THERMODYNAMIQUE	12
AMELIORATIONS DU TRACE DES CYCLES	13
<i>Liaison des points par des lignes d'iso-valeurs</i>	13
<i>Changement de la couleur du cycle</i>	14
<i>Superposition de plusieurs cycles sur un diagramme</i>	15
CHANGEMENT DE TYPE DE DIAGRAMME.....	15
TURBINE A GAZ A INJECTION DE VAPEUR	15
TURBINE A GAZ A REGENERATION.....	18

© R. GICQUEL 1997 - 2020. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans autorisation est illicite, et constitue une contrefaçon sanctionnée par le Code de la propriété intellectuelle.

Avertissement : les informations contenues dans ce document peuvent faire l'objet de modifications sans préavis, et n'ont en aucune manière un caractère contractuel.

PRISE EN MAIN DE THERMOPTIM

L'objectif de la première partie de cette notice est de permettre à un utilisateur de se familiariser rapidement (en moins d'une demi-heure) avec THERMOPTIM, en utilisant les éléments de base du progiciel.

Une fois cette prise en main effectuée, il devient plus facile d'aborder l'étude de problèmes plus complexes, notamment ceux qui mettent en jeu des nœuds ou des échangeurs, qui sont illustrés par les deux variantes du cycle simple présentées ici. Pour de plus amples explications, on se reportera au manuel de référence du progiciel.

Signalons aussi l'existence d'un ensemble de modules de formation en ligne sonorisés¹, appelés DIAPASON pour Diaporamas Pédagogiques Animés et Sonorisés, ensemble consacré à la découverte et à la prise en mains de Thermoptim. Vous y trouverez un exemple analogue à celui qui est traité ici, avec un paramétrage différent, et des liens vers un site de formation aux systèmes énergétiques avec de nombreuses explications technologiques et des variantes de ce cycle.

Enfin, les explorations dirigées² de modèles de cycles réalisés avec Thermoptim peuvent être très utiles pour démarrer avec le progiciel, car elles proposent toute une série de modélisations de difficultés progressives. Elles ont été développées comme compléments aux MOOC Conversion Thermodynamique de la Chaleur³.

NOTIONS DE BASE

L'étude d'un système thermodynamique peut être décomposée en cinq étapes fondamentales :

- 1) l'analyse de la structure (ou de l'architecture) de la technologie considérée, qui met en évidence ses principaux éléments fonctionnels (compresseurs, échangeurs de chaleur, turbines...) et leurs connexions.
- 2) pour chaque composant, l'identification du ou des fluides thermodynamiques qui entrent en jeu : par exemple, le fluide comprimé dans une turbine à gaz est de l'air, qui brûle avec un combustible dans la chambre de combustion, pour former des gaz brûlés, eux-mêmes détendus dans la turbine.
- 3) pour chaque élément, il faut bien déterminer si elles se font en système ouvert ou fermé. Rappelons que ce qui les différencie, c'est respectivement la présence ou l'absence d'un transfert de masse aux frontières
- 4) pour chaque élément, la détermination précise des transformations qu'y subissent les différents fluides identifiés, et le calcul de leurs évolutions.
- 5) l'établissement du bilan global du système considéré par assemblage des différents modèles des éléments fonctionnels, compte tenu des connexions internes.

THERMOPTIM a été conçu pour faciliter le calcul de cycles thermodynamiques complexes, mais il ne peut se substituer à l'utilisateur pour effectuer l'analyse détaillée du système considéré, ce qui correspond aux trois premières étapes ci-dessus.

Avant de commencer à entrer son projet dans le progiciel, l'utilisateur doit avoir effectué ce travail, faute de quoi il risque de commettre des erreurs de représentation.

¹ : <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/seances-disponibles.html>

² <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/explor-scenar.html>

³ <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/CTC.html>

Une fois cette analyse réalisée, chacun des composants peut être facilement décrit grâce aux points, transformations et échangeurs présentés ci-dessous, qui sont regroupés sous forme d'un projet faisant éventuellement appel à des nœuds.

THERMOPTIM définit trois catégories de **corps** : des gaz idéaux purs, des gaz idéaux composés, et des vapeurs condensables (sans mélanges). Les gaz parfaits correspondent au cas particulier de gaz idéaux dont la capacité thermique massique est indépendante de la température. Thermoptim accepte une autre catégorie de corps, dits externes, définis par l'utilisateur, mais qui apparaissent dans ses écrans (voir note spécifique à ce sujet).

Le corps peut être pur, auquel cas ses propriétés sont prédéfinies dans le progiciel, ou composé. Dans ce cas (qui n'est possible que pour un gaz), l'utilisateur doit définir la composition à partir des autres gaz présents dans la base, en indiquant, pour chacun d'entre eux, son nom et sa fraction molaire ou massique. Les propriétés du corps composé sont alors automatiquement déterminées à partir de celles de ses constituants.

Un **point** désigne une particule d'un corps et permet de déterminer ses variables d'état intensives : pression, température, capacités thermiques massiques, enthalpie, entropie, énergie interne, exergie, titre. Un point est identifié par son nom et celui du corps qui lui est associé. Pour le calculer, il faut :

- soit entrer au moins deux de ses variables d'état, généralement la pression et la température pour les systèmes ouverts, et le volume et la température pour les systèmes fermés,
- soit les déterminer automatiquement en utilisant par exemple l'une des transformations définies ci-dessous.

Les **transformations** (appelées transfos dans THERMOPTIM) correspondent à des évolutions thermodynamiques subies par un corps entre deux états. Une transfo associe donc deux points tels que définis précédemment, un point amont et un point aval. De plus, elle spécifie le débit massique mis en jeu, et permet donc de calculer les variables d'état extensives, et notamment de déterminer la variation d'énergie mise en jeu.

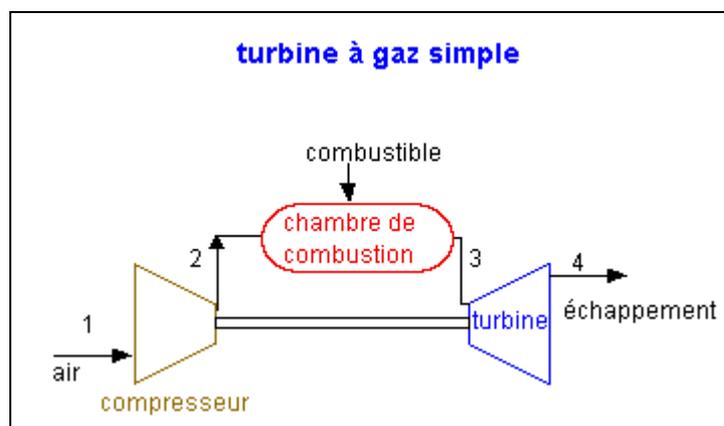
Les transformations peuvent être de plusieurs types : compressions, détente, combustions, laminages, échanges de chaleur, et transformations humides (ce dernier cas recouvre sept catégories d'évolutions différentes). Leur paramétrage fait appel à différentes caractéristiques selon les cas, comme par exemple, pour une compression, le rendement isentropique et le rapport de compression.

Un cycle peut être décrit comme un ensemble de points reliés par des transformations. Dans la mesure où le débit massique de fluide est le même dans toutes les transfos, des transfos et des points suffisent pour cela, le réseau de fluide étant implicitement défini par les connexions internes. Si ce n'est pas le cas, il peut être nécessaire de compléter la description du réseau en utilisant les nœuds décrits dans la documentation.

CALCUL D'UNE TURBINE A GAZ

Une turbine à gaz brûlant du gaz naturel sans dissociation aspire de l'air à 15 °C and 1 bar et le comprime à 16 bar dans un compresseur de rendement polytropique 0,85, puis les gaz brûlés sont détendus dans une turbine de rendement polytropique 0,85. La température d'entrée turbine est 1150 °C.

