

## Etude d'une installation de cogénération : *Hôpital maritime de Zuydcoote* :

### Objectif du TD :

L'objectif de ce TD est l'étude et la modélisation sous Thermoptim d'une installation de cogénération existante, et l'analyse de l'influence 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.

Le cas présenté ci-dessous est une installation de cogénération à l'hôpital maritime de Zuydcoote réalisé par Eneria Caterpillar. Voici ses caractéristiques de fonctionnement :

Site	Hôpital Maritime de Zuydcoote
Type	centre Hospitalier
Ville	59123- Zuydecoote (FR)
Année d'installation	-
Technologie	Moteur à gaz
fabriquant	Eneria Caterpillar
Modèle	3516B SITA HR
Nombre d'unité	1
Puissance électrique	1140 kW
Puissance thermique	1280 kW
Rendement électrique	39,8%
Rendement thermique	47,8%
Rendement global	87,5%
Type de carburant	Gaz naturel
Emission CO	650 mg/Nm <sup>3</sup>
Emission NOx	350 mg/Nm <sup>3</sup>

La technologie utilisée dans cette installation est un moteur à gaz de 1140kW fonctionnant au gaz naturel. Il fournit un débit de 60 m<sup>3</sup>/h d'eau chaude à 95°C.

#### Autres caractéristiques nécessaires à la modélisation :

	Données constructeur
Différence de température	20°C
Température eau de refroidissement entrée/sortie refroidissement moteur	79°C / 85°C
Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur gaz de combustion	85°C / 100°C
Température des fumées entrée/sortie	485°C / 110°C

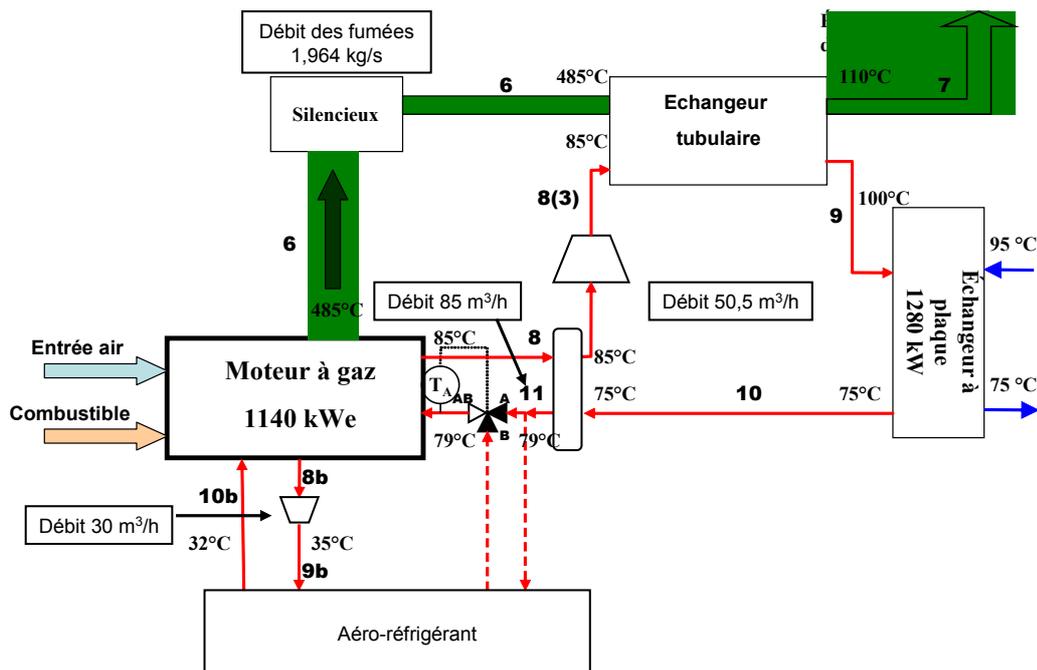
\*1 : <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/divers-portail/seances-disponibles>

