

THERMOPTIM®

## Centrale de Cogénération

Exemple d'approfondissement

S. Candelier

## Avertissement: notice d'approfondissement.

L'objet de cette notice est d'approfondir les possibilités qu'offre ThermoOptim en matière de modélisation et de calcul de bilans énergétiques de cycles complexes. Par conséquent, on suppose que le lecteur est déjà un utilisateur de ThermoOptim qui en maîtrise les fonctions de base. Si ce n'est pas votre cas, vous devriez plutôt commencer par lire les notices de prise en main. Pour aborder cet exemple, il est en particulier recommandé d'avoir lu les notices de prise en main "Turbine à gaz" et "Cycle à vapeur simple".

L'exemple présenté ici, inspiré d'un cas réel, est une centrale de cogénération, qui fournit à la fois de la chaleur à un réseau de chauffage urbain, et de l'énergie mécanique convertie en électricité par un alternateur. L'objectif de cette notice est de modéliser l'installation sous ThermoOptim, de calculer son bilan énergétique, et d'étudier différents cas de fonctionnement selon les besoins en chaleur du réseau. Les fichiers de projet contenant cet exemple sont *coge.prj*, *coge2.prj* pour le deuxième cas de fonctionnement traité en détail, et *coge.dia* pour le schéma.

## SOMMAIRE

<b>I. PRESENTATION DE LA CENTRALE DE COGENERATION .....</b>	<b>3</b>
<i>I.1. L'INSTALLATION.....</i>	<i>3</i>
<i>I.2. LES CAS DE FONCTIONNEMENT .....</i>	<i>4</i>
<i>I.3. POINTS DE FONCTIONNEMENT .....</i>	<i>5</i>
<b>II. MODELISATION SOUS THERMOPTIM.....</b>	<b>8</b>
<i>II.1. CREATION DU SCHEMA ET PARAMETRAGE DES POINTS ET TRANSFOS.....</i>	<i>8</i>
<i>II.2. BILAN ENERGETIQUE.....</i>	<i>17</i>
<b>III. CALCUL DES DIFFERENTS CAS DE FONCTIONNEMENT .....</b>	<b>19</b>
<i>III.1. BESOINS EN CHALEUR TRES IMPORTANTS.....</i>	<i>19</i>

# I. Présentation de la centrale de cogénération

## I.1. L'installation

La centrale modélisée produit de l'électricité, et fournit de la chaleur au réseau de chauffage urbain d'une ville de 30 000 habitants. C'est une installation de type "chaleur-force", où la chaleur constitue le produit de base, l'électricité étant un sous-produit permettant de mieux valoriser le combustible, et qui est revendue à EDF. Le réseau de chauffage est un circuit d'eau sous pression dont la température est comprise entre environ 90°C et 130°C. Le circuit part de la centrale à sa température maximale, puis il parcourt la ville, et alimente des sous-stations d'échanges elles-mêmes destinées à assurer le chauffage et/ou le réchauffage d'eau sanitaire d'habitations, d'immeubles, d'hôpitaux, de groupes scolaires ... Enfin il revient à la centrale à sa température minimale, où il y est réchauffé. Les besoins en chaleur de la ville varient au cours de l'année en fonction des conditions climatiques. La centrale doit s'adapter à ces besoins et moduler la puissance thermique qu'elle fournit au réseau.

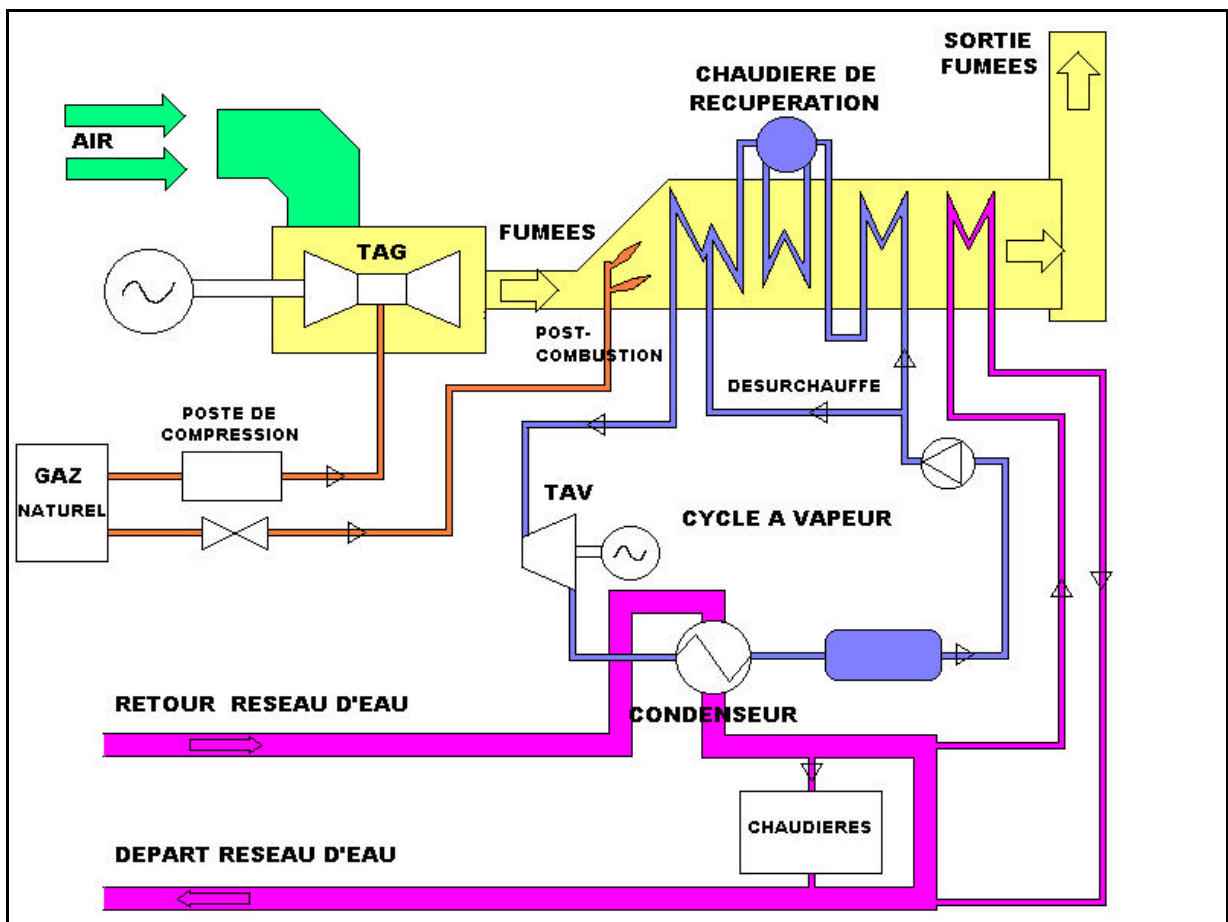


Figure 1: schéma d'ensemble de la centrale de cogénération

L'installation comporte trois circuits indépendants n'échangeant entre eux que de la chaleur (voir Figure 1):

- Une turbine à gaz (TAG), reliée à un alternateur, assure environ 80% de la production d'électricité du site. Les gaz brûlés qui s'échappent de la TAG à environ 450°C sont brûlés une deuxième fois grâce à un faible apport de combustible. Après la post-combustion (PC), les fumées, dont la température est d'environ 600°C, réchauffent l'eau du circuit vapeur dans une chaudière de récupération, puis l'eau du réseau urbain. Enfin elles sont rejetées à l'atmosphère, à environ 150°C, à travers la cheminée.

- *Un circuit à vapeur* assure les 20% restants de la production électrique. L'eau est chauffée, transformée en vapeur, puis surchauffée dans la chaudière de récupération par les fumées d'échappement de la TAG. Une désurchauffe est effectuée au milieu du surchauffeur afin de réguler la température de la vapeur à l'entrée de la turbine. Elle est ensuite détendue dans une turbine à vapeur (TAV) reliée à un alternateur. Dans le condenseur, traversé à la fois par le circuit vapeur et par le réseau urbain, la vapeur se condense en réchauffant ce dernier. Enfin, l'eau liquide est dirigée vers la bache alimentaire, et pompée vers la chaudière de récupération.
- *Le réseau urbain* est parcouru par de l'eau chaude liquide sous pression. Elle revient à la centrale à sa température minimale; elle est alors réchauffée dans le condenseur, où elle joue le rôle de source froide. Une partie de cette eau est réchauffée dans la chaudière de récupération, dans un échangeur appelé "épingle". Le débit dans l'épingle est limité. Si les apports thermiques du condenseur et de l'épingle ne couvrent pas les besoins du réseau, le complément est assuré par des chaudières en dérivation.