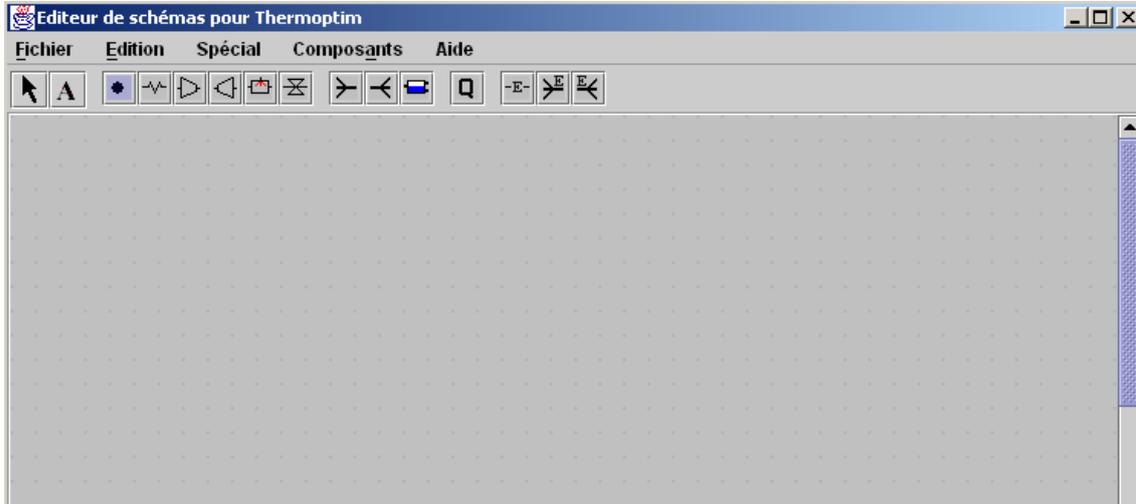
On cherche à modéliser la turbine à gaz et à calculer son rendement.



CREATION DU SCHEMA

Ouvrez THERMOPTIM. L'écran de l'éditeur de schémas vous est présenté :

Il comporte une palette présentant les différents composants représentables (échanges de chaleur, compresseurs, organes de détente, chambres de combustion, mélangeurs, diviseurs...), et un panneau de travail où l'on place ces composants et où on les interconnecte par des liens vectoriels.

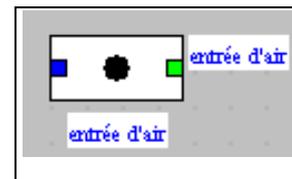


Le schéma de la turbine à gaz indique sans ambiguïté les composants à sélectionner : le compresseur , la chambre de combustion , et la turbine, qui est un organe de détente .

De plus, nous ajouterons une entrée de combustible, une entrée d'air et une sortie des gaz, toutes trois représentées par des transfo-points . Les deux dernières ne sont pas impérativement nécessaires, mais elles permettent de mieux visualiser le cycle, comme nous le verrons plus loin. Une transfo-point sert essentiellement à associer un débit à un point.

Commencez par sélectionner l'entrée d'air et placez-la sur le panneau de travail. Une fenêtre de définition du composant vous est proposée. Dans le cas de la transfo-point, elle est particulièrement simple, car le composant a le même nom que les points amont et aval (vous pouvez cependant spécifier un nom différent de celui du composant pour le point si vous le désirez). Commencez par entrer son nom (entrée d'air), puis le nom du corps (air), et le débit (1 t/s).

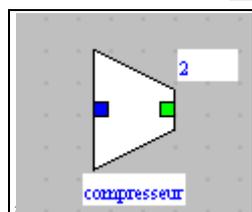
Général	
transfo-point	
nom du composant	<input type="text" value="entrée d'air"/>
nom corps	<input type="text" value="air"/>
débit	<input type="text" value="1"/>



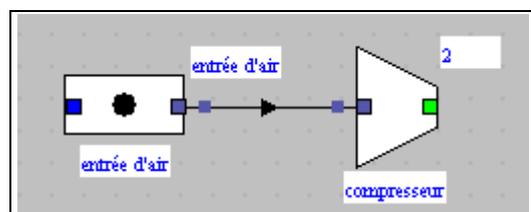
Cliquez ensuite sur le bouton "Appliquer" pour valider les deux onglets. Le composant apparaît à l'écran.

Sélectionnez ensuite le compresseur. La fenêtre à onglets de définition du composant vous est proposée. Commencez par entrer son nom (compresseur). Cliquez ensuite sur l'onglet du port de sortie, et entrez simplement le nom du point de sortie (2). Le nom du corps (air) sera automatiquement propagé depuis le composant amont (l'entrée d'air) lorsque vous le connecterez au compresseur.

Général	port de sortie
port de sortie	
nom du point	<input type="text" value="2"/>
nom corps	<input type="text"/>
débit	<input type="text" value="1"/>



Cliquez sur le bouton "Appliquer" pour valider les



deux onglets. Le composant apparaît à l'écran.

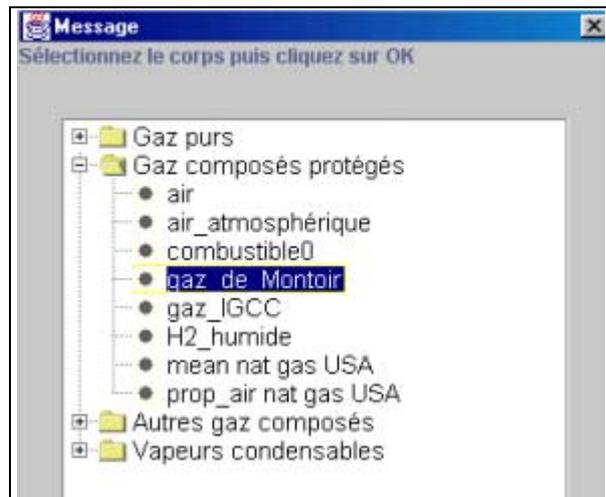
Vous pouvez alors connecter entre eux ces composants. Pour cela, cliquez sur le port de sortie (vert) de l'entrée d'air, et faites glisser la souris jusqu'au port d'entrée du composant auquel il doit être relié (ici le compresseur), et relâchez le clic. Un lien orienté apparaît alors.

Sélectionnez alors le compresseur, et faites afficher ses propriétés (menu Edition ou F4). Un nouvel onglet est visible, celui qui est relatif au port d'entrée. Les propriétés du port de sortie du composant situé en amont ont été transférées lors de la connexion. Vous pouvez vérifier que le corps du port de sortie a lui aussi été mis à jour car, dans ce type de composant, il n'y a pas de changement de corps.



Un point à noter est que l'entrée du nom du corps peut être faite de deux manières : soit directement, soit en double-cliquant dans le champ du nom, ce qui ouvre la liste structurée des corps disponibles dans la base, auquel cas vous choisissez celui que vous désirez.

