

Etude d'une installation de cogénération industrielle

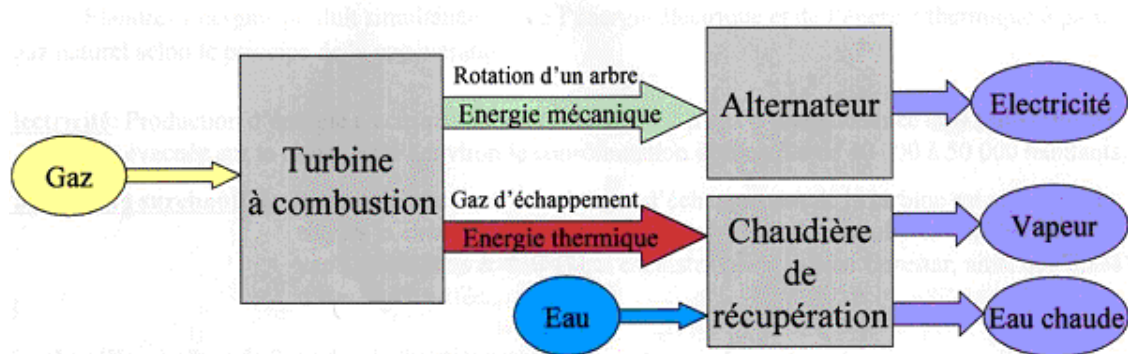
Objectif du TD :

L'objectif de ce TD est l'étude et la modélisation sous Thermoptim d'une installation de cogénération existante, et l'influence des différents paramètres sur le rendement.

Présentation de l'installation :

L'installation présentée ci-dessous est une installation de cogénération (cf. séance diaporama [S45](#), [S46](#), [S47](#) du portail Thermoptim*¹ et fiche thématique*²) fonctionnant avec une turbine à gaz. C'est une centrale de cogénération dont le principe de fonctionnement est le suivant :

Principe de fonctionnement d'une centrale de cogénération



Avantages: • **Rendement global élevé**

• **Faible niveau de rejets polluants**

• **Production décentralisée / avantages multiples**

Cette centrale produit simultanément :

- **Electricité :** Production d'énergie électrique à travers une turbine à gaz d'une puissance de 6.8 MW évacuée sur le réseau EDF (environ la consommation d'une ville de 6 000 à 8 000 habitants)
- **Vapeur/eau surchauffée :** L'énergie contenue dans les gaz d'échappement de la turbine est valorisée à travers la chaudière. Cette valorisation permet de produire environ 19.7 t/h de vapeur à 21 bars et 37 t/h lorsque la post-combustion est activée.

La chaudière dispose de 3 modes de fonctionnement :

*1 : <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/divers-portal/seances-disponibles>

*2 : <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cogeneration>

- « Récupération pure » : Production de vapeur et d'eau surchauffée uniquement à partir des fumées de la turbine => (de 0 à 19.7 t/h de vapeur)
- « Post-combustion » : Allumage de brûleur en chaudière pour apporter une énergie supplémentaire permettant d'atteindre un débit de 37 t/h => (de 19.7 à 37 t/h + eau chaude)
- « Air ambiant » : Ce mode assure un secours et une continuité de la production vapeur sur un arrêt turbine en utilisant le principe d'une chaudière traditionnelle => (de 0 à 37 t/h)

Voici la fiche technique de cette installation :