Dans cet exemple, on modélisera l'ensemble des trois circuits et de leurs interactions thermiques via des échangeurs. On déterminera le bilan énergétique de la centrale, ainsi que les différents rendements de l'installation de cogénération: rendements mécanique (ou électrique), thermique, global, et rapport chaleur-force, dans différents cas de fonctionnement

## ***1.2. Les cas de fonctionnement***

La centrale doit s'adapter aux besoins du réseau de chauffage urbain: elle doit fournir au circuit d'eau chaude la puissance thermique qui est dissipée par la ville. Cette puissance dépend des conditions climatiques, et, en moyenne, de la température extérieure ; les besoins en chaleur du réseau en fonction de la température extérieure sont donnés dans le tableau suivant :

<b>T extérieure (°C)</b>	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
<b>P à fournir (MW)</b>	61,1	58,6	56,2	53,8	51,4	49,0	46,6	44,2	41,7	39,3	36,3
<b>Débit réseau (t/h)</b>	1372	1318	1264	1210	1155	1128	1128	1128	1128	1128	1128
<b>T retour réseau (°C)</b>	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
<b>T départ réseau (°C)</b>	130	130	130	130	130	129	127	125	123	121	119

La centrale peut fournir de la chaleur au circuit d'eau chaude par trois moyens: via le condenseur du circuit vapeur, l'épingle, et les chaudières en dérivation. Le débit maximal dans le circuit à vapeur ; est de 70 tonnes/heure. Pour de faibles besoins en chaleur, on n'utilise pas les chaudières, et on fait circuler un débit de vapeur plus faible. Celle-ci nécessite donc un apport de chaleur moins important au niveau de la chaudière de récupération (la vapeur doit toujours attaquer la turbine à la même température de 485°C.). Pour cela, on module la température des fumées en jouant sur le débit de combustible pour la post-combustion (la TAG fonctionnant toujours sensiblement au même régime, on ne peut modifier ni le débit des gaz d'échappement ni leur température). Le chauffage direct de l'eau du circuit urbain dans l'épingle est donc aussi moins important. Plus les besoins en chaleur augmentent, plus on augmente le débit du circuit vapeur, et le débit de combustible pour la post-combustion, jusqu'à atteindre le débit maximal de 70 t/h dans le circuit vapeur. Lorsque les besoins thermiques du réseau urbain ne peuvent plus être assurés par le condenseur et l'épingle, on allume les chaudières.

Deux cas de fonctionnement et leur cas limite peuvent donc être distingués:

**Besoins en chaleur très importants  $T_{\text{ext}} < T_{\text{lim}}$  :**

Le débit dans le circuit vapeur est maximal, soit 70 t/h. La post-combustion est au maximum. L'énergie thermique dispensée dans le condenseur et dans l'épingle est maximale. Les chaudières sont en marche et fournissent l'appoint nécessaire.

**Besoins en chaleur moins importants  $T_{\text{ext}} > T_{\text{lim}}$  :**

Les chaudières sont éteintes. L'énergie thermique dispensée par le condenseur et dans l'épingle n'est pas maximale. Le débit dans le circuit vapeur est inférieur à 70 t/h, la post-combustion n'est pas au maximum.

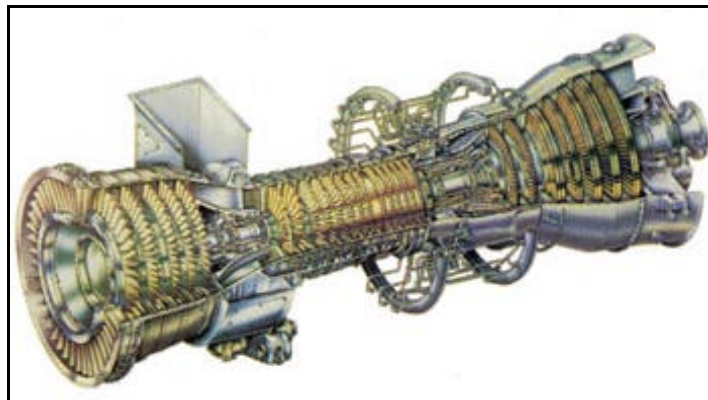
**Le cas limite** correspond à une post-combustion au maximum et un débit de vapeur de 70 t/h. La puissance thermique au condenseur est alors de 43,9 MW, et dans l'épingle, de 7,4 MW. La puissance totale récupérable par le circuit d'eau chaude est donc de 51,3 MW. Cela correspond à peu près à  $T = T_{\text{lim}} = -1^{\circ}\text{C}$ .

On commencera par modéliser le cas limite à  $-1^{\circ}\text{C}$ , à partir de points de fonctionnements donnés par l'exploitant de la centrale et les constructeurs des différents éléments des circuits. Puis on adaptera le modèle pour le cas où les besoins sont plus importants ( $T < -1^{\circ}\text{C}$ ) et pour le cas où ils le sont moins ( $T > -1^{\circ}\text{C}$ ).

***1.3. Points de fonctionnement***

L'exploitant de la centrale et les constructeurs des différentes machines donnent les points de fonctionnement suivant :

**Turbine à gaz**



**Figure 2 : turbine à gaz LM6000**

La turbine à gaz utilisée dans l'installation est une LM6000 fabriquée par General Electric. Elle se compose d'un compresseur qui compresse l'air ambiant, d'une chambre de combustion qui brûle le combustible (ici du gaz naturel) avec l'air, puis d'une turbine de détente. Les données constructeur stipulent, pour un air extérieur à  $-1^{\circ}\text{C}$  :

<b>Puissance mécanique</b>	47,5 MW
<b>Efficacité</b>	42 %
<b>Température des gaz d'échappement</b>	448 °C
<b>Débit des gaz d'échappement</b>	129,7 kg/s
<b>Rapport de compression</b>	29,6

Le combustible utilisé par la centrale est du gaz naturel de Fos à 45 bars et environ 10°C, dont GDF donne la composition moyenne:

CH <sub>4</sub>	91,2 %
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6,5 %
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,1 %
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,2 %
N <sub>2</sub>	1,0 %

### Chaudière de récupération avec Post-combustion

La chaudière de récupération se compose d'un premier bloc où les gaz d'échappement de la turbine arrivent dans la chaudière et sont rebrûlés avec du combustible neuf si la post-combustion fonctionne (dans les cas qui nous intéressent, la post-combustion est toujours en fonctionnement), puis de 5 blocs d'échangeurs. (voir Figure 1). Les 4 premiers blocs sont des échangeurs avec le circuit vapeur. Le premier est un surchauffeur haute température (SHT), le deuxième un surchauffeur basse température (SBT). Le bloc de surchauffe de la vapeur est séparé en deux car une désurchauffe est effectuée entre les deux pour contrôler la température de la vapeur en sortie de chaudière, qui doit être strictement égale à 485°C pour obtenir le meilleur rendement sur la TAV. Les deux blocs suivants sont le vaporiseur (VAP) et l'économiseur (ECO). Le cinquième bloc d'échange est "l'épingle", parcourue directement par l'eau liquide sous pression du réseau de chauffage urbain.