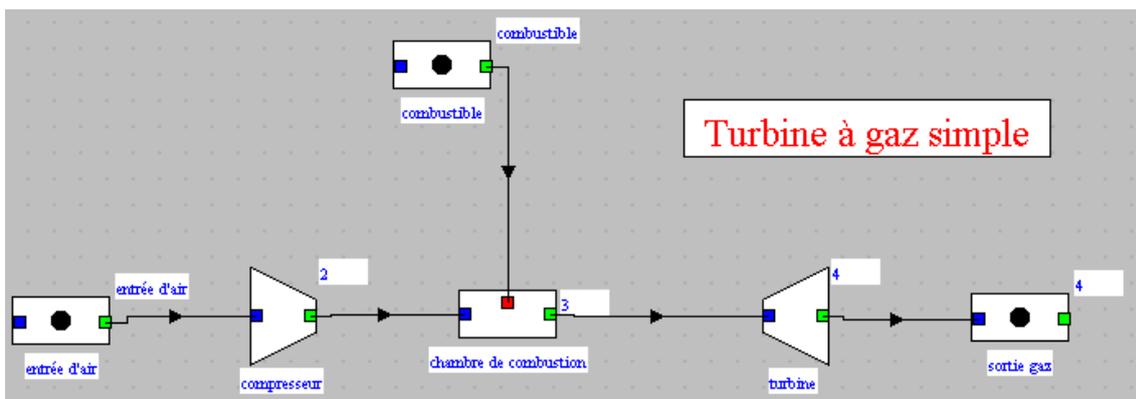
Sur la figure à l'écran, le gaz naturel qui est défini dans la base de données de ThermoOptim s'appelle gaz_de_Montoir.



Continuez à créer les autres composants (le combustible, la chambre de combustion, la turbine et la sortie des gaz) mais sans entrer le nom du corps pour ces deux derniers, car il sera automatiquement propagé lors de la connexion.

Pour les gaz de combustion, vous pouvez soit en choisir un parmi les gaz non protégés de la base, soit donner le nom que vous souhaitez, par exemple ici "gaz_brulés".

Après avoir connecté les différents composants, vous obtenez le résultat suivant (on a de plus rajouté un commentaire  pour désigner le schéma) :



En utilisant les flèches du clavier, vous pouvez affiner le schéma en déplaçant légèrement les composants qui ne sont pas bien alignés, comme le compresseur ou la turbine.

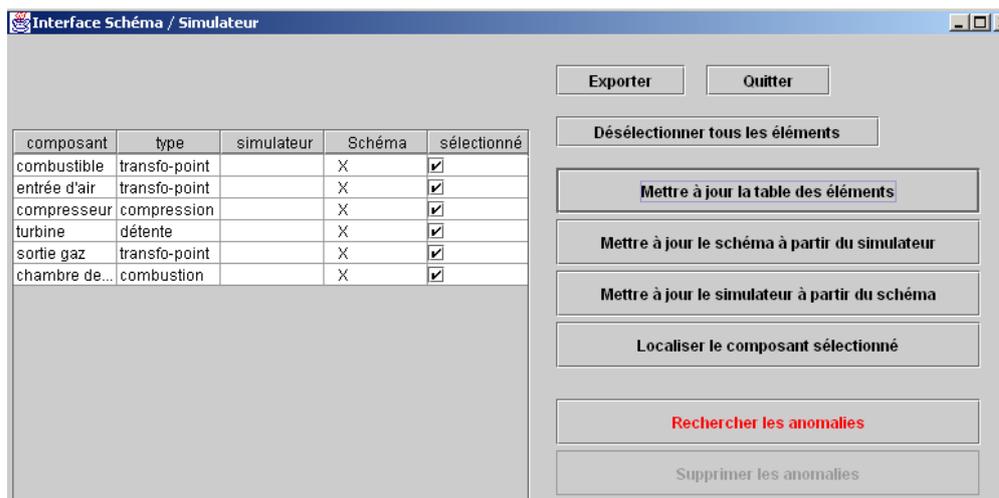
A ce stade, la description qualitative du cycle est terminée. Pour faciliter l'archivage de vos schémas, vous pouvez leur associer un nom et un descriptif, en sélectionnant la ligne "Descriptif" du menu Fichier.

Sauvez ensuite votre schéma en lui donnant un nom avec l'extension .dia : "TAG.dia" par exemple.

Vous pouvez vérifier en sélectionnant un composant et en faisant afficher ses propriétés (F4 ou menu Edition) qu'en connectant les composants, vous avez propagé certaines informations de l'amont vers l'aval, de telle sorte que tous les noms et les corps des ports d'entrée sont initialisés automatiquement.

CREATION DES ELEMENTS DU SIMULATEUR

Pour créer les éléments du simulateur, il est recommandé d'utiliser l'interface qui le relie à l'éditeur de schémas, et qui peut être ouverte à partir du menu Spécial de l'éditeur de schémas. Cliquez alors sur le bouton "Mettre à jour la table des éléments". L'écran suivant est affiché :



Dans la table de gauche, apparaît la liste des composants que vous avez créés. En face de chacun d'eux, un "X" marque la case "schéma", alors que la case "simulateur" est vide. La colonne de droite indique quels sont les composants sélectionnés, c'est-à-dire ceux qui doivent être pris en compte lors des opérations réalisées à partir de l'interface. Par défaut, tous les composants sont sélectionnés, mais un bouton vous permet de les désélectionner tous si vous le désirez. Autrement, en double-cliquant sur une ligne de la table, vous la sélectionnez ou la désélectionnez.

Pour transférer dans le simulateur l'ensemble des composants, cliquez sur le bouton "Mettre à jour le simulateur à partir du schéma". Un nom vous est demandé pour le projet. Entrez par exemple "TAG". Une fois le transfert réalisé, l'écran de projet apparaît comme indiqué sur la figure ci-dessous.

Si jamais les composants sont insuffisamment définis dans l'éditeur de schémas, ils ne sont pas transférés et sont colorés en jaune. Thermoptim cherche à avertir l'utilisateur en cas de problème en lui adressant un message, mais il est possible qu'une erreur subsiste. Dans ce cas, sélectionnez un par un ceux qui posent problème, choisissez la ligne "Affichez les propriétés" dans le menu Edition, et passez en revue les différents onglets pour voir si une information ne manque pas. Si un champ n'est pas éditable, il vous faudra déconnecter le composant pour le libérer. Vous le reconnecterez une fois le problème corrigé.

Cinq points et six transfos ont été créés, avec un paramétrage par défaut (1 bar et 300 K pour les points). Pour terminer la création du modèle, vous devez maintenant ouvrir chacun des écrans des points et transfos créés, et les paramétrer pour qu'ils correspondent bien au cas qui vous intéresse. Vous pouvez le faire soit à partir de l'écran de projet ci-dessus, soit à partir de l'éditeur de schémas, en double-cliquant sur les composants pour accéder aux transfos, et sur les liens pour accéder aux points (vous pouvez bien sûr aussi les ouvrir à partir des écrans des transfos).

THERMOPTIM Java. Copyright R. Gicquel 1999-2005

Fichiers de projet Fichiers de résultats Spécial Aide

Nom du projet : TAG Schéma associé : TAG

5 POINTS

nom du point	corps	P (bar)	T (°C)
combustible	gaz_de_Montoir	1	26,85
entrée d'air	air	1	26,85
2	air	1	26,85
3	gaz_brulés	1	26,85
4	gaz_brulés	1	26,85

6 TRANSFOS

nom transfo	point amont	point aval	type transfo
sortie gaz	4	4	échange
entrée d'air	entrée d'air	entrée d'air	échange
combustible	combustible	combustible	échange
compresseur	entrée d'air	2	compression
turbine	3	4	détente
chambre de c...	2	3	combustion

NOEUDS

nom	type	veine principale

PRESSIONS IMPOSEES

nom	valeur

Bilan

efficacité

énergie utile

énergie payante

Recalculer

unité de débit

-

ECHANGEURS DE CHALEUR

nom	type	fluide chaud	fluide froid

PARAMETRAGE DES POINTS

Entrez l'état du corps au point "entrée d'air". On connaît sa pression (1 bar) et sa température (15 °C). Il peut donc être calculé :

projet	TAG		<input type="checkbox"/> observée	<	>
point	entrée d'air				
corps	air	afficher	Dupliquer	Sauver	
	<input type="checkbox"/> mélange externe	Supprimer	Fermer		
<input checked="" type="radio"/> Système ouvert (T,P,h) <input type="radio"/> Système fermé (T,v,u) <input type="radio"/> Mélanges humides					
P (bar)	1	<input checked="" type="radio"/> P et T connus			
<input type="checkbox"/> pression contrôlée	h (kJ/kg)	-9,87037072	<input type="radio"/> P et h connus		
	s (kJ/kg/K)	0,128011156	<input type="radio"/> P et s connus		
	exergie (kJ/kg)	-50,2131			
T (°C)	15				
T (K)	288,15				
u (kJ/kg)	-7,0423588				
s (kJ/kg/K)	0,128011156				
V (m ³ /kg)	0,827301151		Calculer		
Cp (J/kg/K)	1 001,88				
Cv (J/kg/K)	714,77				
gamma	1,40168				

Pour le point (2), la seule information connue à son sujet est sa pression $p = 16$ bar. En l'état actuel de calcul du cycle, on ignore sa température ou son enthalpie.