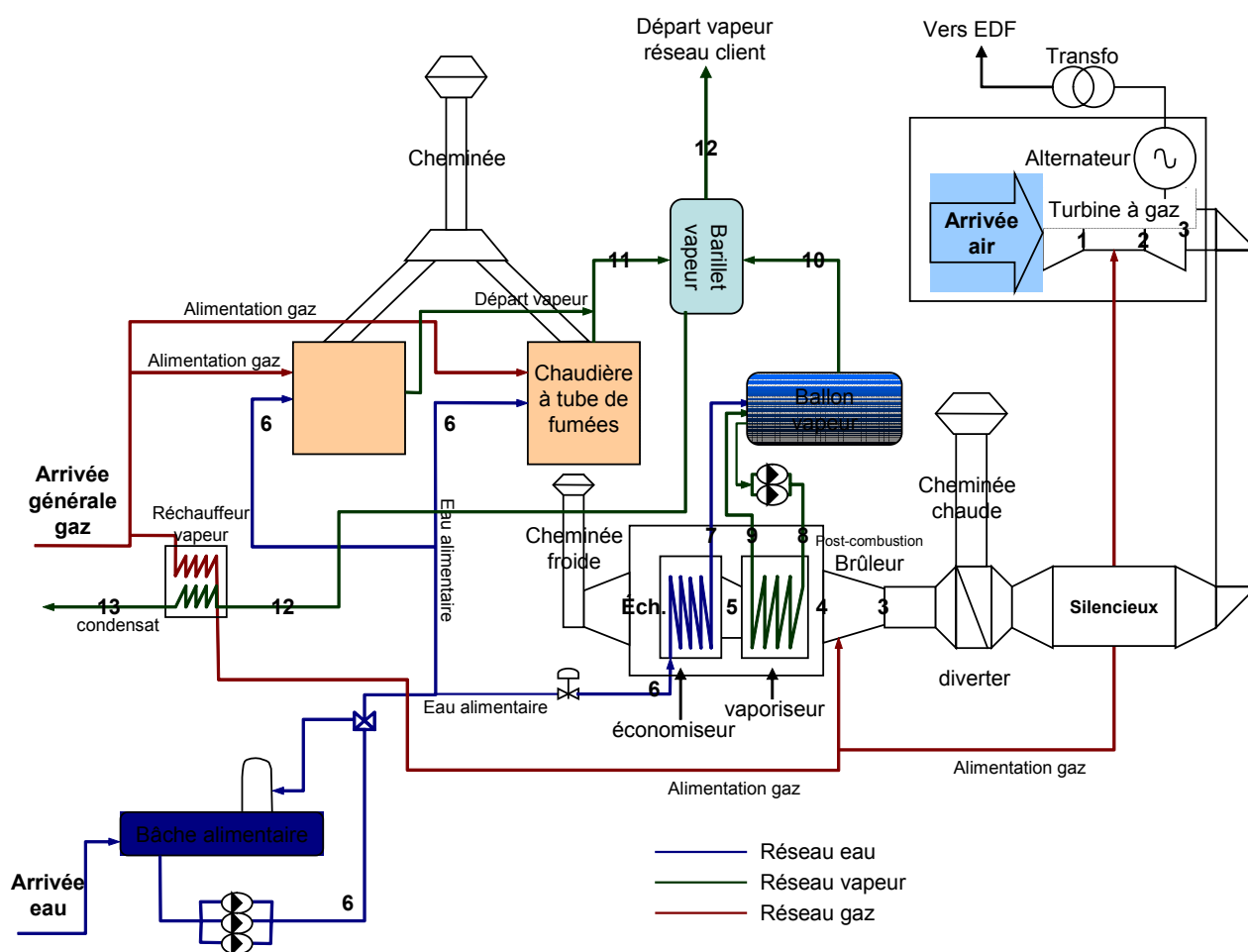
Site :	
Type :	Industrie
Ville :	
Année d'installation :	2001
Technologie :	Turbine à gaz
fabriquant :	SIEMENS
Modèle :	SGT - 300
Nombre d'unité :	1
Puissance électrique :	6,8 MW
Puissance thermique :	11,8 MW
Rendement électrique :	26%
Rendement thermique :	44%
Rendement global :	70%
Type de carburant :	Gaz naturel

	Données constructeur PC/RP
Débit arrivée d'air	29,5 kg/s
Température d'arrivée de l'air	15°C
Pression d'arrivée de l'air	1 bar
Taux de compression	14(comp.) / 10,77(détente)
Pression alimentation gaz	19 bars / 4 bars
Température alimentation gaz	5°C
Rendement polytropique	-
Température fin de combustion	-
Température fin de détente	546°C
Débit des fumées amont brûleur	29,8 kg/s
Température sortie brûleur	829°C / -
Débit eau	10,28 kg/s / 5,47 kg/s
Pression eau/vapeur	12,3 bars / 22,5 bars
Température saturation eau	189,08°C / 218,4°C
Température en début/fin du vaporiseur coté vapeur	189,08°C / 189,08°C titre varie de 0 à 1
Température en début/fin du vaporiseur coté fumées	829°C / ?
Température en début/fin d'économiseur côté eau	105°C / 189,08°C
Température en début/fin d'économiseur côté fumées	? / 125°C
Température échappement fumées	125°C / 148°C
Rendement électrique	26%

Rendement thermique	44%
Rendement global	70%
Puissance électrique	6,8 MW
Puissance thermique	11,8 MW

Ces caractéristiques sont celles qui nous ont été données par le constructeur. Sous Thermoptim, votre objectif est d'essayer de vous en rapprocher un maximum, mais nous verrons que nous n'obtenons pas strictement les mêmes résultats.

Pour mieux comprendre et visualiser cette installation, en voici un dessin illustrant les principaux organes :



Ce schéma de l'installation est clair, et nous pouvons voir tous les composants de l'installation, il faut dans un premier temps chercher à comprendre cette installation.

Modélisation (éditeur de schéma) :

Pour la turbine à gaz :

- L'air passe tous d'abord dans un compresseur où il est comprimé jusqu'à 14 bars (taux de compression de 14:1) (1).
- Puis il est chauffé dans une chambre de combustion alimentée en gaz ; pour information, le gaz délivré par GDF est sous 19 bars de pression à 15°C (2).