Le bureau d'études donne le point de fonctionnement suivant, pour un débit dans le circuit vapeur maximal (70 t/h), et la post-combustion au maximum :

#### Fumées

P = 1 bar (rejet à l'atmosphère)

Débit en sortie TAG	129,7 kg/s
Température post-combustion	591°C
Température fumées entrée SHT	591°C
Température fumées sortie SHT	567°C
Température fumées sortie SBT	490°C
Température fumées sortie VAP	287°C
Température fumées sortie ECO	204°C
Température fumées sortie épingle	147°C

#### Eau / Vapeur

Débit de vapeur	70 t/h	
Débit dans la veine de désurchauffe	4,3 t/h	
Température vapeur sortie SHT	485°C	57 bars
Température vapeur entrée SHT	423°C	59 bars
Température vapeur sortie SBT	495°C	59 bars
Température vapeur entrée SBT	279°C	62,5 bars
Température eau entrée VAP	265°C	62,5 bars
Température eau entrée ECO	125°C	62,5 bars

#### Circuit de chauffage urbain

Pression	20 bars
Température eau entrée épingle	120°C
Température eau sortie épingle	145,5°C

## **Circuit à vapeur**

Dans la bête alimentaire, l'eau est maintenue à 2,5 bars et 125°C. Elle est compressée à 62,5 bars par la pompe alimentaire. La majeure partie de l'eau est transformée en vapeur dans la chaudière de récupération, mais un prélèvement de 4,3 t/h est effectué à ce niveau pour la désurchauffe. Il est mélangé à la vapeur en sortie du SBT. La vapeur produite par la chaudière est à 485°C et 57 bars. Elle est détendue dans la TAV, puis condensée à 2,5 bars ( $T_{\text{sat}} = 127,5^{\circ}\text{C}$ ), et refroidie à 125°C dans le condenseur.

L'exploitant donne la température de sortie de la turbine à vapeur en fonction du débit : pour 70 t/h de vapeur à 485°C et 57 bars en entrée, la température de la vapeur en sortie est de 160°C.

## **Circuit d'eau chaude**

Dans le cas de fonctionnement limite à  $T_{\text{ext}} = -1^{\circ}\text{C}$ , le débit du réseau de chauffage urbain est de 1 155 t/h, la température de retour du réseau est de 90°C et la température de sortie doit être de 130°C. Le débit dans les chaudières est nul puisque celles-ci sont à l'arrêt, le débit dans l'épingle est de 270 t/h, qui est le débit maximal supporté par l'épingle. La pression de l'eau est de 20 bars.

## II. Modélisation sous ThermoOptim

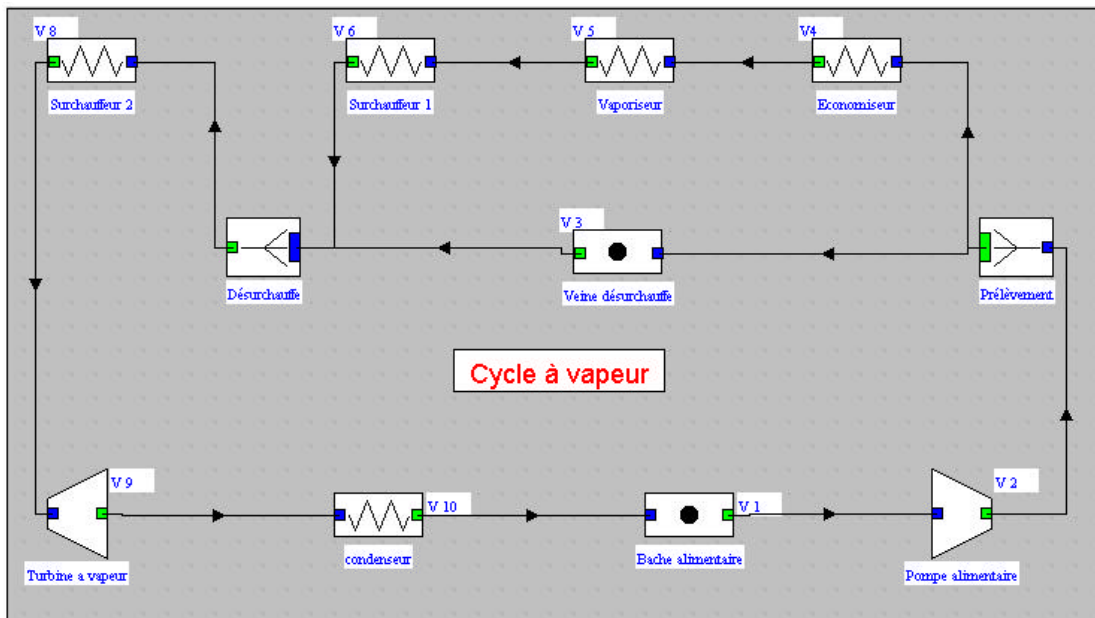
Nous allons maintenant modéliser l'installation sous ThermoOptim et calculer son bilan énergétique dans le cas de fonctionnement limite à  $T_{\text{ext}} = -1^{\circ}\text{C}$ .

### II.1. Création du schéma et paramétrage des points et transfos

Comme le projet à modéliser est déjà d'une taille assez importante, nous allons créer les schémas, paramétrer et tester l'une après l'autre les différentes parties de l'installation. Ouvrez un nouveau projet, donnez-lui un nom, et sauvez-le après chaque étape, ainsi que le schéma. Les schémas complets sont donnés à la fin de cette partie.

#### Cycle à vapeur

Le cycle à vapeur est un cycle à vapeur classique, à l'exception de la veine de désurchauffe, prélevée avant la chaudière de récupération et mélangée à la vapeur entre le surchauffeur basse température et le surchauffeur haute température.



⌋ Dans l'éditeur de schéma de ThermoOptim, créez les différentes transformations du cycle à vapeur et reliez-les. Puis paramétrez le cycle grâce aux données fournies<sup>1</sup>.

#### Remarques:

On a matérialisé la bache alimentaire par une transfo-point, qui n'est pas indispensable mais améliore la lisibilité du schéma.

Par contre, la transfo-point "Veine de désurchauffe" insérée entre le diviseur "Prélèvement" et le mélangeur "Désurchauffe" est obligatoire car ThermoOptim ne peut pas connecter directement deux nœuds.

Lorsque vous créez la transfo "Surchauffeur 2", rééditez ses propriétés (sélectionnez le composant dans l'éditeur de schémas, puis touche F4) ; un onglet "Point d'entrée" apparaît, donnez un nom (V 7 par exemple) au point d'entrée et indiquez le corps. Cette opération est nécessaire car "Surchauffeur 2"

<sup>1</sup> Si vous ne savez pas comment faire, reportez-vous à l'exemple détaillé dans la notice de prise en main "Cycle à vapeur simple".



est reliée en entrée à un mélangeur, qui ne correspond pas à un point de sortie défini. Même remarque pour la transfo "Economiseur", nommez le point d'entrée V 2 bis.

Une fois le schéma créé dans l'éditeur de schémas, transférez les éléments du schéma dans le simulateur grâce à l'"Interface Schéma/Simulateur" du menu "Spécial". Paramétrez et calculez les transfos :

- *Transfo-point Bâche alimentaire* : réglez  $P = 2,5$  bars,  $T = 125^{\circ}\text{C}$  pour le point V 1, et imposez dans la transfo-point une valeur du débit à  $19,4$  kg/s ( $=70$  t/h.). Calculez et sauvez.
- *Pompe alimentaire* : réglez  $P = 62,5$  bars pour le point aval. Comme on ne connaît pas le rendement isentropique pour la pompe, laissez-le à 1 ; l'énergie fournie par la pompe est de toute façon très faible devant les énergies mises en jeu pour le chauffage de l'eau et au cours de la détente dans la TAV. Choisissez "type d'énergie = payante", car la pompe est alimentée par de l'électricité achetée. Calculez et sauvez. La température s'élève de moins de  $1^{\circ}\text{C}$ .
- *Nœud Prélèvement* : réglez les débits; sélectionnez la branche "Veine de désurchauffe", puis cliquez sur "paramétrage du débit". Une fenêtre demande le facteur de débit, c'est à dire le débit relatif (entre 0 et 1) dans la branche. Entrez la valeur  $4,3 / 70 = 0,061$ . Pour la branche principale, entrez la valeur  $1 - 0,061 = 0,939$ . Calculez et sauvez.
- *Veine de désurchauffe* : réglez la pression du point V 3 à  $62,5$  bars.

Pour toutes les transfos échange de la chaudière de récupération, choisissez pour l'instant "type d'énergie = payante" afin de calculer le bilan du cycle vapeur seul.