Le point 3 est à 16 bar et 1150 °C correspondant à la fin de la combustion. Ces valeurs peuvent être entrées, mais il ne peut encore être calculé étant donné que sa composition n'est pas connue.

Le point 4 a pour pression 1 bar, mais sa température est inconnue.

Le dernier point à paramétrer est le combustible, que nous supposons à 20 bar et 15 °C.

PARAMETRAGE DES TRANSFOS

Commencez par la compression entre les points "entrée d'air" et 2. Vous avez le choix entre plusieurs modes de compression : adiabatique ou polytropique, et pour les systèmes ouverts ou pour les systèmes fermés. Pour les premiers, le rapport de compression est celui des pressions, pour les seconds, celui des volumes. Il peut être calculé, comme ici, ou imposé.

Choisissez ici : adiabatique, référence polytropique, de rendement isentropique égal à 0,85, et systèmes ouverts.

Sélectionnez le mode de calcul "Imposer le rendement et calculer la transfo", puis cliquez sur le bouton "Calculer". L'état du point 2 est calculé, ainsi que la variation d'enthalpie correspondante. La valeur du taux de compression est affichée (ici 16).

transfo	compresseur	type	compression	<	>	Sauver
type énergie	utile	<input type="checkbox"/> débit imposé	débit	1	<input type="radio"/> système fermé	<input type="checkbox"/> observée
point amont	entrée d'air	affichage	m ΔH	442,71	Calculer	
T (°C)	15	Q	0	<input checked="" type="radio"/> adiabatique <input type="radio"/> non adiabatique		
P (bar)	1			<input type="radio"/> référence isentropique <input checked="" type="radio"/> référence polytropique		
h (kJ/kg)	-9,87			rend. polytropique	0,85	
titre	1			exposant polytropique	1,48847	
point aval	2	affichage			rapport de pression (>= 1)	<input checked="" type="radio"/> calculé <input type="radio"/> imposé
T (°C)	442,62			16		
P (bar)	16					
h (kJ/kg)	432,84			Imposer le rendement et calculer la transfo <input checked="" type="radio"/>		
titre	1			Calculer le rendement, le point aval étant connu <input type="radio"/>		

Le calcul de la combustion est plus complexe : la température de fin de combustion étant imposée égale à 1150 °C, entrez cette valeur dans le champ en bas à droite, et sélectionnez "Calculer lambda". Attention : la température doit être entrée dans l'écran de la transfo et non dans celui du point 2.

Pour le reste, étant donné qu'il n'y a pas de dissociation, il n'est pas nécessaire d'en définir le taux ni d'indiquer la température de figeage. Par ailleurs, comme nous négligeons les pertes thermiques vers l'extérieur, le rendement de chambre est égal à 1.

La transfo peut être calculée en cliquant sur le bouton "Calculer". Le facteur d'air est déterminé, ainsi que le débit de combustible nécessaire, automatiquement mis à jour dans sa transfo-point, et le débit en sortie de la chambre s'affiche.

transfo	chambre de combust	type	combustion	<	>	Sauver
type énergie	payante	<input type="checkbox"/> débit imposé	débit	1,018269	<input type="radio"/> système fermé	<input type="checkbox"/> observée
point amont	2	affichage	m ΔH	889,54	Calculer	
T (°C)	442,62	W	0	combustible		
P (bar)	16			combustible	affichage	
h (kJ/kg)	432,84			<input type="checkbox"/> type CHa		
titre	1			<input type="checkbox"/> prémélangé		
point aval	3	affichage			<input type="checkbox"/> dissociation	
T (°C)	1 150			rendt. combustion	1	
P (bar)	16			rendement chambre	1	
h (kJ/kg)	1 298,66			<input checked="" type="radio"/> Calculer lambda	lambda	3,2817
titre	1			<input type="radio"/> Calculer T	T (°C)	1 150
				<input type="radio"/> Imposer le débit de combustible	pression imposée	
				<input checked="" type="radio"/> par le point amont		
				<input type="radio"/> par l'utilisateur		

La composition des gaz de combustion est déterminée. Elle peut être affichée en cliquant sur le bouton rouge "afficher" situé à côté du nom du corps dans l'écran du point 3 :

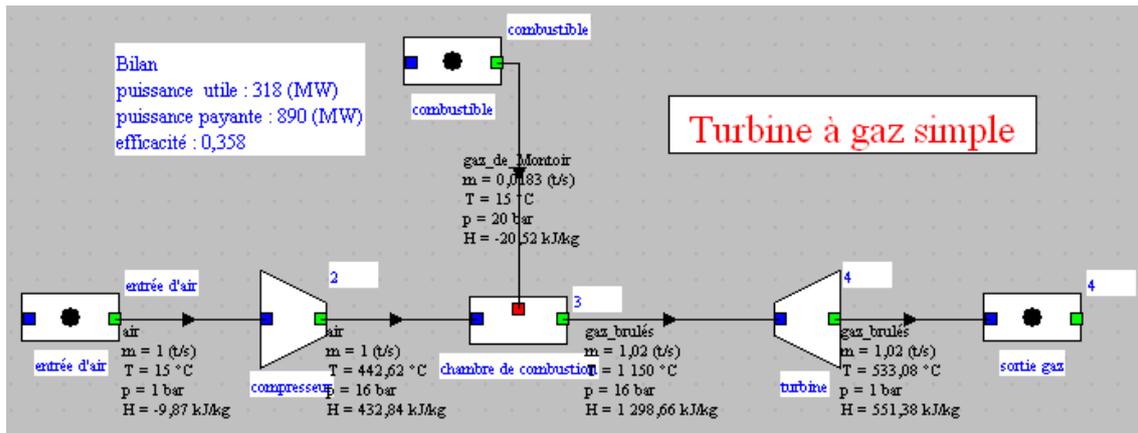
nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,03215996	0,04949052
H2O	0,05980526	0,03767364
O2	0,141611	0,1584484
N2	0,7576949	0,7421938
Ar	0,00872887	0,0121936

La détente peut maintenant être calculée à son tour. Son rendement polytropique est lui aussi égal à 0,85 :

Le modèle de la turbine à gaz est alors complètement quantifié. Son rendement peut être obtenu en cliquant sur le bouton "Recalculer" de l'écran principal du simulateur :

Les différents points du cycle peuvent aussi être visualisés sur le schéma. Pour améliorer encore la représentation, vous pouvez insérer un composant de type "Bilan" qui vous permet de reporter directement sur le schéma les éléments du bilan (ce dernier composant n'est accessible qu'à partir du menu "Composants"). De plus, vous pouvez spécifier l'unité de débit à prendre en compte, par exemple la t/s, grâce au menu déroulant situé en bas à droite du simulateur.