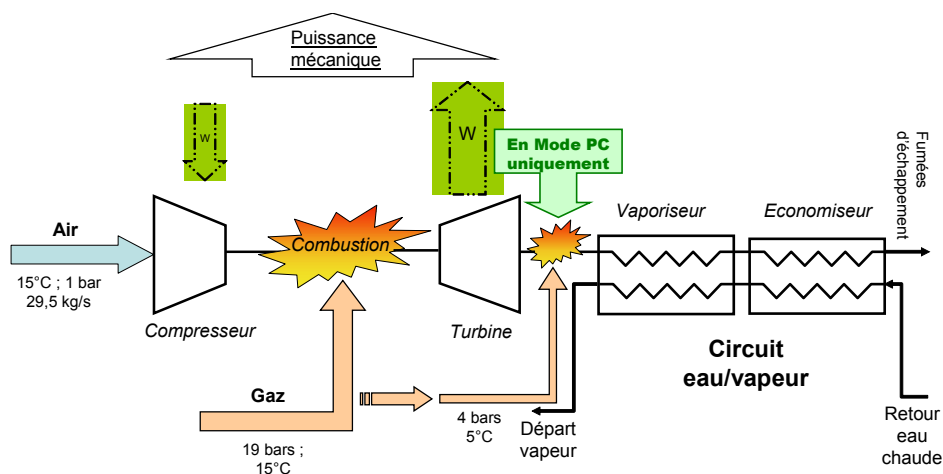
- En sortie de chambre, les fumées sont détendues dans une turbine, couplée avec le compresseur, qui alimente un alternateur. (3)
- Le silencieux et le diverter ne seront pas modélisés (le diverter régule la quantité d'énergie thermique envoyée en chaudière).
- Ensuite un brûleur, alimenté en gaz détendu à 4 bars et 5°C, permet de réchauffer les gaz brûlés pour obtenir jusqu'à 37t/h de vapeur dans le vaporisateur. Les fumées atteignent alors une température de 829°C. (4)
- Enfin les fumées passent dans le vaporisateur pour vaporiser l'eau du circuit (5) et l'économiseur pour chauffer celle-ci jusqu'à la température de saturation, avant la vaporisation... (Ech.)

Pour le circuit d'eau :

- L'eau arrive dans la bêche alimentaire, puis est comprimée jusqu'à la pression de fourniture du circuit : 12,3 bars ou 22,5 bars (6).
- En fait, on ne sait pas pourquoi mais la température de saturation ; sortie économiseur est donnée à 189°C, ce qui correspond à une pression de 12,3 bars... Sur Thermoptim, cela coïncide, il paraît donc que nous aurions une pression inférieure dans le cas du mode PC. Une vanne trois voies permet à l'eau de retourner dans la bêche alimentaire, et ainsi de réguler le mode de fonctionnement du circuit selon les besoins d'eau demandée.
- L'eau est ensuite dirigée vers les chaudières et/ou les récupérateurs de chaleurs de la turbine à gaz. Cela dépend du mode de fonctionnement de l'installation.
 - Les points 10 et 11 sont au même état thermodynamique, car nous n'avons pas d'échange dans le barillet ; vapeur saturée à 21 bars.
 - Dans le ballon, nous avons un mélange eau/vapeur à 21 bars. Nous avons donc en 7 et 8, une eau dans l'état de liquide saturé, et en 9, une vapeur saturée.
- Nous allons ici nous intéresser à deux modes de l'installation : le mode Post Combustion PC, et le mode Récupération Pure RP.*

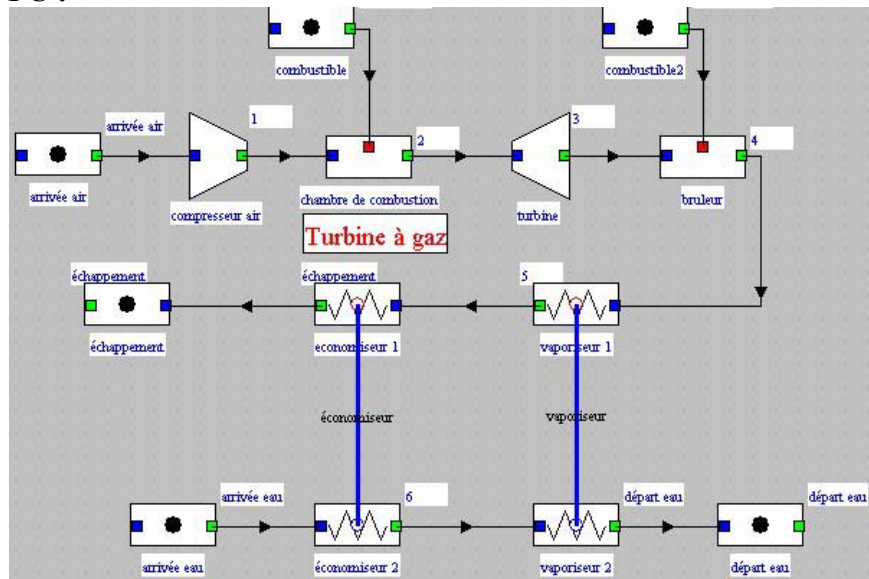
Il est désormais possible de chercher à modéliser cette installation, en un schéma simple utilisant les transformations du noyau de Thermoptim.