- *Economiseur* : réglez la pression des points amont et aval à  $62,5$  bars (pas de pertes de charge dans cet échangeur), et la température du point aval à  $265^{\circ}\text{C}$ . Calculez et sauvez.
- *Vaporiseur* : Réglez la pression du point aval à  $62,5$  bars, et la température à  $279^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{sat}} = 278,2^{\circ}\text{C}$ ).
- *Surchauffeur 1* : réglez pour le point aval  $P = 59$  bars (pertes de charge),  $T = 495^{\circ}\text{C}$ .
- *Mélangeur Désurchauffe* : Calculez et sauvez. La température du mélange est de  $421,6^{\circ}\text{C}$ , ce qui correspond à moins de  $1,5^{\circ}\text{C}$  à la température donnée par le bureau d'études.
- *Surchauffeur 2* : réglez pour le point aval  $P = 57$  bars (pertes de charge),  $T = 485^{\circ}\text{C}$ .
- *Turbine à vapeur* : on connaît la température de sortie turbine mais pas le rendement. Réglez le point aval à  $P = 2,5$  bars,  $T = 160^{\circ}\text{C}$ . Choisissez une détente polytropique, car la turbine comporte plusieurs étages de détente. Enfin, calculez le rendement et le travail fourni en sélectionnant le mode de calcul " Calculez le rendement, le point aval étant connu". On trouve un rendement égal à environ  $0,75$ . Choisissez "type d'énergie = utile".
- *Condenseur* : réglez le point aval à  $P = 2,5$  bars et  $T = 125^{\circ}\text{C}$ . ( $T_{\text{sat}} = 127,4^{\circ}\text{C}$ ). Calculez et sauvez. On retrouve la valeur annoncée plus haut : la puissance thermique maximale récupérable au condenseur est de  $43,9$  MW.

Le cycle à vapeur est maintenant calculé. Affichons son bilan :

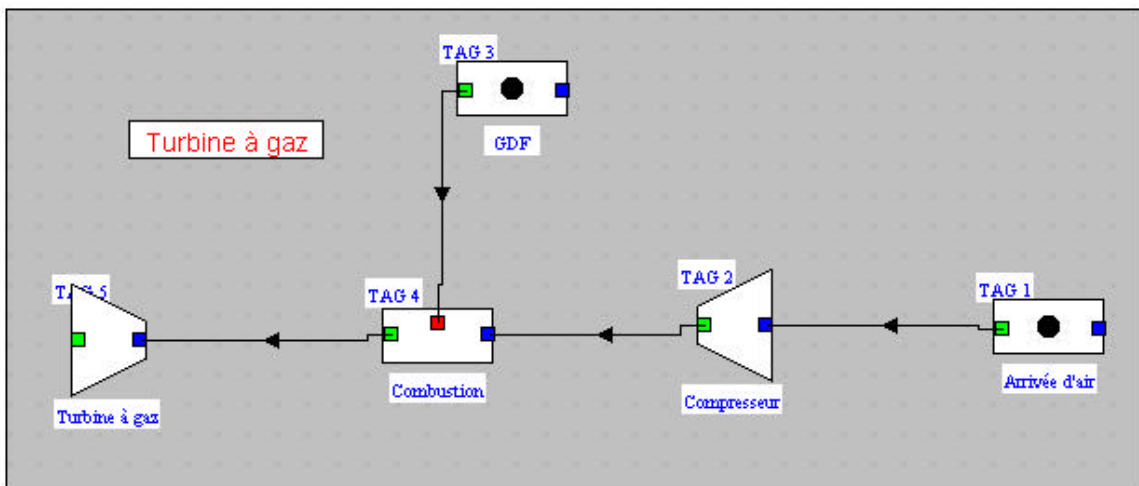
Bilan	
efficacité	0,211119
énergie utile	11 736,03
énergie payante	55 589,54

Le rendement de 21% est médiocre pour le cycle à vapeur seul, à cause de la veine de désurchauffe, mais il ne faut pas oublier que lors du fonctionnement de la centrale complète, d'une part l'énergie que

nous avons qualifiée de "payante" provient en fait de la valorisation des gaz d'échappement de la turbine à gaz (rebrûlés en post-combustion). Le "coût" énergétique réel de cette chaleur n'est donc que celui de la post-combustion. D'autre part, la chaleur dégagée par la condensation de la vapeur est valorisée puisqu'elle sert à réchauffer le circuit d'eau chaude.

## Turbine à gaz

*Dans l'éditeur de schémas de Thermoptim (au dessus du cycle à vapeur par exemple), créez le schéma représentant une TAG simple<sup>2</sup>, puis paramétrez-la pour retrouver les données fournies par le constructeur. Créez et utilisez un combustible "gaz naturel" dont la composition est celle indiquée par GDF.*



### Remarques :

Quand vous créez les transfos "Arrivée d'air" et "Compresseur", entrez le corps "air". Pour la transfo point "GDF", entrez au clavier le nom du corps "gaz naturel", que vous définirez plus tard. Après la combustion, entrez le corps "gaz d'échappement", qui sera déterminé par la combustion.

Transférez les éléments du schéma dans le simulateur grâce à l'"Interface Schéma/Simulateur" du menu "Spécial".

Commencez par créer le gaz combustible : ouvrez l'écran du point TAG 3, puis cliquez sur le bouton "afficher" à côté du champ du corps "gaz naturel".

point : TAG 3

corps : gaz naturel afficher

Composition du gaz gaz naturel

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
CH4 : méthane	0,912	0,9376373
C2H6 : éthane	0,065	0,1119997
C3H8 : propane	0,011	0,02776988
C4H10 : n-butane	0,002	0,006665185
N2	0,01	0,01803792

Une fenêtre "Composition du gaz gaz naturel" s'ouvre. En double-cliquant sur les lignes dans la colonne du nom du composant, vous pouvez faire apparaître la liste des gaz purs disponibles. Entrez alors la fraction molaire (entre 0 et 1) de chaque gaz pur pour créer le gaz composé. Validez la

<sup>2</sup> Si vous ne savez pas comment faire, reportez-vous à l'exemple détaillé dans la notice de prise en main "Turbine à gaz simple".

composition en enregistrant le gaz. La somme des fractions molaires doit impérativement être égale à 1.

Paramétrez maintenant les transfos en ayant pour objectif de retrouver les données constructeur :

<b>Puissance mécanique</b>	46 MW
<b>Efficacité</b>	42 %
<b>Température des gaz d'échappement</b>	448 °C
<b>Débit des gaz d'échappement</b>	129,7 kg/s
<b>Rapport de compression</b>	29,6

Le paramétrage n'est pas aussi immédiat que pour le cycle à vapeur, car il faut tâtonner pour trouver les paramètres qui permettent de retrouver ces données. Un ensemble possible de paramètres de réglage est :

- le rapport de compression et de détente pour le compresseur et la turbine. (donné explicitement)
- le rendement isentropique du compresseur (compression polytropique car compresseur étagé).
- le rendement isentropique de la turbine (détente polytropique également)
- la température de combustion dans la chambre.
- le débit d'air entrant.

On a donc 4 paramètres à régler pour retrouver 4 contraintes. Essayez de régler la TAG vous-même. Pour visualiser la puissance mécanique et l'efficacité de la TAG, réglez toutes les transfos du cycle vapeur en "type d'énergie = autre", la combustion en payante et la compression et la détente en utile.