Bilan	
efficacité	0,358
énergie utile	318
énergie payante	890



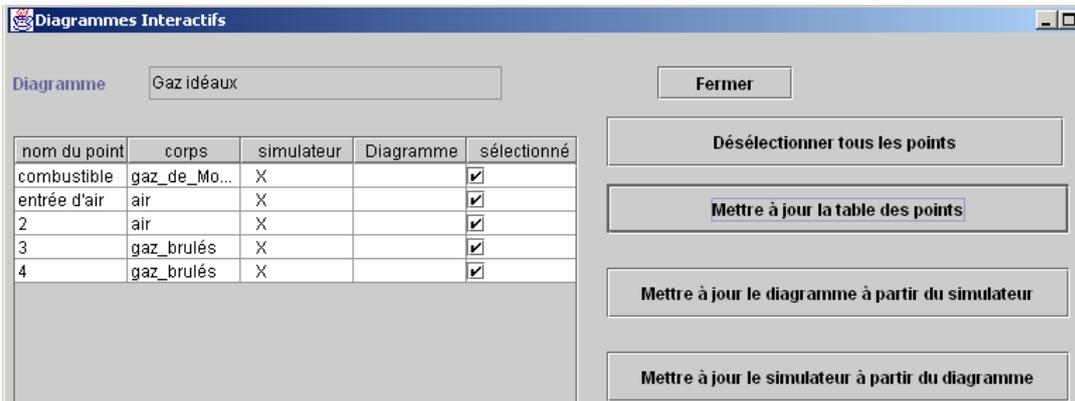
C'est ici que la présence des transfos-points "entrée d'air" et "sortie gaz" trouve son principal intérêt : elle permet de représenter les points "entrée d'air" et "4" par des liens orientés, et d'en afficher l'état.

Sauvez enfin le fichier de projet, par exemple sous le nom de TAG.prj.

TRACE DU CYCLE SUR DIAGRAMME THERMODYNAMIQUE

Le tracé du cycle sur diagramme thermodynamique peut être réalisé de la manière suivante : les diagrammes interactifs sont accessibles par la ligne "Diagramme Interactifs" du menu "Spécial" de l'écran du simulateur, qui ouvre une interface similaire à celle qui relie le simulateur et l'éditeur de schémas. Double-cliquez dans le champ situé en haut à gauche pour choisir le type de diagramme souhaité (ici "Gaz idéaux"), et choisissez l'air comme corps. Choisissez le type de diagramme que vous désirez dans le menu "Graphe" (ici (T,s)).

Ensuite, revenez à l'interface et cliquez sur le bouton "Mettre à jour la table des points", ce qui vous donne le résultat suivant :



L'interface entre le simulateur et les diagrammes interactifs comprend plusieurs champs et boutons, ainsi qu'une table principale montrant les différents points, soit qui existent dans le projet, soit qui ont été définis comme points de cycle dans le diagramme (ici il n'y en a pas).

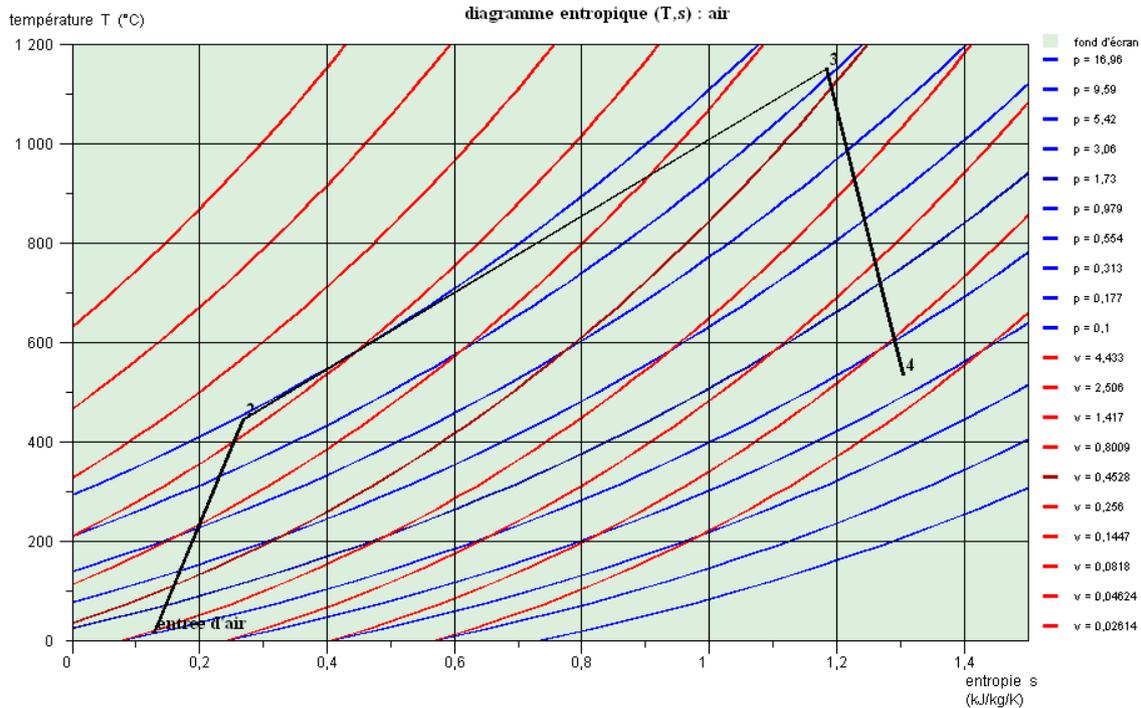
Les deux premières colonnes indiquent le nom et le corps des points. Si un point est défini dans le simulateur, un "X" apparaît dans la troisième colonne, s'il appartient à un cycle du diagramme, un "X" est affiché dans la quatrième.

Désélectionnez le combustible, qui n'a pas à apparaître sur le diagramme, puis cliquez sur le bouton "Mettre à jour le diagramme à partir du simulateur" pour transférer les valeurs des points sélectionnés depuis le simulateur vers le diagramme, puis cliquez sur "Points reliés" dans le menu "Cycle" du diagramme. Les points sont transférés en essayant de les ordonner aussi bien que possible, mais il peut

THERMOPTIM Prise en main Turbine à gaz mars 2020

être nécessaire de les réordonner pour obtenir un tracé relié correct. L'éditeur de points de cycle du diagramme permet de le faire dans ce cas comme nous allons le voir.

Toutefois, il vous faudra sans doute commencer par ajuster le paramétrage du diagramme. Dans le menu "Graphe", choisissez des niveaux de température et de pression compatibles avec notre problème : 0 à 1200 °C, et 0,1 à 30 bars, et ajustez les échelles des axes en conséquence.