Une telle représentation peut aboutir à l'illustration ci-après :

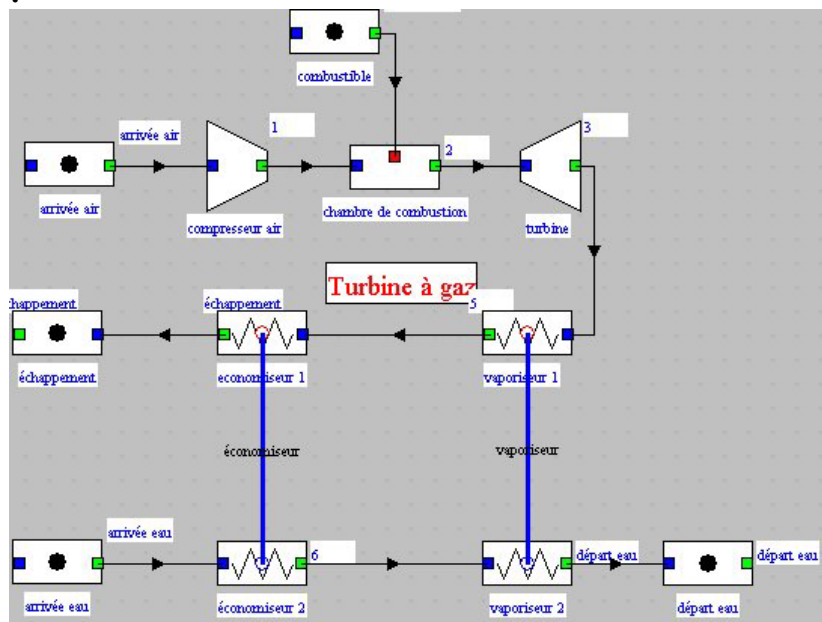


L'installation ainsi représentée est alors facile à modéliser sous Thermoptim. Nous devons arriver au schéma suivant :

En mode PC :



En mode RP :



NB : Pensez bien à paramétrer votre système avant de créer les échangeurs. Le paramétrage est facile étant donné tous les éléments dont nous disposons.

Paramétrage (simulateur) :

➤ *La turbine à gaz :*

Vous connaissez le débit d'air, la température en fin de détente et le rapport de détente, donc vous pouvez trouver la température de fin de combustion, qui va vous imposer le débit de combustible. Vous devez essayer également de vous rapprocher des

valeurs constructeurs pour l'énergie mécanique obtenu, qui doit être légèrement supérieure à l'énergie électrique étant donné le rendement de l'alternateur : 6,8 MW.

Résultats :

Pour les différentes transformations nous avons les résultats suivants :
 Pour la compression, la chambre de combustion principale, et la détente, les résultats obtenus sont les même qu'il s'agisse du mode RP ou PC.

Compresseur

transfo	compresseur air	type	compression	< > Sauver	
type énergie	utile	<input type="checkbox"/> débit imposé	débit	29,5	<input type="radio"/> système fermé <input type="checkbox"/> observée
point amont	arrivée air	affichage	m Δh	11 147,81	<input checked="" type="radio"/> système ouvert
T (°C)	15	affichage	Q	0	Calculer
P (bar)	1		<input checked="" type="radio"/> adiabatique <input type="radio"/> non adiabatique		
h (kJ/kg)	-9,87		<input type="radio"/> référence isentropique <input checked="" type="radio"/> référence polytropique		
titre	1		rend. polytropique	0,9	
point aval	1	affichage	exposant polytropique	1,45217	
T (°C)	382,23		rapport de pression (>= 1)	14	<input type="radio"/> calculé <input checked="" type="radio"/> imposé
P (bar)	14		Imposer le rendement et calculer la transfo <input checked="" type="radio"/>		
h (kJ/kg)	368,02		Calculer le rendement, le point aval étant connu <input type="radio"/>		
titre	1				

En sortie de compression, nous sommes à 14 bars et 382,3°C. Nous n'avons pas de valeurs indiquées, du coup nous pouvons choisir un rendement polytropique. Pour essayer de s'approcher de la réalité, on peut prendre un rendement de 0,9.

Chambre de combustion

transfo	chambre de combust	type	combustion	< > Sauver	
type énergie	payante	<input type="checkbox"/> débit imposé	débit	30,039559	<input type="radio"/> système fermé <input type="checkbox"/> observée
point amont	1	affichage	m Δh	26 261,5	<input checked="" type="radio"/> système ouvert
T (°C)	382,23	affichage	W	0	Calculer
P (bar)	14		combustible	combustible	affichage
h (kJ/kg)	368,02		<input type="checkbox"/> type CHa		
titre	1		<input type="checkbox"/> prémélangé		
point aval	2	affichage	<input type="checkbox"/> dissociation		
T (°C)	1 100		rendt. combustion	1	
P (bar)	14		rendement chambre	1	
h (kJ/kg)	1 235,64		<input checked="" type="radio"/> Calculer lambda	lambda	3,2779
titre	1		<input type="radio"/> Calculer T	T (°C)	1 100
			<input type="radio"/> Imposer le débit de combustible		

La température de sortie n'est pas donnée, mais on connaît celle de fin de détente (amont brûleur). On peut retrouver la température de fin de combustion de cette manière. On obtient 1100°C avec un débit combustible de 0,54 kg/s au lieu des 0,3 données (débit des fumées de 29,8, donc débit carburant de 0,3). La chambre de combustion pouvant être considérée en première approximation comme adiabatique, on peut prendre 1 comme valeur du rendement.