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

Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur à plaques	100°C / 75°C
Température eau de chauffe entrée/sortie échangeur à plaques	95°C / 75°C
Température eau de chauffe entrée/sortie aéro-réfrigérant	35/32°C
Débit eau de chauffe	18 kg/s
Consommation moteur (gaz)	3010kWPCI
Débit air de combustion	0,06kg/s
Débit des fumées	3,456 kg/s
Température de sortie des fumées	1,964 kg/s
Température de sortie des fumées	110 °C
Débit volumique eau de refroidissement	23 kg/s
Puissance calorifique gaz introduite	2867kW
Puissance calorifique refroidissement huile	114 kW
Puissance calorifique refroidissement moteur	538 kW
Puissance calorifique échangeur gaz de combustion	832 kW
Puissance calorifique échangeur à plaques	1280 kW
Puissance électrique	1140 kW

Le débit d'air aspiré à 10 °C est égal à 1,9 kg/s. Le débit d'eau chaude vaut 18 kg/s, les températures et pressions de retour étant égales respectivement à 75 °C et 5 bars. Le taux de compression est donné à 12:1.

Le schéma principe de l'installation est le suivant :



Les numéros en gras sont les points dont nous nous servirons pour expliquer l'installation, tandis que les températures et débit sont en style normal.

Ces caractéristiques sont celles données par le constructeur (cf. document intitulé *Eneria CAT\_Groupe électrogène à gaz\_fiche technique : 3516B SITA HR et Schéma de principe cogénération 3516B module*).

Sous ThermoOptim, votre objectif est d'essayer de vous en rapprocher le plus possible, mais certaines valeurs conduisent à des incohérences. Il apparaît déjà impossible, au niveau de l'échangeur à plaques, que la température de sortie de l'eau de refroidissement soit la même que celle d'entrée de l'eau de chauffage. Les données fournies doivent donc être « à titre informatif », mais non vérifiées.

#### **Descriptif de l'installation :**

Dans les circuits de refroidissement interne, en rouge, circulent des fluides caloporteurs, il s'agit d'eau glycolée afin d'assurer une bonne résistance à la corrosion ainsi qu'au gel.

Sous ThermoOptim, ce n'est pas possible de modéliser l'eau glycolée pour les hautes températures, mais cela n'a pas d'importance car la nature (comme le débit) du fluide caloporteur n'a pas d'influence sur le rendement, ni sur les puissances de l'installation. Dans ce cas, le circuit d'huile est ressorti pour être refroidi, car nous avons des puissances relativement importantes qui sont mises en jeu. Dans le cas de petites puissances (micro cogénération par exemple), le circuit d'huile n'est pas ressorti. Les deux principes de fonctionnement des circuits seront expliqués en parallèle puisqu'ils sont très similaires. Ces fluides circulent en circuit fermé (attention cela n'a rien à voir avec le paramétrage système ouvert / système fermé dans ThermoOptim) :

- Ces fluides arrivent dans le moteur à des températures relativement faible T11 et T10b, et passent dans celui-ci pour le refroidir, respectivement le bloc moteur lui-même et le circuit d'huile.

- Ce faisant, ils se réchauffent et ressortent du moteur à des températures plus élevées T8 et T8b. (Ceci sera modélisé par un thermocoupleur, partant du moteur vers un module d'échange présent sur le circuit de refroidissement ; pour le circuit de refroidissement du circuit d'huile, on peut ajouter la quantité d'énergie dans le thermocoupleur vers le circuit de refroidissement principal puis inclure un module d'échange dans le circuit principal relié à un module d'échange dans le circuit secondaire, voir plus loin).

- 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 principal. Celui-ci 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 ici un circuit de chauffage. La présence d'un aéro-réfrigérant permet de refroidir le liquide de refroidissement lorsque le circuit de chauffage ne fonctionne pas à 100%, et donc le refroidissement du liquide dans l'échangeur à plaques n'est pas assez important. Le passage ou non dans cet aéro-réfrigérant est contrôlé par une vanne trois voies.