AMELIORATIONS DU TRACE DES CYCLES

Un certain nombre d'améliorations ont été récemment apportées au tracé de cycles par la version 1.3 :

- d'abord, il est possible de relier des points par diverses lignes d'iso-valeurs (isobares, isentropes...)
- ensuite, la couleur de chaque cycle peut être modifiée selon le souhait de l'utilisateur
- enfin, il est possible de superposer plusieurs cycles sur le même diagramme

Liaison des points par des lignes d'iso-valeurs

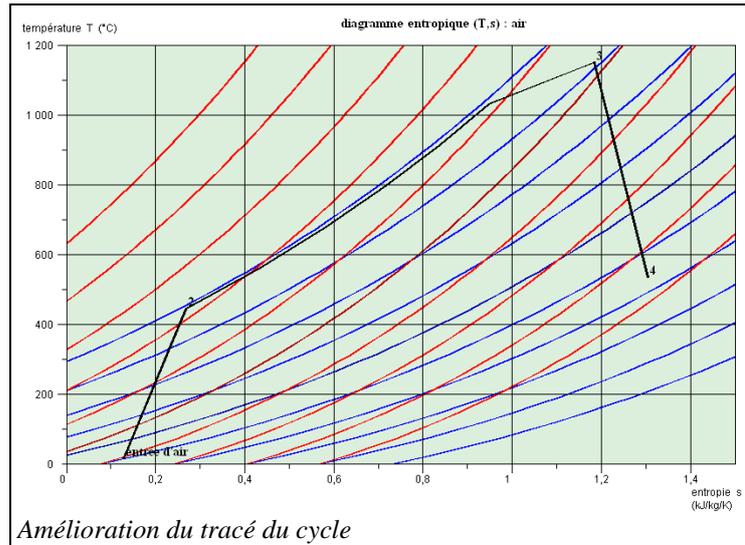
Le tracé du cycle dans le diagramme entropique n'est pas tout à fait satisfaisant parce que ThermoOptim relie par une ligne droite brisée les différents points.

Vous pouvez améliorer manuellement ce tracé en opérant de la manière suivante: ouvrez l'éditeur de points de cycles, accessible depuis le menu "Cycle" du diagramme. Les différents points sont affichés ci-dessous.

nom du point	température T (°C)	pression P	enthalpie h	entropie s	chaleur massique	volume v
entrée d'air	15	1	-9,87037	0,128011	1 001,88	0,827301
2	442,62148	16	432,84313	0,268478	1 080,19	0,12844
3	1 150	16	1 298,66331	1,1841	1 265,13	0,258582
4	533,07559	1	551,37978	1,30501	1 146,52	2,34382

Points de l'éditeur de cycles

Il est maintenant possible de connecter les points 2 et 3a par une isobare : sélectionnez les deux lignes 2 et 3 en même temps, et cliquez sur "Insérer". Un écran de sélection des différentes courbes d'iso-valeurs est proposé. Choisissez "isobare". On vous demande alors de fournir le nombre de points que vous désirez insérer, en vous en proposant 5. Entrez "OK". 5 nouveaux points sont créés dans l'éditeur de points de cycles. Cliquez sur "Valider" : le tracé suit maintenant l'isobare 16 bars à partir du point 2, puis montre un décrochement jusqu'au point 3.



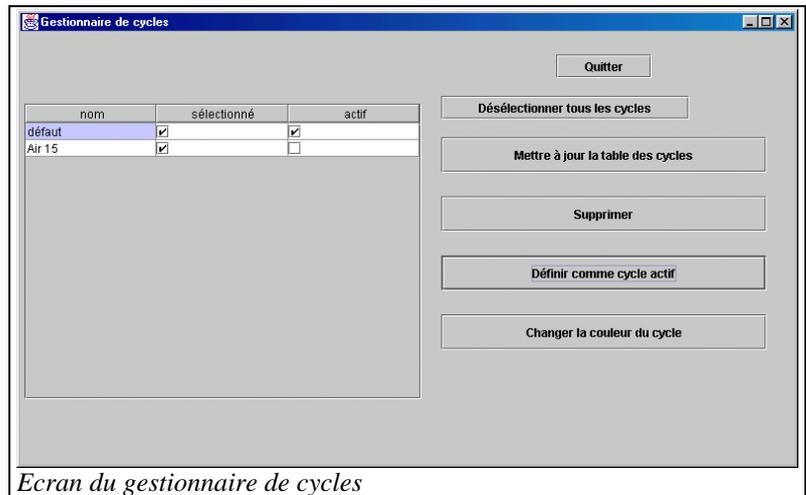
La représentation de ce cycle sur un diagramme thermodynamique pose en effet problème, du fait que ce n'est pas le même fluide qui traverse l'ensemble de la machine : le changement de composition dans la chambre de combustion interdit en principe de tracer le cycle dans un seul diagramme. Sur le diagramme entropique de l'air, les points 3 et 4 n'apparaissent ainsi pas sur les bonnes isobares, du fait du changement de fluide. Le décrochement observé s'explique ainsi très bien.

Si vous désirez sauver ce cycle, ouvrez l'éditeur de points de cycles, entrez le titre et le descriptif que vous souhaitez et sauvez le cycle.

Changement de la couleur du cycle

Il est possible de choisir la couleur du cycle de la même manière que vous le faites pour les courbes du diagramme. La ligne de menu "Gestionnaire de cycle" du menu "Cycle" vous permet d'ouvrir l'écran ci-contre. Si vous cliquez sur "Mettre à jour la table des cycles", tous les cycles déjà chargés sont affichés. Sur la figure, deux cycles sont chargés : le cycle par défaut qui est "actif", et un second qui a été chargé à partir d'un fichier.

Le titre du cycle tel qu'il a été défini dans l'éditeur de points de cycle est affiché comme nom.



Écran du gestionnaire de cycles

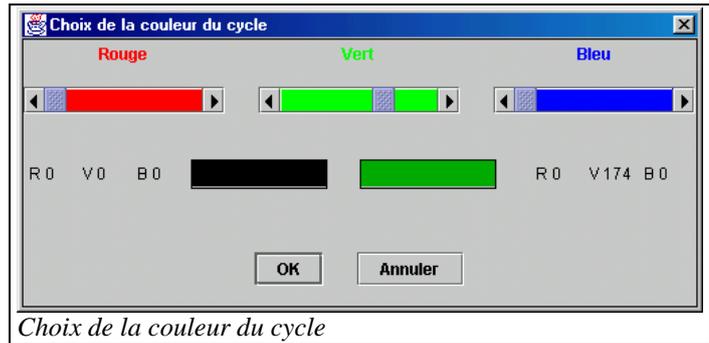
Vous sélectionnez le cycle actif en choisissant sa ligne et en cliquant sur "Définir comme cycle actif". Le cycle actif a les propriétés suivantes :

- il est connecté au simulateur
- c'est celui sur lequel opèrent les lignes du menu "Cycle", c'est-à-dire qu'il peut être effacé, sauvé, que ses points peuvent être édités dans l'éditeur de points de cycles...

Si vous double-cliquez sur une ligne, vous changez son statut dans la colonne "sélectionné": s'il est coché, le cycle est tracé sur le diagramme, sinon il ne l'est pas. Vous pouvez désélectionner tous les cycles en cliquant sur "Désélectionner tous les cycles". Vous pouvez supprimer un cycle de la liste en sélectionnant sa ligne et en cliquant sur "Supprimer". Son tracé est aussi supprimé du diagramme.

Pour changer la couleur d'un cycle, sélectionnez sa ligne et cliquez sur "Changer la couleur du cycle". Un écran vous permettant de choisir sa couleur est affiché. Pour sauver la nouvelle couleur, définissez ce cycle comme le cycle actif, et sauveez-le.

Supprimer le cycle actif revient à l'effacer à partir du menu du diagramme. Pour générer un nouveau cycle actif, vous pouvez soit définir un autre cycle comme actif, soit créer des points sur le diagramme, ouvrir l'éditeur de points de cycles et valider.



Superposition de plusieurs cycles sur un diagramme

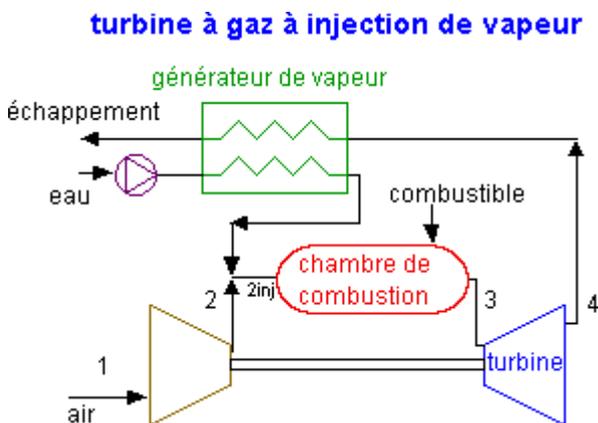
Pour tracer plusieurs cycles sur un même diagramme, il suffit de les charger successivement à partir de différents fichiers et de les sélectionner dans le gestionnaire de cycles. Ils apparaissent automatiquement sur le diagramme.