Turbine

The screenshot shows a software interface for turbine simulation. The main title is "Turbine". The interface is divided into several sections:

- transfo:** turbine
- type:** détente
- type énergie:** utile
- débit imposé:**
- débit:** 30,03955939
- point amont:** 2
- T (°C):** 1 100
- P (bar):** 14
- h (kJ/kg):** 1 235,64
- titre:** 1
- point aval:** 3
- T (°C):** 545,93
- P (bar):** 1,2999
- m Δh:** -20 110,91
- Q:** 0
- rend. polytropique:** 0,9
- exposant polytropique:** 1,27777
- rapport de détente (>= 1):** 10,77
- adiabatique:**
- non adiabatique:**
- référence isentropique:**
- référence polytropique:**
- calculé:**
- imposé:**

Buttons include "Sauver", "Supprimer", "Fermer", "Calculer", "afficher", and "calculé".

Nous arrivons ici à 545,9°C au lieu de 546, ce qui est normal puisque notre calage s'appuie sur cette valeur.

Nous avons aussi choisi de ne pas détendre jusqu'à 1 bar car nous avons encore des éléments derrière qui vont sûrement rajouté des pertes de charges. C'est pourquoi nous avons détendu jusqu'à 1,3 bar ; ce qui est plus vraisemblable. Les valeurs indiquées sont probablement les valeurs de fonctionnement de la turbine à gaz sans l'installation de cogénération qui est placé derrière celle-ci...

Nous avons aussi choisi un rendement polytropique de 0,9.

Nous avons un travail mécanique fourni de $|11,15 - 20,11| = 8,96 MW$ et nous voulons 6,8MW d'électricité. Cela nous donne un rendement de 75,9% pour l'alternateur. Cela paraît cohérent car il peut y avoir aussi un réducteur avec un rendement assez faible.

➤ La Post Combustion et les échangeurs :

Dans le cas de la post combustion, nous apportons du combustible et réalisons une deuxième combustion qui va nous permettre d'atteindre une température de sortie des fumées plus élevée. Nous savons que nous ressortons à 829°C, que notre débit de vapeur est de 37 t/h et que nos fumées doivent ressortir à 125°C.

En fait, tout est déjà indiqué et il ne nous reste plus qu'à faire un paramétrage de nos modules d'échanges approximatif pour pouvoir créer les échangeurs. Puis nous paramétrons les échangeurs.

1/ Post Combustion

Une capture d'écran d'un échangeur est illustrée ci-dessous. Pour dimensionner un échangeur, il faut imposer 5 variables et en calculer une, ou bien en imposer 4 et en calculer 2 si on impose l'efficacité de l'échangeur.

Dans la plupart des cas, trois variables sont imposés directement : la température d'entrée du fluide chaud (T_{ce}), la température d'entrée du fluide froid (T_{fe}) et le débit du fluide chaud (mc).

Le débit de fluide froid est aussi généralement connu et on impose l'efficacité de l'échangeur.

Ces paramètres sont utilisés dans les cas réels ; maintenant comme il s'agit d'une modélisation, on peut procéder à tâtons en jouant sur les paramètres imposés et à calculer afin de caler notre modèle. Dans ce cas, on peut imposer ce que l'on souhaite et Thermoptim nous calcule l'efficacité de notre échangeur.

Une fois ceci fait, on peut essayer de se remettre dans le cas réel.

Il faut penser que dans le premier échangeur, nous avons de l'eau qui est vaporisée, puis surchauffée. Il faut donc modéliser cela par deux échangeurs, sans quoi notre vaporiseur/surchauffeur serait instable et Thermoptim ne convergerait pas.

Résultats et capture d'écran des échangeurs :

Vaporiseur

nom	vaporiseur	type	contre-courant	<	>	Sauver
				Supprimer		Fermer
fluide chaud		fluide froid		Calculer		
vaporiseur 1		vaporiseur 2		afficher		
Tce (°C)	829	<input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé	Tfe (°C)	189	<input type="radio"/> imposé <input checked="" type="radio"/> calculé	
Tcs (°C)	250,7756302	<input type="radio"/> imposé <input checked="" type="radio"/> calculé	Tfs (°C)	190	<input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé	
mc	30,258442	<input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé	mf	10,28	<input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé	
Cpc	1,16512668		Cpf	1 983,00123958		
m ΔHc	-20 385,25274292		m ΔHf	20 385,25274292		
<input checked="" type="radio"/> non contraint			UA	82,51213096	<input checked="" type="radio"/> dimensionnement	
<input type="radio"/> pincement minimum DTmin	0		R	0,00172943247	<input type="radio"/> non nominal	
<input type="radio"/> efficacité imposée epsilon	0,903475578		NUT	2,34044314		
			DTML	247,0576448		

Les valeurs imposées ici sont la température d'entrée des fumées (sortie brûleur), les débits et les températures de l'eau car on sait jusqu'au l'eau doit chauffer, juste après température de saturation. On obtient ainsi un rendement de 90,3% pour notre vaporiseur.

