

## Etude d'une installation de cogénération : *Hôpital Jules Doiteau* :

### **Objectif du TD :**

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

### **Présentation de l'installation :**

La cogénération (cf. séance diaporama [S45](#), [S46](#), [S47](#) du portail Thermoptim\*<sup>1</sup> et fiche thématique\*<sup>2</sup>) est un procédé qui peut être utilisé pour le chauffage d'un centre hospitalier. L'électricité produite est utilisée en interne ou revendue à Edf. Ce type d'installation en milieu hospitalier peut être très utile car il peut également servir de « groupe électrogène » de secours, étant donné qu'une coupure de courant empêcherait totalement le fonctionnement d'un hôpital, et pourrait avoir de graves conséquences.

Nous nous intéressons ici à une installation particulière située en Mayenne. Voici ses caractéristiques de fonctionnement :

Site	Hôpital Jules DOITEAU
Type	Centre Hospitalier
Ville	53700 - Villaines la Juhel (FR)
Année d'installation	2004
Technologie	Moteur à gaz (μcogénération)
fabriquant	BUDERUS
Modèle	LoganoGE515
Nombre d'unité	1
Puissance électrique	65 kW
Puissance thermique	110 kW
Rendement électrique	33,0%
Rendement thermique	55,0%
Rendement global	88,0%
Type de carburant	Gaz naturel
Emission CO	<650 mg/Nm <sup>3</sup>
Emission Nox	<500 mg/Nm <sup>3</sup>

Comme il s'agit ici d'une installation de petite taille et fournissant de petites puissances, nous parlons de « micro cogénération ».

Il s'agit ici d'un moteur à gaz, 4 temps, 6 cylindres en ligne, tournant à 1500tr/min.

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

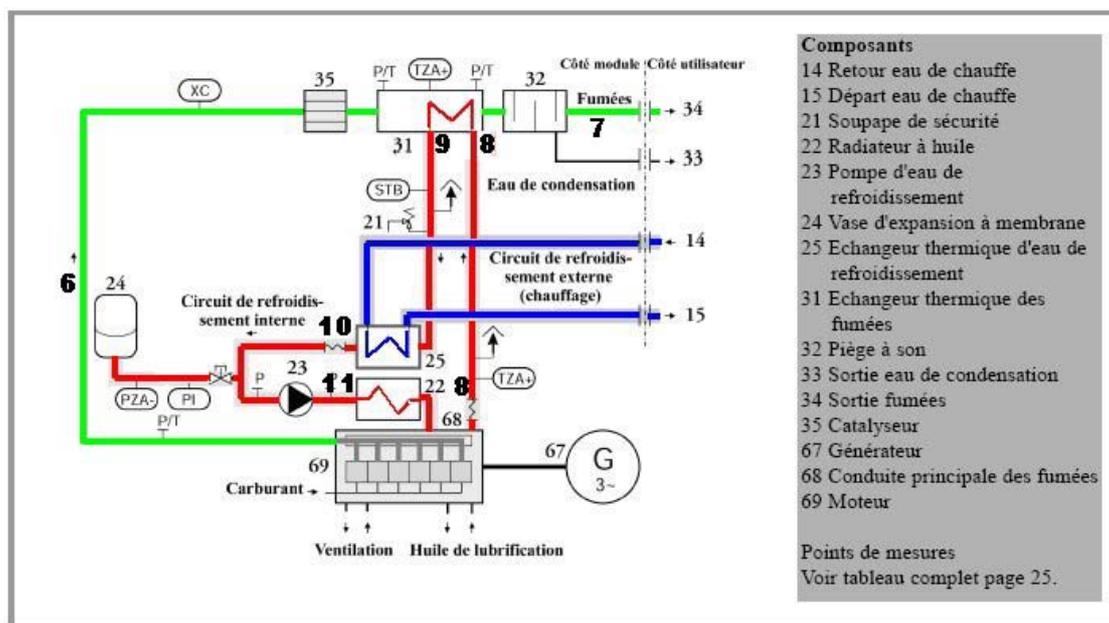
\*2 : <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cogeneration>

Autres caractéristiques nécessaires à la modélisation :

Température d'air préconisé min/max	10/25 °C
Température eau de refroidissement entrée/sortie refroidissement moteur	80/88 °C
Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur gaz de combustion	88/92 °C
Température des fumées entrée/sortie	510/120 °C
Température eau de refroidissement entrée/sortie	92/81 °C
Température eau de chauffe entrée/sortie	70/90 °C
Différence de température entrée/sortie échangeur chauffage	20 °C
Débit eau de chauffe	4,7 m <sup>3</sup> /h
Consommation moteur (gaz) PCI=10 ρ=0,72 kg/m <sup>3</sup>	19,8 Nm <sup>3</sup> /h
Débit air de combustion pour 25°C et 1 bar	180 m <sup>3</sup> /h
Débit massique des fumées	248 kg/h=>0,069 kg/s
Débit volumique eau de refroidissement	8,1 m <sup>3</sup> /h=>2,4 kg/s
Puissance calorifique refroidissement moteur	73 kW
Puissance calorifique échangeur à plaques	110 kW
Puissance calorifique échangeur gaz de combustion	37 kW
Puissance fournie au moteur	198 kW
Taux de compression	12,5

Ces caractéristiques sont celles qui nous ont été données par le constructeur (cf. *Descriptif technique de document technique de conception \_ BUDERUS / chauffage*). Sous Thermoptim, votre objectif est d'essayer de vous en rapprocher le plus possible, mais nous verrons que nous n'obtenons pas les mêmes résultats.