CHANGEMENT DE TYPE DE DIAGRAMME

Vous pouvez changer de type de diagramme en sélectionnant la ligne correspondante dans le menu "Graphe". Pour les gaz idéaux cependant, cela ne présente généralement pas beaucoup d'intérêt, le diagramme de Clapeyron étant très imprécis.

TURBINE A GAZ A INJECTION DE VAPEUR

On considère une turbine à gaz à injection de vapeur fonctionnant suivant le schéma suivant :

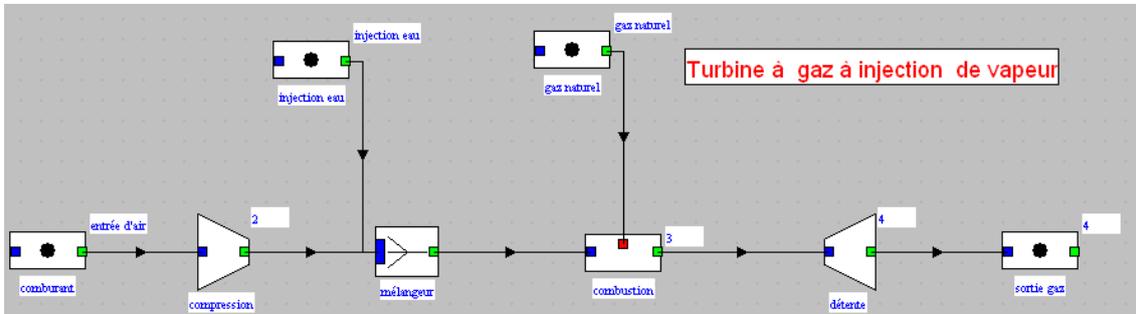


Un débit massique d'air de 1 t/s est aspiré à 1 bar et $T_1 = 294$ K, puis comprimé à 16 bar par un compresseur de rendement polytropique égal à 0,85. En entrée de chambre de combustion, on injecte un débit α d'eau à 20 bar et 400 °C. Le mélange est brûlé dans la chambre de combustion avec du gaz naturel de composition molaire :

	%
CH ₄	0,871
C ₂ H ₆	0,088
C ₃ H ₈	0,025
C ₄ H ₁₀	0,0080
N ₂	0,0080

A l'entrée dans la turbine, la température des gaz est limitée à 1150 °C pour des raisons technologiques. Le taux de dissociation du CO₂ est supposé égal à 10 %, et la température de figeage est prise égale à 1100 °C.

Les gaz brûlés sont détendus à 1 bar dans une turbine de rendement polytropique égal à 0,85. Déterminer, pour $\alpha = 0,1$ t/s, le rendement du cycle.



Le schéma du cycle est proche de celui de la turbine à gaz simple. Il s'en distingue par l'existence d'un mélangeur en amont de la chambre de combustion. Pour le construire, il faut ajouter une transfo-point pour l'injection d'eau, et un mélangeur, dont les deux branches sont le compresseur d'air et l'injection d'eau, et la veine principale la chambre de combustion.

Sur ce schéma, nous avons renommé quelques points et transfos par rapport à celui de la turbine à gaz, mais le principe est le même. Une fois le schéma établi, les éléments du simulateur peuvent être construits, puis paramétrés.

Examinons en particulier le mélangeur :

noeud type

veine principale

isobare

nom transfo	m abs	T (°C)	H
compression	1	412,23	400,11
injection eau	0,1	400	3 248,68

Il détermine la composition du gaz air_injection, et détermine l'état du point 2inj (16 bar 410,25 °C).

Composition du gaz air_injection		
La première colonne de chiffres à gauche indique si la saisie est faite en variables molaires ou massiques		
nom du composant	fraction molaire	fraction massique
N2	0,6728466	0,6868457
Ar	0,007753674	0,0112876
O2	0,1809191	0,2109577
H2O	0,1384806	0,09090909

Le paramétrage de la combustion est un peu plus complexe que celui de la turbine à gaz simple étudiée précédemment, étant donné qu'il y a prise en compte de la dissociation :

transfo type

type énergie débit imposé système fermé observée

point amont débit (t/s) système ouvert

air humide m Δh (MW)

T (°C) W

P (bar) combustible

h (kJ/kg) type CHa

titre prémélangé

point aval dissociation taux dissociation

3 Calculer lambda lambda

T (°C) Calculer T T (°C)

P (bar) Imposer le débit de combustible

h (kJ/kg) pression imposée

titre par le point amont

par l'utilisateur

rendt. combustion

rendement chambre

Il faut indiquer le taux de dissociation (10 %), et la température de figeage (1150 °C). Ici aussi, la température de fin de combustion est connue, et c'est le facteur d'air qui doit être déterminé.

Le calcul montre que, compte tenu de la dissociation, le rendement de combustion est inférieur à l'unité. La composition des gaz brûlés est la suivante :

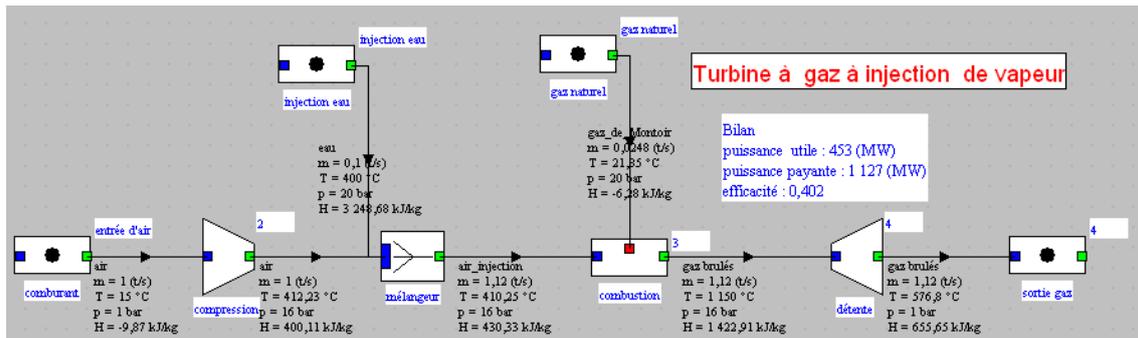
nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,03341081	0,0546863
H2O	0,1914162	0,1282513
O2	0,1087309	0,1293984
N2	0,6449876	0,6719846
CO	0,003712312	0,003867283
H2	0,0103126	0,00077317
Ar	0,00742967	0,01103897

La présence de traces de monoxyde de carbone et d'hydrogène est dû à la dissociation.