On arrive bien à une température de 250°C pour les fumées, en fin d'échange vapeur, et on a 20,39MW. Le débit de vapeur est bien de 37 t/h.

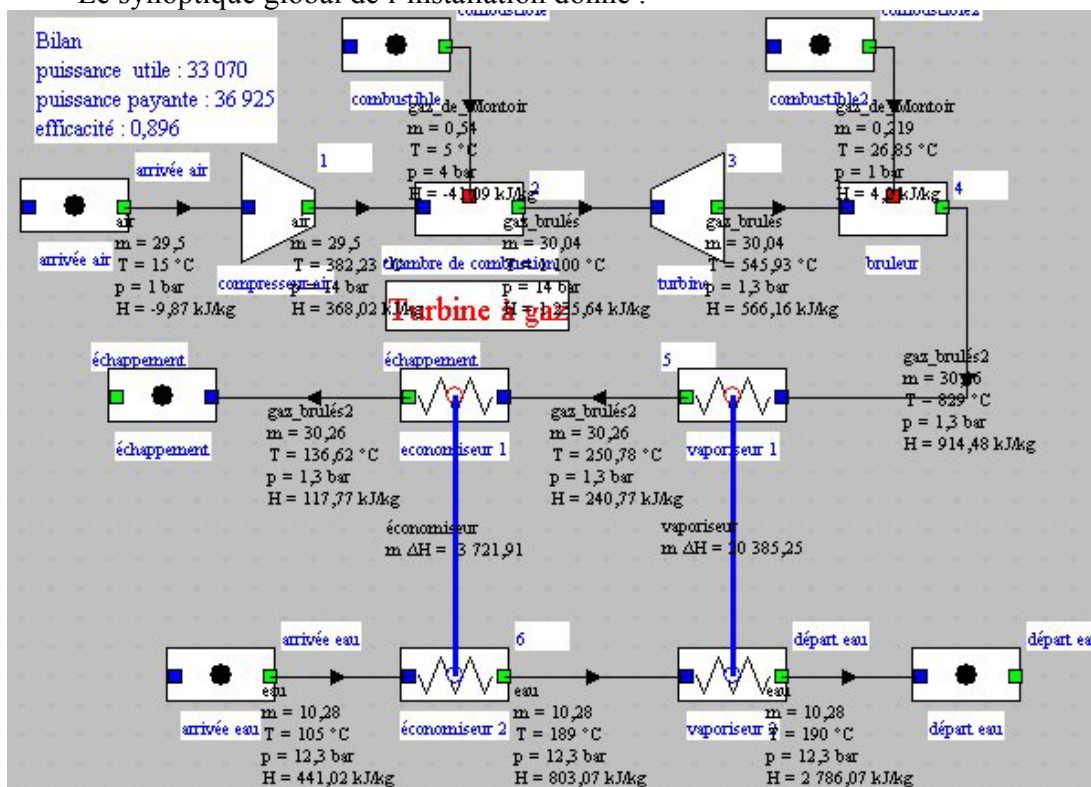
Economiseur

nom : économiseur		type : contre-courant		< >	Sauver
				Supprimer	Fermer
fluide chaud			fluide froid		
economiseur 1		afficher		economiseur 2	
		afficher		Calculer	
Tce (°C)	250,7756302	<input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé	Tfe (°C)	105	<input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé
Tcs (°C)	136,61595284	<input type="radio"/> imposé <input checked="" type="radio"/> calculé	Tfs (°C)	189	<input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé
mc	30,258442	<input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé	mf	10,28	<input checked="" type="radio"/> imposé <input type="radio"/> calculé
Cpc	1,07747419		Cpf	4,31016376	
m ΔHc	-3 721,91260972		m ΔHf	3 721,91260972	
<input checked="" type="radio"/> non contraint		UA		82,66376412	<input checked="" type="radio"/> dimensionnement
<input type="radio"/> pincement minimum	DTmin	0	R	0,73581147	<input type="radio"/> non nominal
<input type="radio"/> efficacité imposée	epsilon	0,78311908	NUT	2,53548904	
		DTML		45,02471729	

On a ici 3,72MW d'échange pour une eau qui arrive à 105°C et repars à 189°C, juste avant l'évaporation. Nos fumées ressortent à 136°C au lieu de 125, et notre efficacité d'échangeur est de 78,3%. Notre pincement minimum est de 53°C. Toutes ces valeurs sont impeccables et nous permettent de pouvoir dire que notre modèle est valide dans le cas de la PC.

Nous remarquons aussi que nous avons des UA voisins.