*Solution obtenue :*

Paramètres de réglage

Débit d'air entrant :	127,5 kg/s
Rapport de compression / détente	29,6
Rendement compresseur	0,86
Température de combustion	1200°C
Rendement Turbine	0,87

Résultats :

Efficacité turbine	42,5 %
Puissance mécanique	45,9 MW
Température des gaz d'échappement	446°C
Débit des gaz d'échappement	129,71 kg/s
Débit de combustible	2,21 kg/s
Combustion	107,8 MW

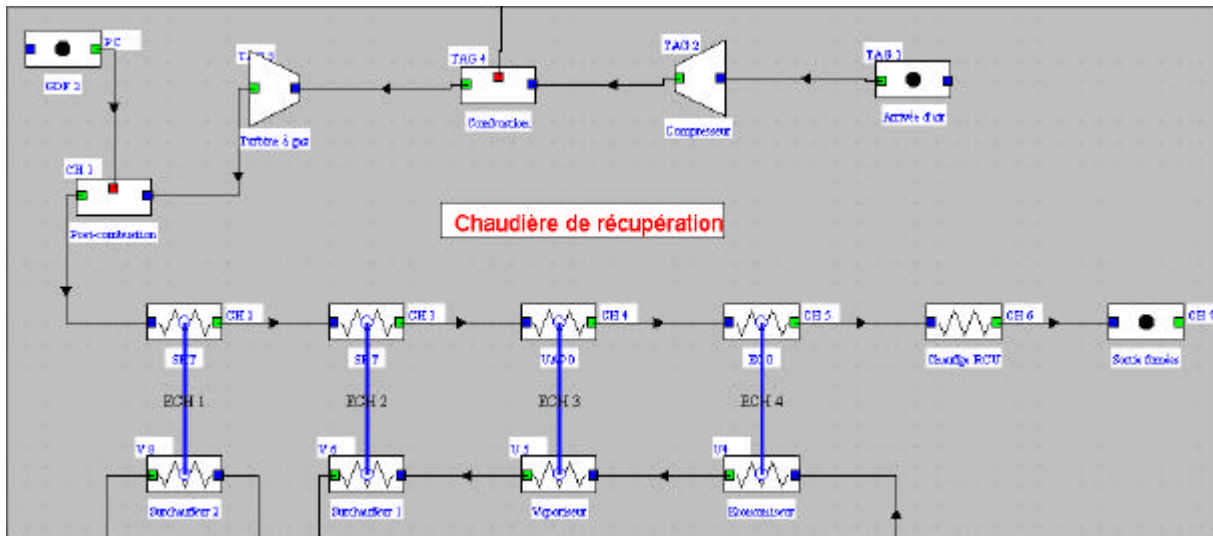
*Remarques sur la TAG*

Il faut remarquer que la modélisation que nous avons faite de la TAG est la plus simple possible, et qu'elle n'est adaptée que pour ces conditions de température et de débit. En effet, la TAG réelle a un fonctionnement complexe, en particulier, le débit d'air aspiré, et la température de sortie des gaz d'échappement varient avec la température de l'air entrant. Ces phénomènes sont dus au fait qu'une partie de l'air aspiré est utilisée pour le ventilation de la turbine.

Modéliser cet effet donnerait des résultats plus précis lorsque l'on modélise les autres cas de fonctionnement correspondant à des températures extérieures différentes, mais par souci de simplicité, nous garderons cette modélisation de turbine.

## Post-combustion et chaudière de récupération

⌋ Dans l'éditeur de schéma, représentez la post-combustion des gaz d'échappement de la TAG, puis la chaudière de récupération, à travers laquelle passent les fumées, sous forme d'une suite de transfos échange reliés à celles du cycle vapeur par des échangeurs. Paramétrez l'ensemble, dimensionnez les échangeurs et vérifiez que les températures des fumées obtenues après chaque échangeur correspondent à celles indiquées dans le point de fonctionnement.



### Remarques :

Quand vous créez la transfo "SHT", entrez le corps "fumées", qui sera déterminé par la post-combustion.

Avant de créer les échangeurs, vous devez définir le fluide froid et le fluide chaud, c'est à dire indiquer si chaque transfo échange est à variation d'enthalpie positive ou négative. Les fluides froids des échangeurs sont déjà définis, ils s'agit des fluides côté cycle à vapeur. Indiquez que les transfos échange côté fumées sont les fluides chauds en réglant la température des points aval plus basses que celles des points amont. Une fois cela fait, vous pouvez créer les échangeurs.

N'oubliez pas la cinquième transfo échange "Chauffage RCU", qui représente l'"épingle" dans laquelle est réchauffée directement le réseau de chauffage urbain.

Transférez les nouveaux éléments du schéma dans le simulateur, puis paramétrez :

- *la post-combustion* : réglez  $T_{\text{combustion}} = 591^{\circ}\text{C}$ , calculez, sauvez. On trouve que le débit de combustible est égal à 0,46 kg/s.
- *les échangeurs* : nous allons calculer la température des fumées en sortie de chaque échangeur, et les dimensionner. Ouvrez l'écran de l'échangeur ECH 1. Imposez les deux débits, les températures d'entrée et de sortie de la vapeur, ainsi que la température d'entrée des fumées. Cela fait bien 5 contraintes ; l'échangeur peut être calculé. Calculez (cliquez éventuellement plusieurs fois sur "Calculer", jusqu'à ce que les deux variations d'enthalpie soient opposées, car le calcul d'un échangeur est itératif) et sauvez. Recommencez pour les trois autres échangeurs.

**Echangeur de chaleur**

nom: ECH 1 type: contre-courant

liens: [ < ] [ > ] [ Sauver ]

[ Supprimer ] [ Fermer ]

fluide chaud: SHT [ afficher ]

fluide froid: Surchauffeur 2 [ afficher ]

[ Calculer ]

Tce (°C): 591 <input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	Tfe (°C): 421,60020074 <input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé
Tcs (°C): 571,23461986 <input type="checkbox"/> imposé <input checked="" type="checkbox"/> calculé	Tfs (°C): 485 <input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé
mc: 130,16898604 <input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	mf: 19,4 <input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé
Cpc: 1,16563432	Cpf: 2,43829027
DHc: -2 998,99	DHf: 2 998,99
<input checked="" type="checkbox"/> non contraint	UA: 23,69505256 <input checked="" type="checkbox"/> dimensionnement
<input type="checkbox"/> pincement minimum DTmin: 0	R: 0,311757772 <input type="checkbox"/> non nominal
<input type="checkbox"/> efficacité imposée epsilon: 0,37426136	NUT: 0,500922502
	DTML: 126,56608349

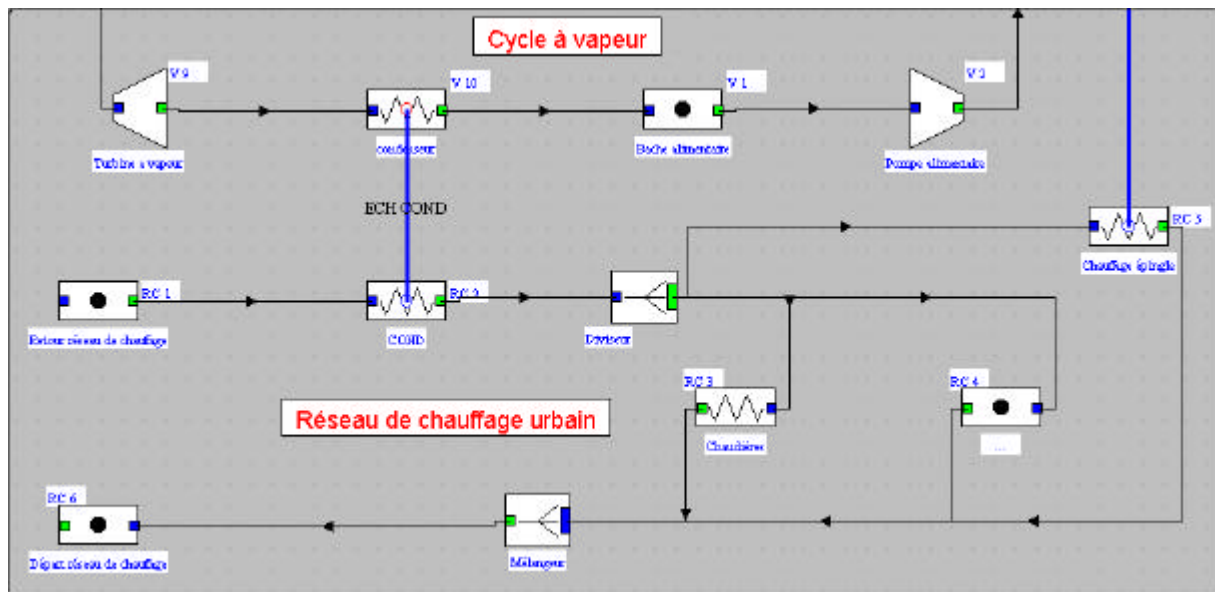
On trouve les températures suivantes :

CH 1 591°C  
 CH 2 571°C  
 CH 3 495°C  
 CH 4 292°C  
 CH 5 210°C

La valeur donnée pour CH 5 par le bureau d'études est de 204°C. L'écart est de 6°C par rapport à une chute de température de 380°C, soit 1,5%.