Le bilan du cycle peut être calculé une fois les transfos calculées :

Bilan	
efficacité	0,402
énergie utile	453
énergie payante	1 127

Les valeurs peuvent aussi être affichées sur le schéma :

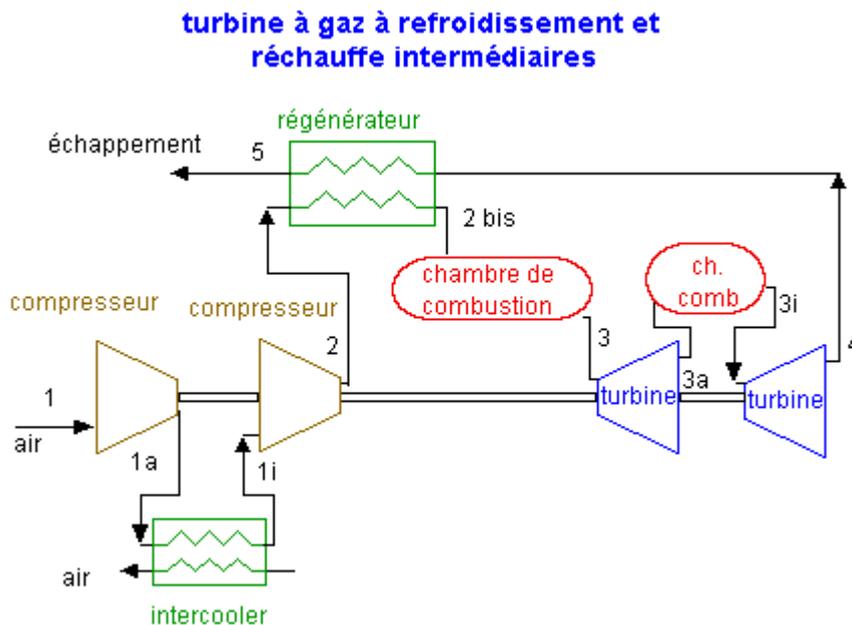


Il est facile d'utiliser ce modèle pour faire varier le débit de la vapeur injectée.

Sauvez enfin les fichiers de schéma et de projet, par exemple sous le nom de STIG.dia et STIG.prj.

TURBINE A GAZ A REGENERATION

On considère une turbine à gaz à régénération fonctionnant suivant le schéma suivant :

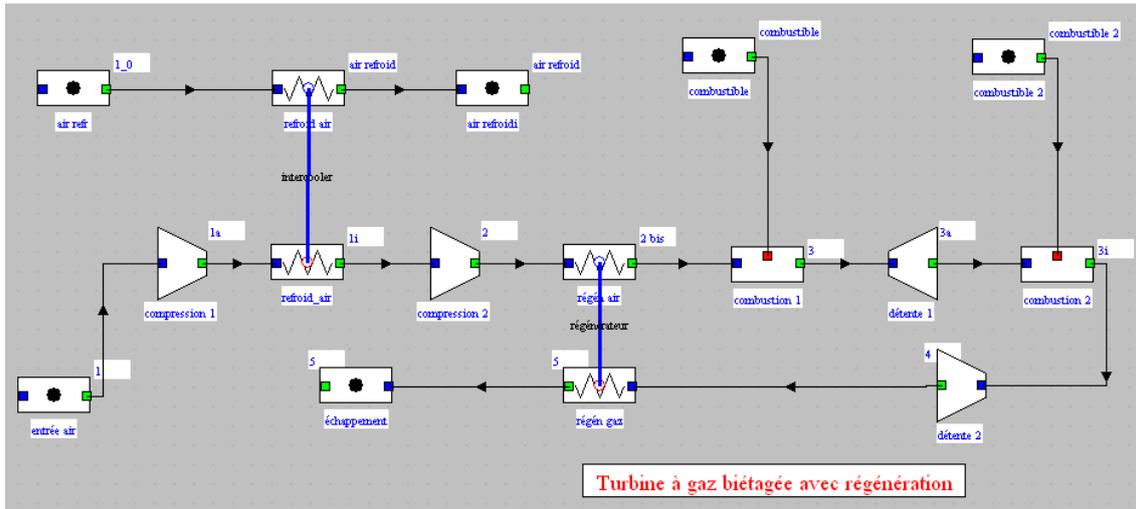


1 t/s d'air aspiré à 15 °C et 1 bar est comprimé à 4 bar dans un premier corps de compression, puis refroidi par échange avec l'air ambiant, avant d'être porté à 16 bar dans un deuxième compresseur. Il entre alors dans un régénérateur qui lui permet de récupérer une partie de l'enthalpie disponible en fin de détente.

L'air sortant du régénérateur est porté à haute température (1150 °C) dans une première chambre de combustion, où il brûle avec du gaz naturel. Les gaz sont détendus à 4 bar, puis réchauffés par combustion à 1150 °C avant d'être détendus à 1 bar, et dirigés vers le régénérateur.

Le débit d'air de refroidissement est supposé être égal à 10 kg/s, avec une efficacité de 80 % pour l'intercooler et de 75 % pour le régénérateur, les deux échangeurs étant à courants croisés non mélangés. Un taux de dissociation de 10 % et une température de figeage de 1200 °C seront pris pour les combustions.

La construction du schéma de pose pas de problème particulier :



Notons que ce problème est particulièrement complexe parce que le système est fortement couplé : la température d'air du point 2bis, en sortie de régénérateur, dépend de l'enthalpie des gaz au point 4, c'est-à-dire de leur composition et de leur débit, qui eux-mêmes dépendent de la quantité de carburant injectée, et donc de l'état du point 2bis.

Le paramétrage des échangeurs demande à être fait avec soin :

nom	intercooler	type	croisé non mélangé	<	>	Sauver
				Supprimer		Fermer
fluide chaud		fluide froid		Calculer		
	refroid_air		refroid air	afficher		
Tce (°C)	178,85304985	<input checked="" type="radio"/> imposé	Tfe (°C)	15	<input type="radio"/> imposé	<input checked="" type="radio"/> calculé
Tcs (°C)	47,77060997	<input type="radio"/> imposé	Tfs (°C)	28,23896268	<input type="radio"/> imposé	<input checked="" type="radio"/> calculé
mc	1	<input checked="" type="radio"/> imposé	mf	10	<input type="radio"/> imposé	<input checked="" type="radio"/> calculé
Cpc	1,01213813	<input type="radio"/> calculé	Cpf	1,00214449	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé
m ΔHc	-132,67353558	<input type="radio"/> calculé	m ΔHf	132,67353556	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé
<input type="radio"/> non contraint			UA	1,75852202	<input checked="" type="radio"/> dimensionnement	
<input type="radio"/> pincement minimum	DTmin	16	R	0,100997225	<input type="radio"/> non nominal	
<input checked="" type="radio"/> efficacité imposée	epsilon	0,8	NUT	1,73743283		
			DTML	77,2648469		

Dans les deux cas, les débits et les températures d'entrée des deux fluides sont imposées, et l'efficacité de l'échangeur est fixée (à 0,8 pour l'intercooler, et 0,75 pour le régénérateur).

Compte tenu du fort couplage qui existe entre tous les éléments, plusieurs recalculs sont nécessaires pour que le modèle converge (une dizaine), conduisant aux résultats suivants :

Composition des gaz en sortie de première chambre de combustion :

Composition du gaz gaz brûlés		
La première colonne de chiffres à gauche indique si la saisie est faite en variables molaires ou massiques :		
nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,02211337	0,03400533
H2O	0,04372343	0,02752313
O2	0,1594984	0,1783333
N2	0,7614667	0,7453485
CO	0,002457041	0,002404775
H2	0,001968171	0,0001386341
Ar	0,00872941	0,01224629

Composition des gaz en sortie de deuxième chambre de combustion :

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,03657267	0,05667888
H2O	0,07231293	0,04587458
O2	0,1264788	0,1425147
N2	0,7486944	0,7385597
CO	0,00406363	0,004008193
H2	0,003255101	0,0002310704
Ar	0,008624474	0,0121329

Le bilan du cycle est déterminé.

Enfin, les résultats peuvent être affichés sur le schéma.

Sauvez enfin les fichiers de schéma et de projet, par exemple sous le nom de TAGrégén.dia et TAGrégén.prj.

Bilan	
efficacité	0,462
énergie utile	501
énergie payante	1 084