Le synoptique global de l'installation donne :



2/ Récupération Pure :

Dans le cas de la RP, nous n'avons que 19,7t/h de vapeur, ce qui équivaut à un débit de 5,47 kg/s.

Nous obtenons ainsi :

Vaporiseur

nom	vaporiseur	type	contre-courant	<	>	Sauver	
						Supprimer	Fermer
fluide chaud				fluide froid			
vaporiseur 1 afficher				vaporiseur 2 afficher Calculer			
Tce (°C)	545,92958984	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	Tfe (°C)	218	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé
Tcs (°C)	240,14749525	<input type="radio"/> imposé	<input checked="" type="radio"/> calculé	Tfs (°C)	219	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé
mc	30,03955939	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	mf	5,47	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé
Cpc	1,11170246			Cpf	1 866,83893834		
m ΔHc	-10 211,60899271			m ΔHf	10 211,60899271		
<input checked="" type="radio"/> non contraint				UA	90,19512757	<input checked="" type="radio"/> dimensionnement	
<input type="radio"/> pincement minimum	DTmin	0			R	0,00327030267	<input type="radio"/> non nominal
<input type="radio"/> efficacité imposée	epsilon	0,932462651			NUT	2,70085302	
				DTML	113,21685847		

Idem que dans le cas de la PC, avec une efficacité de 93,2% et un échange de 10,2MW.

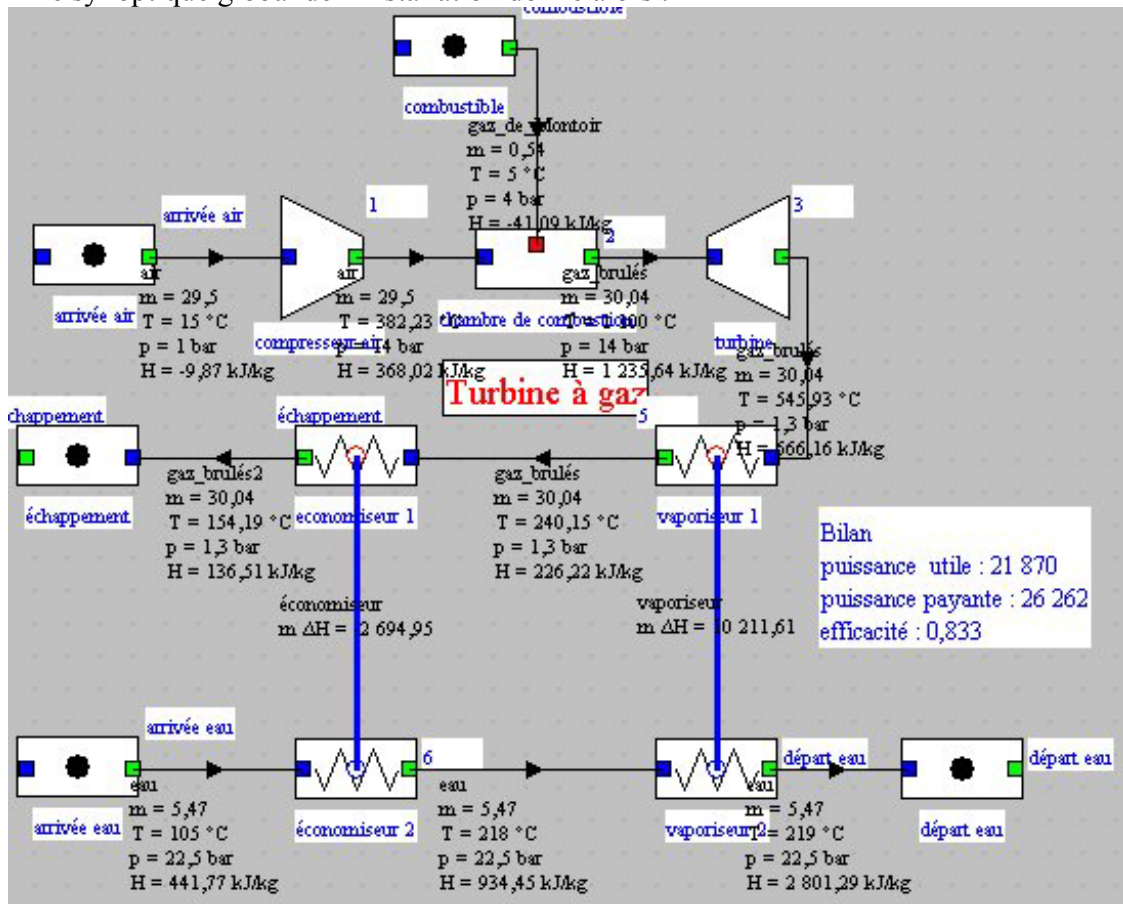
Nous reprenons alors directement à partir de la température des gaz brûlés de la première combustion puis de la détente. Nous ressortons de ces échangeurs vapeurs à 240°C pour les gaz avec bien un débit de vapeur de 5,47 kg/s et une température d'entrée de 218°C et de sortie à 219°C.