### Réseau de chauffage urbain

Représentez enfin, dans l'éditeur de schéma, le réseau d'eau chaude sous pression du chauffage urbain. Faites figurer la chaudière en dérivation, même si le débit y est nul dans le cas que l'on modélise pour l'instant, ainsi que l'épingle, qui passe dans la chaudière de récupération.



Remarques :

L'échangeur de "chauffage épingle" relie cette transformation à la 5<sup>ème</sup> transfo échange de la chaudière de récupération, "Chauffage RCU".

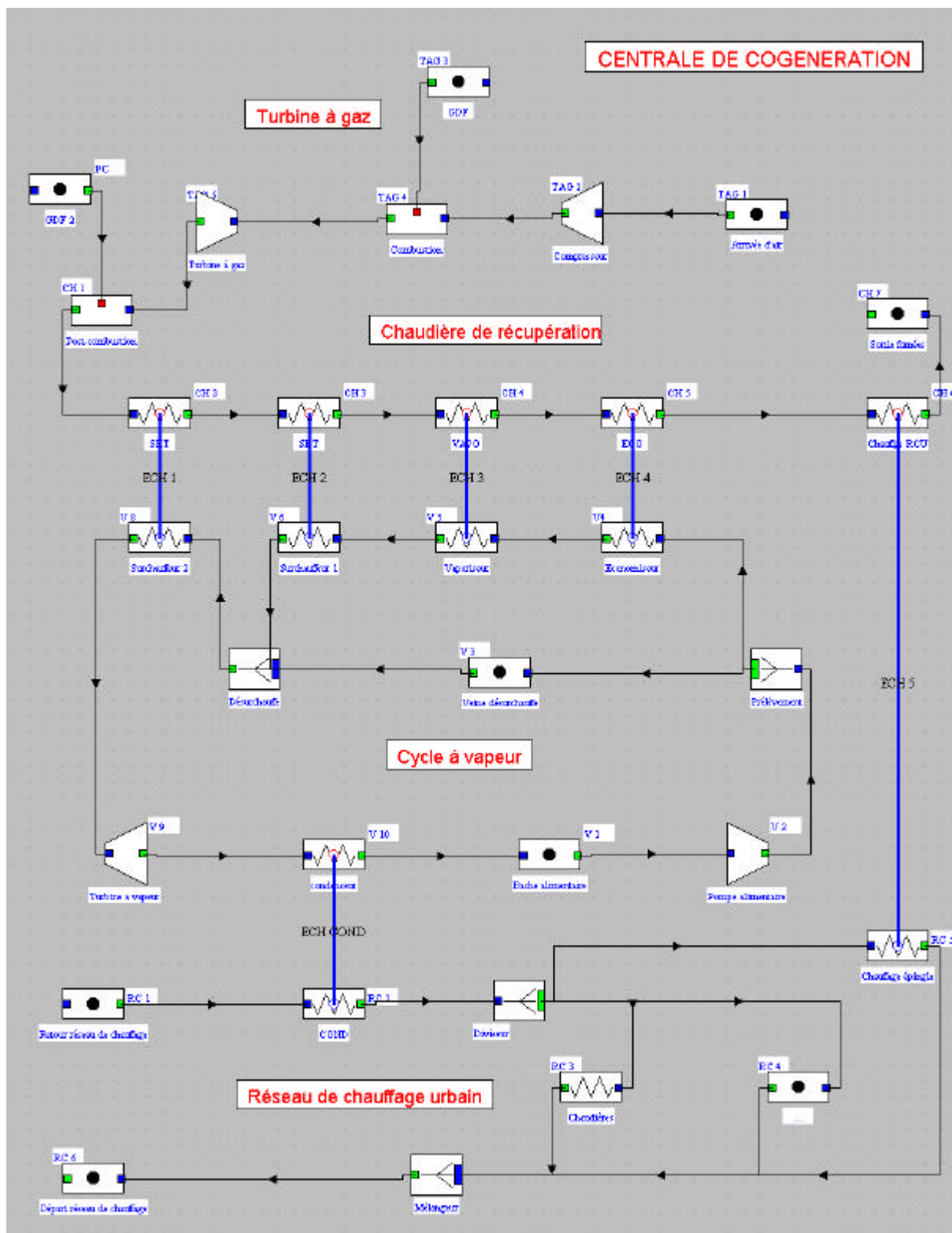
Indiquez le corps (eau) de la transfo-point RC 6 car elle est située en aval d'un mélangeur.

Transférez les nouveaux (et derniers) éléments du schéma dans le simulateur, et paramétrez :

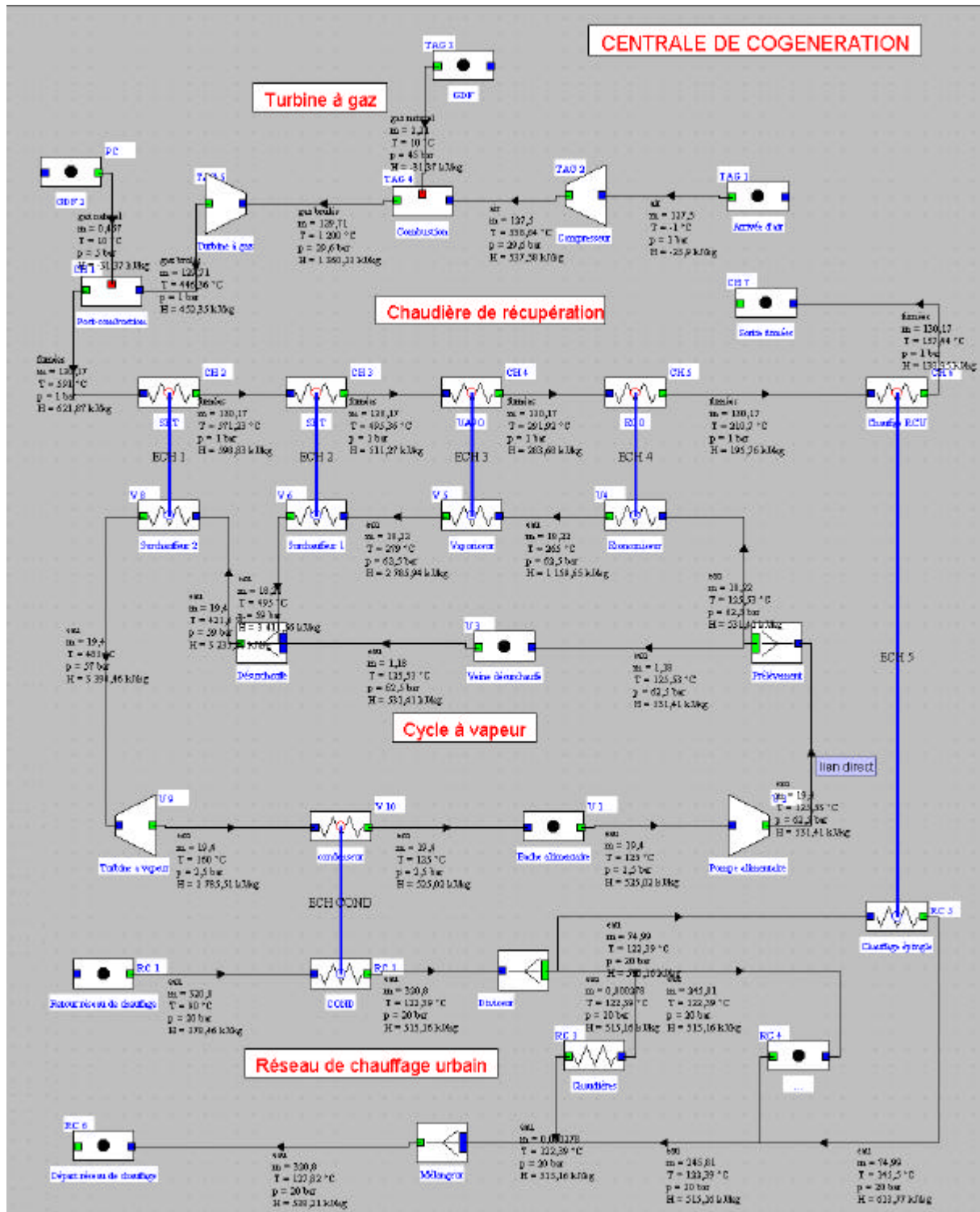
- *Retour réseau de chauffage* :  $P = 20$  bar,  $T = 90^\circ\text{C}$ , débit imposé à  $320,8$  kg/s (= 1155 t/h).
- *COND* : pré-réglez le point aval à 20 bars, et une température provisoire supérieure à  $90^\circ\text{C}$ , pour indiquer à ThermoOptim que COND est le fluide froid de l'échangeur. Ouvrez l'écran de l'échangeur, imposez les deux températures d'entrée et débits, et la température de sortie du condenseur. Calculez l'échangeur, on trouve  $T_{RC2} = 122,4^\circ\text{C}$ .
- *Diviseur* : réglez les débits relatifs des trois branches : chaudière : 0,01 (on ne peut pas mettre 0), Chauffage épingle : 270, et la dernière branche :  $1155 - 270 = 885$ . Calculez, sauvez.
- *Chauffage épingle* : Réglez le point aval à  $145,5^\circ\text{C}$ , puis procédez comme pour COND, pour trouver la température de sortie des fumées. On trouve  $157^\circ\text{C}$ .
- *Chaudière et 3<sup>ème</sup> branche* : réglez PRC 3 et PRC 4 à 20 bars. Réglez  $\Delta H = 0$ .
- *Mélangeur* : éditez d'abord la veine principale (transfo-point Départ réseau) et réglez sa pression à 20 bars. Puis revenez à l'écran du mélangeur, faites "calculer" et sauvez. On trouve  $T_{\text{départ\_réseau}} = 127,82^\circ\text{C}$ .