Le schéma global de l'installation est le suivant :



Les numéros fins sur le schéma sont ceux de la table des composants à droite, tandis que ceux en gras sont les points dont nous nous servirons pour expliquer l'installation.

#### Descriptif de l'installation :

On peut distinguer *le circuit de refroidissement interne, en rouge*, auquel est relié un vase d'expansion pour protéger les canalisations du circuit. Dans ce circuit un fluide caloporteur circule, il s'agit d'eau glycolée afin d'assurer une bonne résistance à la corrosion ainsi qu'au gel.

Ce fluide circule en circuit fermé (attention cela n'a rien à voir avec le paramétrage système ouvert / système fermé dans Thermoptim) :

- Une pompe permet la circulation du fluide et rétablit la pression étant donné les pertes de charges. (11)
- Le fluide arrive dans le moteur à température relativement faible T11, et passe dans celui-ci pour le refroidir (on peut supposer le refroidissement du circuit d'huile ainsi que le refroidissement du bloc moteur lui-même, i.e. les cylindres ; les notices de l'installation donne un seul bloc en indiquant qu'il s'agit et du bloc moteur, et de l'huile de lubrification).

Ce faisant, il se réchauffe et ressort du moteur à une température plus élevée T8. (Ceci sera modélisé par un thermocouple, partant du moteur vers un module d'échange présent sur le circuit de refroidissement).

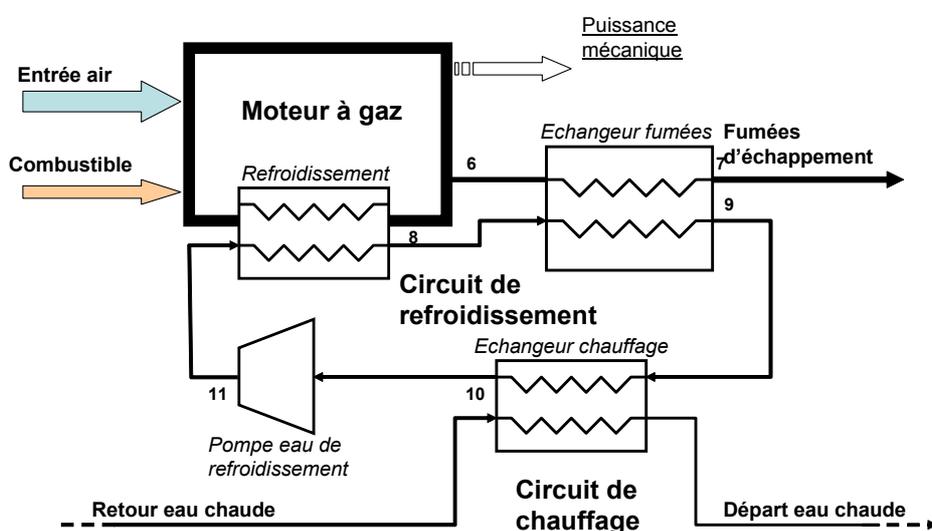
- Les gaz d'échappement du moteur (*en vert*) ressortent à des températures élevées (6). L'idée est de pouvoir réutiliser cette chaleur pour réchauffer notre fluide de refroidissement interne. Le fluide de refroidissement interne passe alors dans un second échangeur où il sera encore chauffé. Les fumées repartent ainsi plus froide (7), alors que notre eau glycolée ressort plus chaude (9).

○ Le fluide passe ensuite dans un second échangeur, où il échangera la chaleur qu'il a acquis à l'intérieur du moteur et au contact des gaz d'échappement avec un fluide plus froid, circulant dans un *circuit de refroidissement externe (en bleu)* étant, dans notre cas, un circuit de chauffage. Nous devons ainsi accomplir une boucle et en arrivant au point 10, nous devons avoir T10~T11. Les pertes de charges sont ensuite compensées par une pompe.

Le moteur est modélisé par un bloc moteur, nous verrons par la suite une manière de le modéliser sous Thermoptim.

Afin de pouvoir modéliser facilement cette installation, nous allons récapituler ce que nous avons expliqué précédemment et chercher à décomposer cette installation en un schéma simple, utilisant les transformations du noyau de Thermoptim.

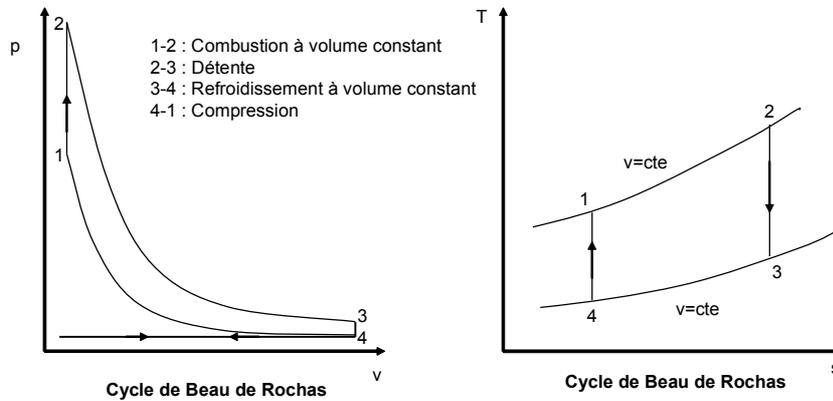
Une telle représentation peut aboutir à l'illustration ci-après :