Economiseur

nom	économiseur	type	contre-courant	<	>	Sauver	
						Supprimer	Fermer
fluide chaud				fluide froid			
économiseur 1 afficher				économiseur 2 afficher Calculer			
Tce (°C)	240,14749525	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	Tfe (°C)	105	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé
Tcs (°C)	154,19391757	<input type="radio"/> imposé	<input checked="" type="radio"/> calculé	Tfs (°C)	218	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé
mc	30,03955939	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	mf	5,47	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé
Cpc	1,04374155			Cpf	4,35998221		
m ΔHc	-2 694,94860415			m ΔHf	2 694,94860431		
<input checked="" type="radio"/> non contraint				UA	79,51853291	<input checked="" type="radio"/> dimensionnement	
<input type="radio"/> pincement minimum	DTmin	0			R	0,76065113	<input type="radio"/> non nominal
<input type="radio"/> efficacité imposée	epsilon	0,836123524			NUT	3,33423584	
				DTML	33,89082401		

Nos fumées ressortent à 154°C au lieu de 148°C. C'est correct, mais cela nous pose la question de savoir si ce mode de fonctionnement ne pourrait pas être optimisé, afin de récupérer plus de chaleur.

Le synoptique global de l'installation donne alors :



Calcul du rendement et tableaux récapitulatifs :

Pour calculer votre rendement, pensez à bien mettre les bonnes énergies utiles et payantes.

- ✓ Les chambres de combustion sont payantes.
- ✓ La détente et compression sont utiles (puisque algébrique).
- ✓ L'énergie récupérée dans les modules d'échange d'échappement des fumées (vaporiseur 1 et économiseur 1) est utile.
- ✓ L'énergie des circuits de chauffage n'est pas comptée puisqu'elle ne fait pas directement partie de l'installation.

Pour finir de paramétrer votre modèle servez vous des données dans le tableau des caractéristiques de l'installation, page 2 et 3.

Les principaux paramètres sur lesquels vous pouvez jouer pour effectuer le calage de votre modèle sont les suivants :

- température de fin de combustion.
- rendements isentropiques de compression et détente

Voici un tableau récapitulatif des résultats :

	Données constructeur PC/RP	Résultats obtenus avec notre modèle mode PC	Résultats obtenus avec notre modèle mode RP
Débit arrivée d'air	29,5 kg/s	29,5 kg/s	
Température d'arrivée de l'air	15°C	15°C	
Pression d'arrivée de l'air	1 bar	1 bar	
Taux de compression	14(comp.) / 10,77(détente)	14(comp.)/10,77(détente)	
Pression alimentation gaz	19 bars / 4 bars	4 bars	
Température alimentation gaz	5°C	5°C	
Rendement polytropique	-	0,9	
Température fin de combustion	-	1235,6°C	
Température fin de détente	546°C	545,9°C	
Débit des fumées amont brûleur	29,8 kg/s	30,26 kg/s	30,04
Température sortie brûleur	829°C / -	829°C	-
Débit eau	10,28 kg/s / 5,47 kg/s	10,28 kg/s	5,47 kg/s
Pression eau/vapeur	12,3 bars / 22,5 bars	12,3 bars	22,5 bars
Température saturation eau	189,08°C / 218,4°C	189,08°C	218,4°C
Température en début/fin du vaporiseur coté vapeur	189,08°C / 189,08°C titre varie de 0 à 1	189°C / 190°C	218°C / 219°C
Température en début/fin du vaporiseur coté fumées	829°C / ?	829°C / 250,8°C	545,9°C / 240,1°C
Température en début/fin d'économiseur côté eau	105°C / 189,08°C	105°C / 149°C	105°C / 218°C
Température en début/fin d'économiseur côté fumées	? / 125°C	250,8°C / 136,6°C	240,1°C / 154,2°C
Température échappement fumées	125°C / 148°C	136,6°C	154,2°C
Rendement électrique	26%	25,0%	34,3%
Rendement thermique	44%	65,3%	49,1%
Rendement global	70%	90,3%	83,4%
Puissance électrique	6,8 MW	9 MW	
Puissance thermique	11,8 MW	24,1 MW	12,9 MW

Nous trouvons des résultats sensiblement différents malgré des valeurs proches au niveau des températures. Pour le reste, nous ne disposons que de très peu d'informations.

Ceci peut aussi s'explique du fait de plusieurs facteurs :

- L'explication de l'installation est peu détaillée, et les chaudières peuvent quand même fonctionner pour surchauffer la vapeur. A ce moment là il faudrait prendre en compte l'énergie utile pour surchauffer notre vapeur, et cela ferait chuter notre rendement.

- Plusieurs paramètres demeurent inconnus et nous devons les chercher... (température des gaz à la sortie de la chambre de combustion, rendements isentropiques de la compression et de la détente...)

Vous pouvez ensuite faire varier les différents paramètres afin d'observer leur influence sur le rendement, les quantités de chaleur ou de travail, etc.