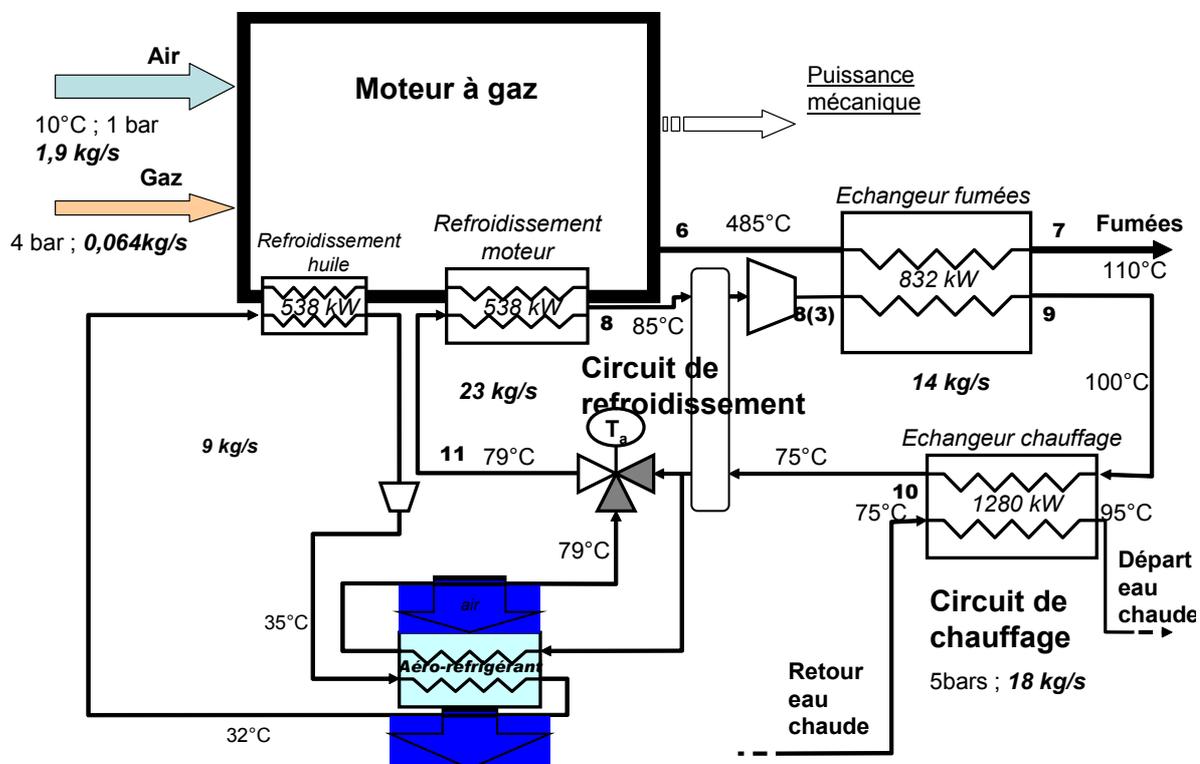
Le circuit de refroidissement huile, est simplement refroidi par un aéro-réfrigérant...

Les pertes de charges sont compensées par une pompe.

Le moteur est modélisé par un bloc moteur, il existe plusieurs manières de le modéliser sous ThermoOptim, mais la solution la plus simple peut suffire pour la modélisation ; bien que celle-ci soit très imparfaite.

Afin de pouvoir modéliser facilement cette installation, il faut d'abord chercher à décomposer celle-ci en un schéma simple, utilisant les transformations du noyau de Thermoptim.

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

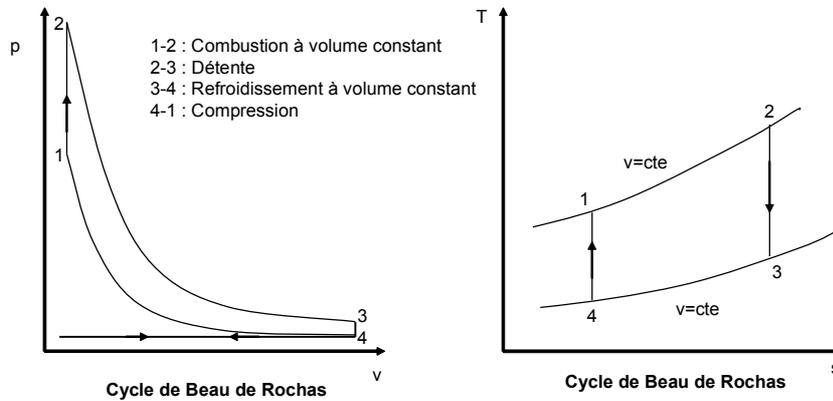


Sur ce schéma les éléments décrits précédemment dans le [descriptif de l'installation](#) se retrouve facilement. L'incohérence au niveau de l'échangeur à plaque (de chauffage) sera résolu en abaissant la température de fluide froid (l'eau de chauffage) de 2°C ; cela fera entrer l'eau à 73°C pour la faire ressortir à 93°C.