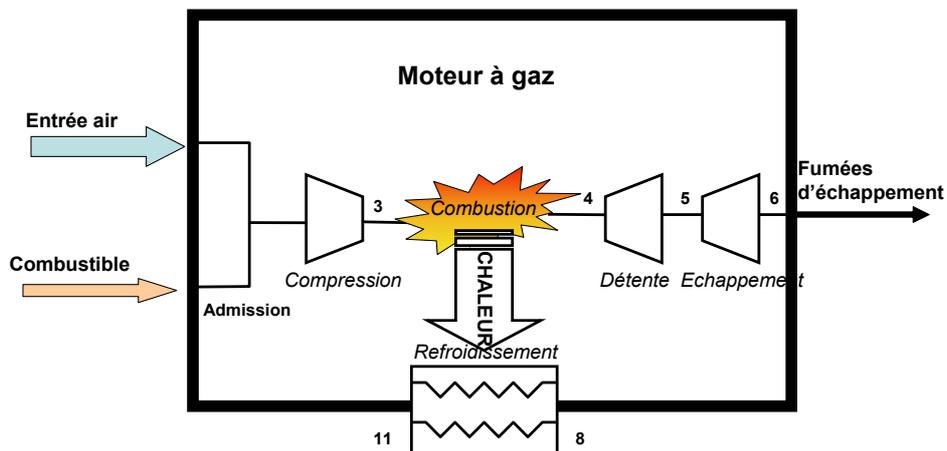
Sur ce schéma nous visualisons facilement ce que nous avons expliqué dans le [descriptif de l'installation](#). Il est alors facile de faire un modèle sous Thermoptim ; il faut en revanche encore décomposer les différentes transformations qui prennent place à l'intérieur du *Moteur à gaz*.

## Modélisation du moteur à gaz :

Pour simplifier les choses, nous pouvons supposer que le cycle du moteur à gaz est celui de Beau de Rochas (moteur essence).



Son modèle est donc composé comme indiqué sur le schéma ci-dessous :



En réalité, la modélisation du moteur est plus complexe mais cela compliquerait trop les choses (cf. module [S39](#)\*<sup>3</sup> sur le portail Thermoptim sans prise en compte des gaz recirculés).

La modélisation du moteur comme illustré sur le schéma ci-dessus équivaut à dire que le cycle moteur théorique se décompose en différentes parties : l'admission, la compression, la combustion, la détente et l'échappement des gaz brûlés. Chacune de ces phases peut être représentée par un élément de base de Thermoptim :

- un dispositif d'admission réalisant le mélange 'comburant carburant' ; l'admission du mélange correspond à deux transfo-points représentant l'entrée de l'air de combustion et l'entrée du combustible reliés par un nœud.
- une compression en système fermé,
- une combustion en système fermé à volume constant et complète, du type prémélangé (voir figure page 5 pour le paramétrage de cette transformation),
- une détente en système fermé pour la détente des gaz brûlés,

- une seconde détente en système ouvert à travers les soupapes d'échappement (car on considère que lors de l'ouverture de la soupape d'échappement, les gaz brûlés sont libérés à l'air libre, et qu'il y a donc une expansion de ces gaz brûlés ; même si cette approche est contestable, cette dernière évolution sera supposée isentropique, et le travail mis en jeu ne sera pas pris en compte).  
A la fin de cette fiche, nous regarderons comment mieux modéliser cet échappement.

### Modélisation (éditeur de schéma):

Pour modéliser le moteur, insérez les tranfos une par une dans l'éditeur de schéma, puis connectez les. Le paramétrage se fera dans un second temps.

- Pour les deux transfos points d'entrée, il faut rentrer le nom du corps, le combustible est du *gaz de Montoir* et l'air de combustion est de l'*air* (les deux sont dans *Gaz composés protégés*) ; il faut aussi entrer le débit de l'air, ainsi que celui du combustible. Il faut faire attention d'indiquer des débits convenables, vu que le mélange se fait dès l'admission. Vous pouvez partir avec l'équation stoechiométrique de combustion du gaz naturel (*gaz de Montoir*) en partant du fait que celui-ci est composé de 87% de méthane et 9% d'éthane.

Puis prendre en compte la densité du gaz par rapport à l'air qui est de 0,61.

Ainsi, on trouve que pour être dans des conditions stoechiométriques, si on a besoin de x moles d'air, on a besoin de environ  $0,061 * x$  moles de gaz.

Ceci est une approximation et bien entendu, en fonction des conditions de température et de pression, nous avons un rapport différent pour les débits massiques.

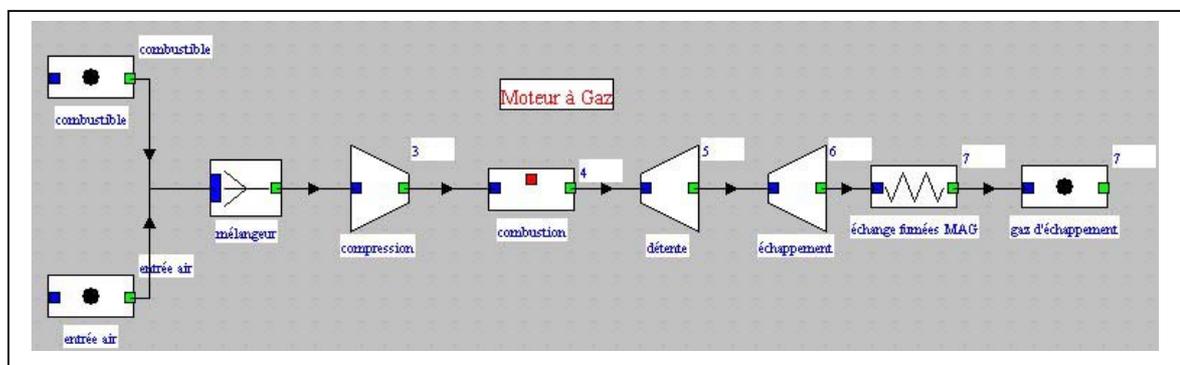
- Le mélangeur ne propage pas le nom du corps car nous avons deux corps différents en entrée, il faut donc indiquer le nom du corps ET du point en entrée et en sortie lors de la mise en place de la compression