Deux pages suivantes : le schéma complet de l'installation, et le schéma avec les valeurs affichées.





# CENTRALE DE COGENERATION





## II.2. Bilan énergétique

Comme une installation de cogénération produit à la fois de la chaleur et de l'électricité, pour pouvoir qualifier ses performances, on introduit plusieurs rendements et indicateurs :

- le rendement mécanique : 
$$h_m = \frac{t}{Q_c}$$

où  $t$  est le travail mécanique fourni par les turbines et  $Q_c$  la chaleur fournie à l'installation de cogénération par la combustion et la post-combustion.

- le rendement global : 
$$h_g = \frac{t + Q_u}{Q_c}$$

où  $Q_u$  est la chaleur utile, récupérée par le circuit d'eau chaude au niveau du condenseur et de l'épingle.

- le rapport chaleur-force : 
$$CF = \frac{Q_u}{t}$$

On peut calculer ces différents rendements dans le simulateur de ThermoOptim. Choisissez la combustion et la post-combustion comme énergies payantes, et la turbine et le compresseur de la TAG, ainsi que la TAV, comme énergies utiles, pour obtenir le **rendement mécanique** :

Bilan	
efficacité	0,442868
énergie utile	57 641,57
énergie payante	130 155,26

Rajoutez le condenseur et le chauffage RCU en énergies utiles pour obtenir le **rendement global** :

Bilan	
efficacité	0,836615
énergie utile	108 889,87
énergie payante	130 155,26

Pour obtenir le rapport chaleur-force, vous pouvez définir le condenseur et le Chauffage RCU en énergies utiles, et la turbine et le compresseur de la TAG, ainsi que la TAV, en énergies payantes. Ces énergies n'ont pas le sens "payantes" et "utiles", mais leur rapport donne le **coefficient CF** :

Bilan	
efficacité	0,889086
énergie utile	51 248,3
énergie payante	57 641,57

Le projet modélisé étant déjà assez complexe, on peut vouloir présenter un bilan énergétique un peu plus détaillé, synthétisant les énergies mises en jeu et les différents rendements caractérisant l'installation de cogénération. Pour cela, il est possible d'exporter les résultats des calculs effectués par ThermoOptim dans un fichier lisible en mode texte ou dans un tableur ; dans le menu "Fichiers de résultats", choisissez "Exporter les résultats". ThermoOptim vous demande le nom du fichier dans lequel les résultats seront exportés ; choisissez un nom avec une extension .txt ou l'extension correspondant au tableur que vous utilisez. Ouvrez votre tableur, et chargez-y le fichier.

	A	B	C	D	E	F	G
1	LOGICIEL THERM	Copyright R. Gicquel 1999-2001					
2	EXPORTATION	June 25, 2001 5:17:19 o'clock PM CEST					
3	lang=fr						
4	Nom du projet	Centrale de cogénération					
5							
6	Bilan						
7	efficacité	énergie payar	énergie utile				
8	0.889086	57641.57	51248.3				
9							
10							
11	POINTS	32					
12	nom	nom corps	T (K)	P (bar)	titre	h (kJ/kg)	s (kJ/kg/K)
13	TAG 4	gaz brulés	1 473,15	29,6	1	1 360,127229	1,04498934
14	TAG 5	gaz brulés	719,506836	1	1	452,354356	1,173009
15	TAG 1	air	272,15	1	1	-25,8974733	0,07078668
16	TAG 2	air	811,791992	29,6	1	537,58283	0,22913992
17	TAG 3	gaz naturel	283,15	45	1	-31,3731435	-1,74389068
18	V 10	eau	398,15	2,5	0	525,022846	1,58139525
19	V 1	eau	398,14995	2,5	0	525,022633	1,58139471

Vous pouvez ensuite travailler sur ces données dans votre tableur et, par exemple, réaliser un bilan énergétique détaillé du projet :

#### **Bilan Energétique Cogénération**

<i>Transformation</i>	<i>Puissance (MW)</i>
Combustion TAG	107,9
Post-combustion	22,3
<b>TOTAL Puissance Payante</b>	<b>130,2</b>
Turbine TAG	117,7
Compresseur TAG	71,8
Puissance mécanique TAG	45,9
Puissance mécanique TAV	11,7
<b>TOTAL Puissance Mécanique</b>	<b>57,6</b>
Condenseur	43,9
Chauffage dans l'épingle	7,4
<b>Total Puissance Thermique Utile</b>	<b>51,2</b>
<b>Total Puissance Utile</b>	<b>108,9</b>
<i>Rendement Mécanique</i>	<i>44,3%</i>
<i>Rendement Global</i>	<i>83,7%</i>
<i>Rapport Chaleur-Force</i>	<i>0.89</i>

### III. Calcul des différents cas de fonctionnement

Nous allons maintenant voir comment modifier le modèle que nous avons réalisé sous Thermoptim afin de modéliser les autres cas de fonctionnement de la centrale. Par souci de simplification, on ne fera pas de modélisation de la TAG pour des températures d'air entrant différentes.

#### III.1. Besoins en chaleur très importants

Ce cas de fonctionnement est très simple à modéliser à partir du cas limite que nous avons étudié. En effet, lorsque les besoins en chaleur sont plus importants que lors du cas limite, les régimes de la post-combustion et du cycle vapeur restent maximaux, et l'appoint en chaleur supplémentaire est apporté par la chaudière en dérivation.

Il suffit donc de faire passer un débit non nul par la chaudière, et de fournir la puissance thermique manquante.

Pour connaître cette puissance manquante, on peut utiliser une astuce ; modélisons le cas où la température extérieure est de  $-5^{\circ}\text{C}$ , on a (voir tableau du paragraphe I.2) :

- débit du réseau :  $1\,372\text{ t/h} = 381\text{ kg/s}$
- $T_{\text{retour}} = 90^{\circ}\text{C}$
- $T_{\text{départ}} = 130^{\circ}\text{C}$

Paramétrez le réseau de chauffage avec ce nouveau débit (la température de retour réseau est identique), et calculez la température de départ obtenue, sans apports de la chaudière pour l'instant :

- *Retour réseau de chauffage* : réglez le débit à  $381\text{ kg/s}$ . Ne changez rien d'autre car normalement la température de retour réseau est restée égale à  $90^{\circ}\text{C}$ . Calculez et sauvez.