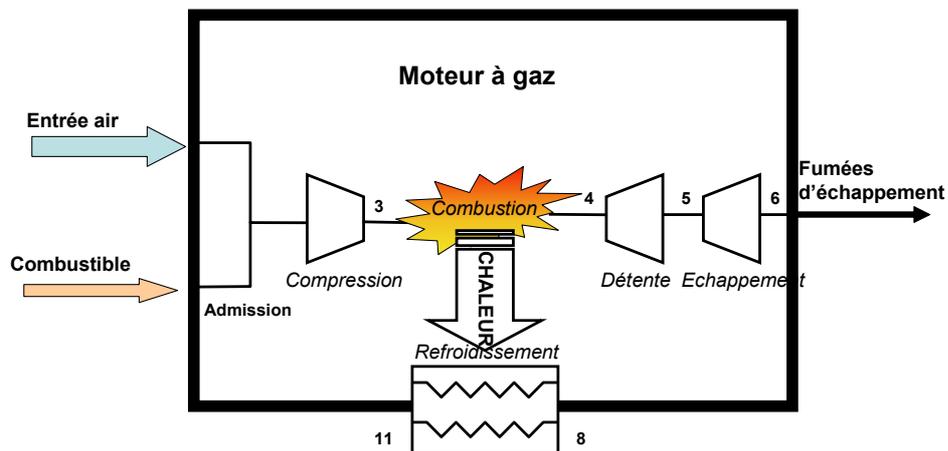
Il est alors facile de faire un modèle sous Thermoptim ; il faut en revanche encore décomposer les différentes transformations qui prennent place à l'intérieur du *Moteur à gaz*.

## Modélisation du moteur à gaz :

Pour simplifier les choses, le cycle du moteur à gaz sera supposé comme étant 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 illustrée 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 7 pour le paramétrage de cette transformation),
- une détente en système fermé pour la détente des gaz brûlés,

\*3 : <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s39-exercice>

- 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).

Dans un second temps, nous modéliserons l'échappement des gaz avec une classe externe, mieux adaptée (voir fin de ce TD).

### **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. Ici, les débits sont donnés et permettent d'obtenir des résultats cohérents.

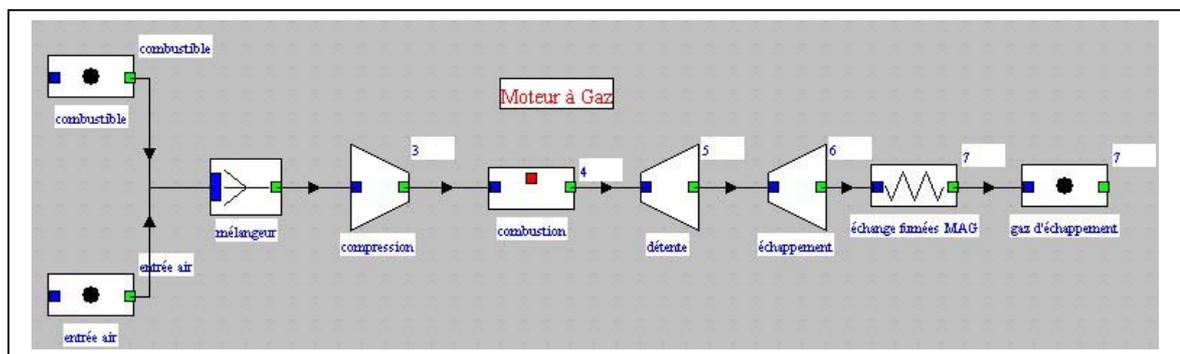
- Le mélangeur ne propage pas le nom du corps car il peut y avoir deux corps différents en entrée, il faut donc indiquer le nom du corps et du point en entrée ET en sortie lors de la mise en place de la compression

NB : Lors de l'insertion du module compression, il 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 cliquez 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, on peut choisir *gaz\_brulés*, par exemple. 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.