NB : Lors de l'insertion du module compression, il nous est simplement demandé les caractéristiques du port de sortie, il faut rentrer celles-ci *nom du corps ET du point*, puis une fois le module inséré cliquer dessus et appuyer sur F4 pour pouvoir rentrer les caractéristiques du port d'entrée ; *veillez à mettre le même corps en entrée et sortie mais pas le même nom de point*.

On peut choisir le produit du mélange, *air\_gaz* dans *autres gaz composés*.

- Pour la combustion, il faut rentrer le *nom du point* et *du corps* car le corps obtenu après la combustion est différent de celui en entrée. Pour les autres composants il suffit d'indiquer le nom du point de sortie car le corps va se propager automatiquement.

Un exemple de modélisation est celui-ci :



Modélisation Thermoptim du moteur à gaz

### Paramétrage (simulateur):

Il faut ensuite paramétrer le moteur en rentrant les caractéristiques de l'installation dans les transfos et/ou les points.

La première difficulté est de trouver le débit d'air et de combustible.

En fait, nous nous rendons vite compte, qu'il est impossible d'obtenir les valeurs indiquées pour les travaux et les chaleurs échangées en prenant un débit d'air et de combustible égaux à ceux donnés.

Et ce pour la simple raison, que nous n'obtenons pas les 198 kW dans la combustion du moteur avec les renseignements fournis. Ce que nous pouvons alors faire est de caler le paramétrage des débits en fonction des 198 kW nécessaire au moteur.

Dans un premier temps, nous mettons l'air en large excès et cherchons le débit de combustible nécessaire pour avoir 198 kW. Comme nous avons un pré mélange et une compression avant la combustion, on peut soi procéder « à tâtons », en modifiant la valeur de débit du gaz pour s'approcher des 198 kW, attention le combustible apporte 198kW, cela veut dire que notre chambre de combustion doit avoir un rendement de un (l'air étant en excès, c'est bien le combustible qui va imposer la valeur).

On trouve un débit de gaz de 0,00406522392kg/s.

Une fois ceci obtenu, nous cherchons maintenant à réduire le débit d'air afin de s'approcher des conditions stoechiométriques et de diminuer l'énergie nécessaire à la compression. Ce qu'il faut faire, est de réduire le débit d'air un maximum, sans que cela n'influe sur les 198 kW fournis par le gaz. Ainsi le gaz sera toujours le réactif limitant, mais l'air ne sera qu'en très faible excès de manière à obtenir le meilleur rapport

$$\frac{\text{énergie apportée par le gaz}}{\text{énergie nécessaire pour compression}}$$

On trouve un débit d'air de 0,1 kg/s.

En calculant notre modèle avec les transfos, on s'apercevra par la suite qu'il faut encore augmenter ces valeurs. Et de même, notre combustion n'est pas parfaite et on peut inclure un taux de dissociation dans la combustion, qui nécessitera d'augmenter encore nos débits. Pour cela on se cale sur les émissions affichées de CO, et on tente de se rapprocher de cette valeur (voir la propriété des gaz à la sortie de la chambre de combustion). On s'intéressera à la dissociation dans un second temps (fin de TD), pour une première approche, nous considérerons qu'il n'y a pas dissociation.

Une fois que vous avez paramétré cette transfo, vous pouvez maintenant paramétrer les autres transfos du moteur à gaz en vous servant des caractéristiques données plus haut.

Aucune ne présente de difficulté, sinon la chambre de combustion.

Le paramétrage de la chambre de combustion est illustré sur la capture d'écran ci-dessous.