- *Echangeur condenseur* : pour calculer la température de l'eau en sortie de l'échangeur avec le condenseur du circuit vapeur, il faut passer par l'échangeur. Ouvrez-le. Nous allons calculer l'élévation de température de l'eau, mais pas redimensionner l'échangeur, puisque nous voulons



On trouve que l'énergie qu'il faut fournir par le biais de la chaudière est de 11 538 kW. Supprimez la transfo calcul, et paramétrez la chaudière en cochant "Imposer Delta H et modifier le point aval", et en entrant cette valeur de  $\Delta h$ . Recalculez ensuite le mélangeur en aval: on trouve la température de sortie désirée !

### *III.1. Besoins en chaleur moins importants*

Lorsque les besoins en chaleur sont moins importants que dans le cas limite à  $-1^{\circ}\text{C}$ , les chaudières sont bien sur éteintes, et le débit dans le circuit de vapeur est moins important, donc la chaleur disponible au condenseur aussi. On règle la post-combustion à un niveau moins important. Le réglage de la température de post-combustion est délicat car à tout endroit dans les échangeurs, il doit exister une différence de température d'au moins une dizaine de degrés entre le fluide chaud (les fumées) et le fluide froid (l'eau / la vapeur). Les endroits où cet écart de température est minimal localement s'appellent les pincements du système. Ces pincements peuvent se trouver aux extrémités de la chaudière, à l'entrée ou la sortie de l'épingle, ou au niveau du vaporiseur, au tout début de la vaporisation. Le pincement le plus faible contraint l'ensemble du système car il ne doit pas devenir inférieur à environ  $10^{\circ}\text{C}$ .

Si le pincement minimal se situe au niveau du vaporiseur, on a intérêt à exploiter au maximum la chaleur des fumées après le vaporiseur pour les rejeter à l'atmosphère à la température la plus basse possible. Le réchauffement du circuit d'eau se fait donc relativement plus dans l'épingle.

Par contre, si le pincement se situe au niveau du rejet des fumées, à la fin de l'épingle, on a intérêt à exploiter au maximum la chaleur des fumées avant le rejet, donc à avoir un débit dans le circuit vapeur le plus élevé possible. Le condenseur dégage plus de chaleur disponible pour le circuit d'eau ; le réchauffement de ce dernier se fait donc relativement plus dans le condenseur.

Ces considérations font percevoir qu'il est difficile d'optimiser globalement l'ensemble de la centrale, car il faut régler à la fois la température de post-combustion, le débit du circuit vapeur, la puissance récupérable à l'épingle...

Notre but sera ici plus simple: il s'agit de trouver une solution, pas forcément optimale, qui permette de fournir la chaleur nécessaire au circuit d'eau.

Modélisons par exemple le cas où la température extérieure vaut  $5^{\circ}\text{C}$ , on a (voir tableau du paragraphe I.2) :

- débit du réseau :  $1\,128\text{ t/h} = 313\text{ kg/s}$
- $T_{\text{retour}} = 90^{\circ}\text{C}$
- $T_{\text{départ}} = 125^{\circ}\text{C}$
- Besoins en chaleur =  $44,2\text{ MW}$ .

Il faut évacuer environ  $7,5\text{ MW}$  dans l'épingle pour refroidir les fumées avant leur rejet dans l'atmosphère. Il faut donc récupérer environ  $44,2 - 7,5 = \mathbf{36,7\text{ MW}}$  sur le condenseur.

Côté cycle vapeur, la vapeur pénètre dans le condenseur à  $160^{\circ}\text{C}$  et  $2,5\text{ bars}$ , et en sort sous forme liquide à  $125^{\circ}\text{C}$ . Déterminons la valeur du débit qui permette dans ces conditions de dégager  $28,8\text{ MW}$  ; Thermoptim calcule que pour  $1\text{ kg/s}$ , la puissance dégagée est de  $2260,5\text{ kW}$ . Le débit nécessaire est donc de  $36\,700/2260 = \mathbf{16,23\text{ kg/s}} \approx 58,4\text{ t/h}$ .

**Transfo Echange**

transfo:  type:

type énergie:   débit imposé   système fermé  observée

point amont:   Delta\_H:    système ouvert

T (°C):   
P (bar):   
h (kJ/kg):   
titre:

point aval:     
T (°C):   
P (bar):   
h (kJ/kg):   
titre:

pincement minimum:   fluide méthode pinct.

Calculer Delta H, le point aval étant connu  
 Imposer Delta H et modifier le point aval

- Recalculez l'ensemble du cycle vapeur en imposant ce débit. Prenez comme débit dans la veine de désurchauffe 1 kg/s. Dans le premier surchauffeur, n'allez pas jusqu'à 495°C mais seulement jusqu'à 450°C.
- calculons maintenant les températures minimales des fumées dans la chaudière de récupération: commencez par calculer l'échangeur où se situe a priori le pincement, c'est à dire le vaporiseur. Imposez un pincement de 10 K, calculez les températures d'entrée et de sortie du fluide froid. On trouve respectivement 458 et 287°C.

**Echangeur de chaleur**

nom:  type:

fluides:

Tce (°C)	<input type="text" value="458.67590645"/>	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input checked="" type="checkbox"/> calculé
Tcs (°C)	<input type="text" value="287.6722462"/>	<input type="checkbox"/> imposé <input checked="" type="checkbox"/> calculé
mc	<input type="text" value="130.168986"/>	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé
Cpc	<input type="text" value="1.11052768"/>	
DHc	<input type="text" value="-24,719.65"/>	
Tfe (°C)	<input type="text" value="265"/>	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé
Tfs (°C)	<input type="text" value="279"/>	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé
mf	<input type="text" value="15.2"/>	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé
Cpf	<input type="text" value="116.1637688"/>	
DHf	<input type="text" value="24,719.65"/>	
UA	<input type="text" value="325.91597472"/>	<input type="checkbox"/> dimensionnement
R	<input type="text" value="0.0818695926"/>	<input checked="" type="checkbox"/> non nominal
NUT	<input type="text" value="2.25459602"/>	
DTML	<input type="text" value="75.84669644"/>	

non contraint  pincement minimum DTmin:   efficacité imposée epsilon:

- Calculez maintenant de proche en proche les températures des fumées aux autres points de la chaudière de récupération: commencez par ECH 2, en imposant la température de sortie des fumées (458°C) et en calculant la température d'entrée ; puis, ECH 1, selon le même principe. Ensuite, calculez ECH 4 puis ECH 5 en imposant la température amont (287°C pour ECH 4) et en calculant la température aval. On obtient les températures de fumées suivantes :

CH 1 539°C  
 CH 2 511°C  
 CH 3 458°C  
 CH 4 287°C  
 CH 5 220°C  
 CH 6 166°C

- Pour terminer, recalculez le circuit d'eau chaude.

Ce cas de fonctionnement est décrit dans le projet Coge2.prj.

On peut comparer les bilans énergétiques obtenus à -1°C, -5°C et 2°C:

Température extérieure	-5°C	-1°C	2°C
<i>Transformation</i>	<i>Puissance (MW)</i>	<i>Puissance (MW)</i>	<i>Puissance (MW)</i>
Combustion TAG	107.9	107.9	107.9
Post-combustion	22.3	22.3	14.3
Chaudières	11.5	0	0
<b>TOTAL Puissance Payante</b>	<b>141.7</b>	<b>130.2</b>	<b>122.2</b>
Turbine TAG	117.7	117.7	117.7
Compresseur TAG	71.8	71.8	71.8
Puissance mécanique TAG	45.9	45.9	45.9
Puissance mécanique TAV	11.7	11.7	9.8
<b>TOTAL Puissance Mécanique</b>	<b>57.6</b>	<b>57.6</b>	<b>55.7</b>
Condenseur	43.9	43.9	36.7
Chauffage dans l'épingle	7.4	7.4	7.5
Chaudières	11.5	0	0
<b>TOTAL Puissance Thermique</b>	<b>62.8</b>	<b>51.3</b>	<b>44.2</b>
<b>TOTAL Puissance Utile</b>	<b>120.4</b>	<b>108.9</b>	<b>99.9</b>
Rendement mécanique	40.6%	44.2%	45.6%
Rendement global	85.0%	83.6%	81.8%
Rapport Chaleur-Force	109.0%	89.1%	79.4%