transfo: combustion type: combustion

type énergie: payante  débit imposé

point amont: 3  débit: 0,1248  système fermé  observée

T (°C): 513,95 m Δu: 161,34  système ouvert

P (bar): 34,654 W: 0

h (kJ/kg): 546,16

titre: 1

point aval: 4

combustible

prémélangé a: 0

dissociation hf0: 0

taux dissociation: 0,1

temp. figeage (°C): 1 500

rendt. combustion: 1

rendement chambre: 0,69

Calculer T

ksi: 1

T (°C): 1 767,6706501976

pression imposée  par le point amont

volume imposé  par l'utilisateur

température imposée

*Paramétrage de la combustion*

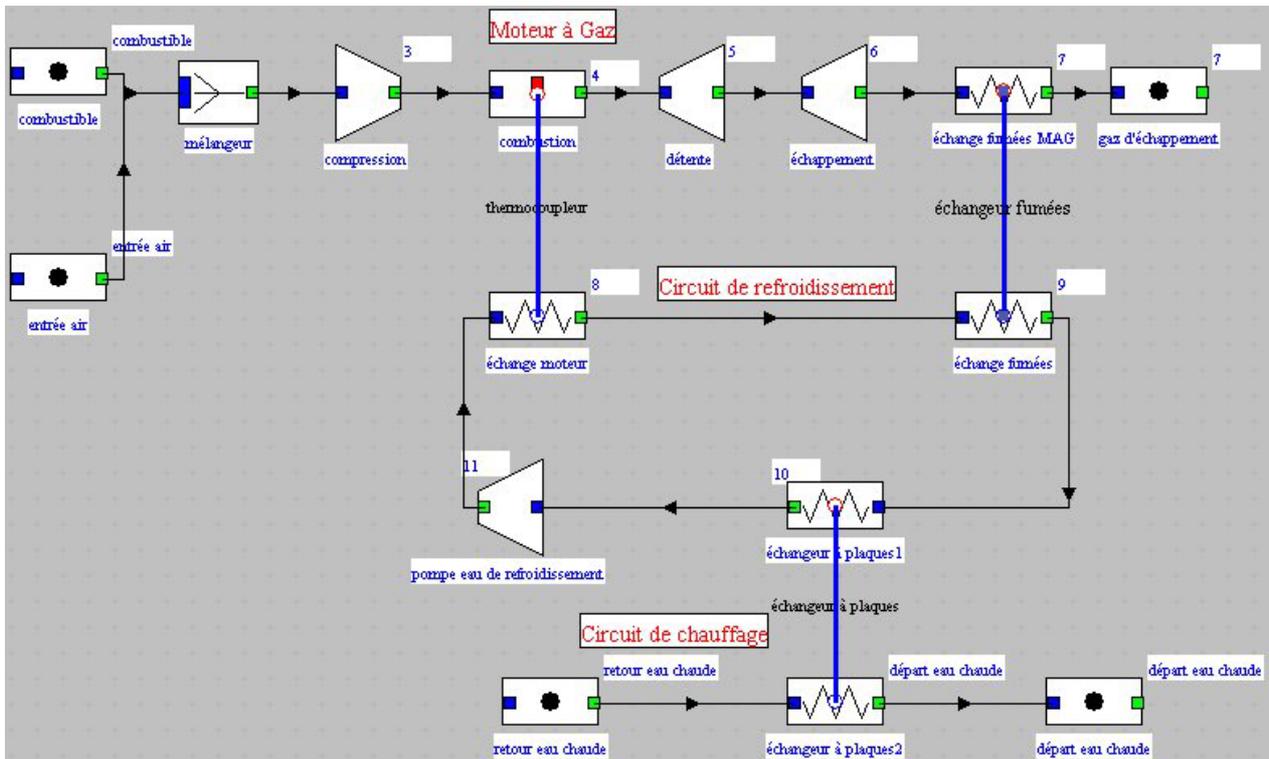
## Modélisation de l'installation complète :

### Modélisation (éditeur de schéma):

Une fois, le moteur modélisé, il ne reste plus qu'à modéliser le reste de l'installation. Nous avons ici un circuit de refroidissement et non un système direct d'échange entre le moteur à gaz et le circuit de chauffage car le moteur doit être rempli d'eau glycolée pour des raisons de protection contre la corrosion. Pour ne pas être obligé de remplir l'ensemble du système de chauffage avec ce mélange, on installe un *circuit de refroidissement interne*.

Le circuit de refroidissement est facile à modéliser, il suffit de mettre un composant et d'entrer le corps et le point de sortie, la propagation du corps est automatique, il n'y a plus qu'à indiquer les points de sortie des autres composants. Il en est de même pour le point de sortie.

Le schéma Thermoptim de l'installation modélisée est le suivant :



### Paramétrage (simulateur):

Le moteur étant déjà paramétré, il ne vous reste plus qu'à paramétrer les circuits (refroidissement interne et externe) *en gros* afin de pouvoir connecter les modules d'échanges et ainsi créer les échangeurs.

Ceci est nécessaire afin que ThermoOptim reconnaisse si il y a possibilité de créer un module d'échange (un fluide chaud qui refroidit et un fluide froid qui se réchauffe, et des températures qui ne se croisent pas).

En général, pour paramétrer 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 réels, trois variables sont imposés directement : la température d'entrée du fluide chaud (Tce), la température d'entrée du fluide froid (Tfe) et le débit du fluide chaud (mc).

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

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

Ci-dessous sont illustrés deux captures d'écran pour les échangeurs fumées et à plaques. Il s'agit de captures réalisées une fois le calage obtenu en étant assez proche des valeurs de travail, chaleur et rendement données. Pour en arriver à cela il a été utile d'imposer d'autres variables afin de stabiliser les échangeurs, puis une fois que ceux-ci s'approchent des valeurs recherchées, on peut alors se remettre dans un cas plus « réel ».

nom échangeur à plaques type contre-courant

fluide chaud échangeur à plaques afficher

fluide froid échangeur à plaques afficher Calculer

Tce (°C) 92,05165908  imposé  calculé

Tcs (°C) 80,96229633  imposé  calculé

mc 2,3  imposé  calculé

Cpc 4,20121654

m ΔHc -107,15427273

Tfe (°C) 70  imposé  calculé

Tfs (°C) 86,53872663  imposé  calculé

mf 1,54471  imposé  calculé

Cpf 4,19429029

m ΔHf 107,1537839

non contraint

pincement minimum DTmin 0

efficacité imposée epsilon 0,749999198

UA 13,51603084  dimensionnement

R 0,670508861  non nominal

NUT 2,08614135

DTML 7,92790316

Paramétrage de l'échangeur à plaques

Nous avons ici des résultats tout à fait cohérents et proche de ceux indiqués. L'efficacité de 0,75 est une valeur courante, la variation de température du fluide chaud est quasiment identique à celle recherché ; on peut d'ailleurs en conclure que ces valeurs ont été imposées dans un premier temps. La différence majeure nous vient de la température de sortie de de 86,5°C au lieu de 90°C indiqué. Pourtant nous avons 107 kW échangés, ce qui correspond à peu près aux valeurs données.

**Paramétrage de l'échangeur fumées**

Paramètre	Valeur	Statut
Tce (°C)	559,99208984	imposé
Tcs (°C)	324,23919442	calculé
mc	0,1248	imposé
Cpc	1,1742497	calculé
m ΔHc	-34,5487293	calculé
Tfe (°C)	88,47908863	calculé
Tfs (°C)	92,05165908	calculé
mf	2,3	imposé
Cpf	4,20458795	calculé
m ΔHf	34,5487293	calculé
UA	0,102007178	calculé
R	0,0151538773	calculé
NUT	0,696074443	calculé
DTML	338,68919899	calculé
epsilon	0,499992354	imposé

On remarque que l'on ne s'approche pas tout à fait des valeurs que l'on souhaiterait trouver. On ressort de l'échangeur fumées à 325°C au lieu de 120°C. La différence est considérable. Mais on peut expliquer cela de par notre modélisation assez simpliste du moteur à gaz, celle de l'échappement, et l'absence de silencieux, qui ajoute encore des pertes à notre gaz.

De même, l'efficacité de l'échangeur a été préalablement calculée avant d'être imposée, en imposant une cinquième variable qui nous était donné. On trouve 0,5, ce qui est assez faible, mais peut être compréhensible vu qu'il s'agit des gaz d'échappement et donc que nous avons un échangeur gaz/liquide.

#### Paramétrage du refroidissement moteur :

La puissance thermique correspondant au refroidissement du moteur est représentée par un thermocoupleur, qui est une généralisation d'un échangeur permettant de coupler thermiquement un composant complexe (ici la chambre de combustion) avec

une transfo-échange. Elle est égale au produit de la puissance libérée par la combustion multipliée par le complément à 1 du rendement thermique de la chambre. (Ex : si le rendement de la chambre de combustion vaut 0,7 ; 30% de l'énergie de la chambre part dans l'échangeur). Le paramétrage du thermocoupleur est très simple : vous pouvez soit sélectionner "Ts calculé" pour que ce soit la température de sortie de la transfo échange qui soit déterminée, son débit n'étant pas modifié, soit imposé la température de sortie et modifier le débit. Le principal est que vous restiez cohérent, c'est-à-dire si vous calculez le débit dans le calcul d'un échangeur, il ne faut pas qu'un autre échangeur le calcul aussi, de même pour les températures. Sinon lors de vos calculs itératifs une fois le modèle étant fini, vous obtiendrez des valeurs qui fluctuent sans cesse ; voire des impossibilités de calculs.

thermal fluid		process			
échange moteur	<input type="button" value="afficher"/>	combustion	<input type="button" value="afficher"/>	<input type="button" value="Calculer"/>	
Te	<input type="text" value="80,96525912"/>	Te	<input type="text" value="1 140,80987896"/>		
Ts	<input type="text" value="88,47908863"/>	Ts	<input type="text" value="1 140,70987896"/>	<input type="radio"/> fluide méthode pinct.	
m	<input type="text" value="2,3"/>	m	<input type="text" value="0,1248"/>	<input type="radio"/> calculé	
Cp	<input type="text" value="4,19434613"/>	Cp	<input type="text" value="5 808,11461299"/>	<input type="radio"/> calculé	
m ΔH	<input type="text" value="72,48588405"/>	m ΔH	<input type="text" value="-72,48588405"/>	pincement minimum <input type="text" value="0"/>	

*Paramétrage du thermocoupleur*

Sur cette capture d'écran, nous voyons les résultats obtenus avec notre modèle. Nous avons une variation de 81 à 88,5°C, ce qui est très satisfaisant en regard aux données de départ. De même, l'énergie transféré est de 72,5 kW au lieu de 73.

*Pour calculer votre rendement, pensez à bien spécifier les énergies utiles et payantes :*

- ✓ La chambre de combustion est payante.
- ✓ La détente et compression du moteur sont utiles (comptées algébriquement).
- ✓ L'énergie récupérée dans le module d'échange d'échappement des fumées (échange fumées 1) est utile, mais il vaut mieux la compter en mettant celle de l'échangeur à plaques utiles.
- ✓ L'énergie récupérer dans le thermocoupleur est payante car elle provient du combustible.
- ✓ L'énergie du circuit 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 1 et 2.

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

- rapport de compression (les phases de compression et détente en système fermé doivent être à rapport de compression imposé, le cycle étant du type Beau de Rochas)
- débit de combustible (qui conditionne la température de fin de combustion)
- rendements isentropiques de compression et détente
- rendement de chambre (qui conditionne la charge thermique du thermocoupleur)

- pression et débit d'eau du système de refroidissement (qui doivent être suffisants pour éviter la vaporisation de l'eau)
- efficacité des échangeurs

### **Comment paramétrer le modèle (exemple):**

Plusieurs étapes peuvent nous intéresser pour le paramétrage.

➤ Déjà, le rapport entre l'énergie transmise au fluide dans la chambre de combustion et celle cédée sous forme de chaleur au circuit de refroidissement. Cela nous donne par suite le rapport entre l'énergie mécanique du système et l'énergie du thermocoupleur. Vu que l'on connaît ces deux informations, on peut arriver à trouver approximativement le rendement de la chambre de combustion qui vaut ici environ 0,69.

➤ Puis on peut ensuite chercher des valeurs pour le débit de combustible et d'air, qui vont nous permettre d'approcher les deux valeurs évoquées ci-dessus, et aussi l'énergie qui est disponible dans l'échangeur des fumées.

➤ Le paramétrage des échangeurs et thermocoupleur est assez délicat étant donné que l'on dispose de beaucoup d'informations, et il faut faire attention à ne pas imposer trop de choses, mais plutôt à tenter de se servir de toutes ses informations pour essayer de s'en approcher, et ainsi paramétrer correctement notre modèle.

Une solution par exemple peut être d'imposer le débit par le thermocoupleur, et chercher la température de sortie. Comme on connaît la température que l'on doit trouver (ici 88°C), on peut ainsi chercher le rendement de la chambre de combustion et les débits d'air et de combustible.

Puis on peut essayer de paramétrer l'échangeur des fumées en calculant la température d'échappement des fumées à la sortie (Tcs) et la température de sortie du fluide froid (Tfs) et en faisant varier l'efficacité de l'échangeur, sachant que l'on sait que Tcs doit s'approcher de 120°C et Tfs de 92°C.

On peut enfin calculer le débit du circuit de refroidissement par l'échangeur à plaques dans un premier temps, puis de même que pour l'échangeur des fumées, calculer les deux températures de sortie et imposer l'efficacité de l'échangeur.

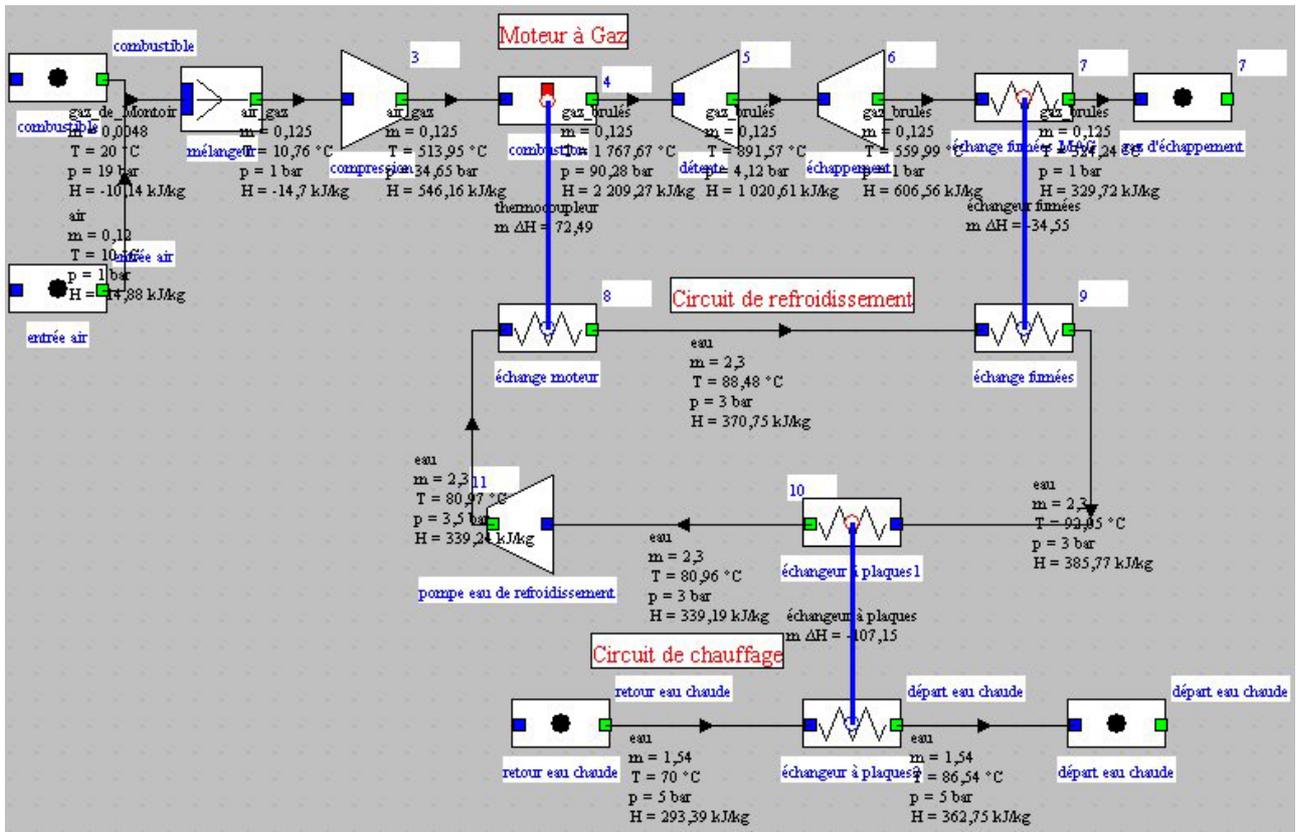
Avec ces trois échangeurs, et connaissant les quantités que l'on doit trouver, on peut essayer de s'approcher du cas réel.

Le but premier est évidemment de se rapprocher le plus possible de l'installation réelle.

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

NB : Une fois le modèle bien paramétré, il vous suffit de changer un paramètre et vous pouvez directement recalculer l'ensemble du système dans le simulateur.

Voici un exemple de paramétrage se rapprochant du cas réel :



On s'aperçoit que le débit du circuit de refroidissement ne change pas le rendement. Le débit de combustible et celui d'air, eux, ont une grande répercussion sur le rendement. Il en est de même pour le rendement de la chambre de combustion.

Voici un tableau récapitulatif des résultats :

	Données constructeur	Résultats obtenus avec notre modèle
Température d'air préconisé min/max	10/25 °C	
Température eau de refroidissement entrée/sortie refroidissement moteur	80/88 °C	81,0/88,5 °C
Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur gaz de combustion	88/92 °C	88,5/92,1 °C
Température des fumées entrée/sortie	510/120 °C	560,0/324,2 °C
Température eau de refroidissement entrée/sortie	92/81 °C	92,1/81,0 °C
Température eau de chauffe entrée/sortie	70/90 °C	70/86,5 °C
Différence de température entrée/sortie échangeur chauffage	20 °C	16,5 °C
Débit eau de chauffe	4,7 m3/h	4,7 m3/h
Consommation moteur (gaz) PCI=10 $\rho=0,72$ kg/m3	19,8 Nm3/h	0,0048 kg/s

Débit air de combustion pour 25°C et 1 bar	180 m3/h	0,12 kg/s
Débit massique des fumées	248 kg/h=>0,069 kg/s	0,125 kg/s
Débit volumique eau de refroidissement	8,1 m3/h=>2,4 kg/s	2,3 kg/s
Puissance calorifique refroidissement moteur	73 kW	72,5 kW
Puissance calorifique échangeur à plaques	110 kW	107,2 kW
Puissance calorifique échangeur gaz de combustion	37 kW	34,6 kW
Puissance fournie au moteur	198 kW	234 kW
Taux de compression	12,5	12,5
Rendement électrique	33,0%	27,6%
Rendement thermique	55,0%	45,8%
Rendement global	88,0%	73,4%

Quelques paramètres supplémentaires :

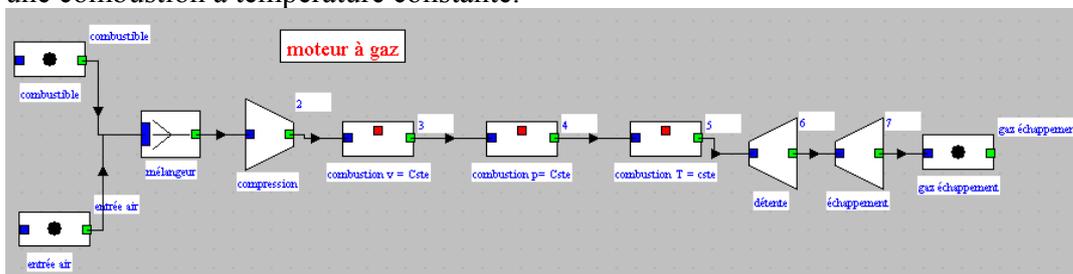
Paramètres	
efficacité échangeur fumées	0,5
efficacité échangeur à plaques	0,75
rendement chambre de combustion	0,69
rendement isentropiques détente et compression	0,85

Malgré des résultats très proches de ceux données par le constructeur, nous avons quelques différences.

Ceci peut s'expliquer par différents phénomènes :

- ❖ Nous avons pris de l'eau alors qu'en réalité nous avons de l'eau glycolée dans les circuits de refroidissement.

- ❖ Le modèle du moteur à gaz est imparfait car en réalité nous avons une combustion à volume constant alors que pour se rapprocher au mieux de la réalité nous devrions avoir une combustion à volume constant, une combustion à pression constante et une combustion à température constante.

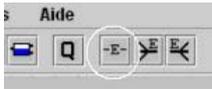


Etant donné ces imperfections, le but premier est évidemment de se rapprocher le plus possible de l'installation réelle, mais il est tout à fait normal que nous ne puissions obtenir exactement les mêmes résultats que le cas réel.

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

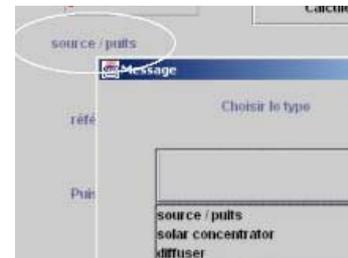
## Meilleure modélisation de l'échappement :

Dans un second temps, nous modéliserons l'échappement des gaz avec une classe externe, mieux adaptée. Pour faire apparaître une classe externe dans Thermoptim, il faut mettre le fichier java compilé dans un nouveau dossier appelé `extThopt`, puis ajouter ce dossier à l'archive `extUser.ZIP` (vous devez d'abord fermer Thermoptim, auquel cas il ne vous autorisera pas l'accès à cette archive). Quand vous serez de nouveau dans l'éditeur de schéma, insérez une classe externe,



attention une classe externe ne transmet pas nécessairement le corps, il vous faut donc indiquer le corps d'entrée ET de sortie.

Ensuite quand vous la paramétrez, la classe par défaut est *source puit*, double-cliquer sur le nom source/puits (cf. illustration ci-contre) et choisissez la transfo externe que vous voulez modéliser. Sauvez, et refermez la classe pour que Thermoptim la prenne en compte. Puis vous pouvez la rouvrir, la paramétrer et la calculer.



La transfo externe qui nous intéresse est [PistonValveExhaust.class](#), vous pouvez la télécharger à l'adresse ci-dessous\*<sup>4</sup>.

Pour toute question concernant l'utilisation, et éventuellement le codage de classes externes, reportez vous au module [S07\\_ext](#)\*<sup>5</sup> du portail Thermoptim.

\*<sup>4</sup> : [http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/modelotheque/modele-echapt\\_maci](http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/modelotheque/modele-echapt_maci)

\*<sup>5</sup> : [http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s07\\_ext-classes-externes](http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s07_ext-classes-externes)