Les débits d'air et de combustible sont donnés. Il ne reste qu'à paramétrer les transfos avec les données du tableau page 2.

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.

Les paramétrages du compresseur, de la chambre de combustion et de la turbine sont illustrés sur les captures d'écran ci-dessous.

*Compression*

transfo	compression	type	compression
type énergie	utile	<input type="checkbox"/> débit imposé	débit 1,964
point amont	3e	m Δu	790,27
T (°C)	10,32446	Q	0
P (bar)	1		
h (kJ/kg)	-15,06		
titre	1		
point aval	3		
T (°C)	507,09		
P (bar)	33,029		
h (kJ/kg)	532,6		
titre	1		
			rend. polytropique 0,9
			exposant polytropique 1,40745
			rapport de pression (>= 1) 12
			<input type="radio"/> calculé
			<input checked="" type="radio"/> imposé
			Imposer le rendement et calculer la transfo <input checked="" type="radio"/>
			Calculer le rendement, le point aval étant connu <input type="radio"/>

La température de fin de compression est de 508°C, le taux de compression de 12:1, le rendement polytropique choisi est de 0,9.

*Combustion*

transfo	combustion	type	combustion
type énergie	payante	<input type="checkbox"/> débit imposé	débit 1,964
point amont	3	m Δu	2 310,18
T (°C)	507,09	W	0
P (bar)	33,029		
h (kJ/kg)	532,6		
titre	1		
point aval	4		
T (°C)	1 676,25		
P (bar)	82,8411		
h (kJ/kg)	2 052,67		
titre	1		
			combustible
			<input checked="" type="checkbox"/> prémélangé
			<input checked="" type="checkbox"/> dissociation
			a 0
			hf0 0
			taux dissociation 0,05
			temp. figeage (°C) 1 500
			rendt. combustion 1
			rendement chambre 0,78
			ksi 0,95
			T (°C) 1 676,2478051469
			<input checked="" type="radio"/> Calculer T

La température de fin de combustion est de  $1676^{\circ}\text{C}$ , le rendement de la chambre permettant de satisfaire aux résultats constructeur est  $0,78$ . On prend un taux de dissociation de  $5\%$ , et  $\text{ksi}$  de  $0,95$ .

La puissance fournie venant du combustible est donc de  $\frac{2310}{0,78} = 2961,5\text{kW}$ . Cela correspond avec les valeurs constructeur.

*Détente*

The screenshot shows a software interface for calculating expansion (Détente) parameters. The interface is titled "Détente" and includes several input fields and buttons. The "transfo" field is set to "détente" and the "type" field is also "détente". The "type énergie" is "utile". The "débit imposé" checkbox is unchecked. The "système fermé" radio button is selected, and the "observée" checkbox is unchecked. The "point amont" is set to 4, and the "point aval" is set to 5. The "rend. polytropique" is 0,92 and the "exposant polytropique" is 1,26565. The "rapport de détente (>= 1)" is 12. The "calculé" radio button is selected for the expansion ratio. The "Imposer le rendement et calculer la transfo" radio button is selected. The "Calculer le rendement, le point aval étant connu" radio button is unselected. The "Calculer" button is visible. The "Supprimer" and "Fermer" buttons are also visible. The "affichage" buttons are visible for the upstream and downstream points. The "m Δu" field is -1 895,53 and the "Q" field is 0. The "titre" field is 1. The "T (°C)" field for the upstream point is 1 676,24781 and for the downstream point is 734,27. The "P (bar)" field for the upstream point is 82,84113 and for the downstream point is 3,5676. The "h (kJ/kg)" field for the upstream point is 2 052,67 and for the downstream point is 810,97.

La température de fin de détente est de  $734^{\circ}\text{C}$ , mais il ne s'agit pas de la température de sortie des gaz d'échappement, car il y a encore l'échappement qui va baisser l'enthalpie, et donc la température des gaz.

L'énergie mécanique disponible est donc de  $|790,2 - 1895,5| = 1105\text{MW}$ . Cela correspond à peu près aux données avec une erreur de  $3\%$ .

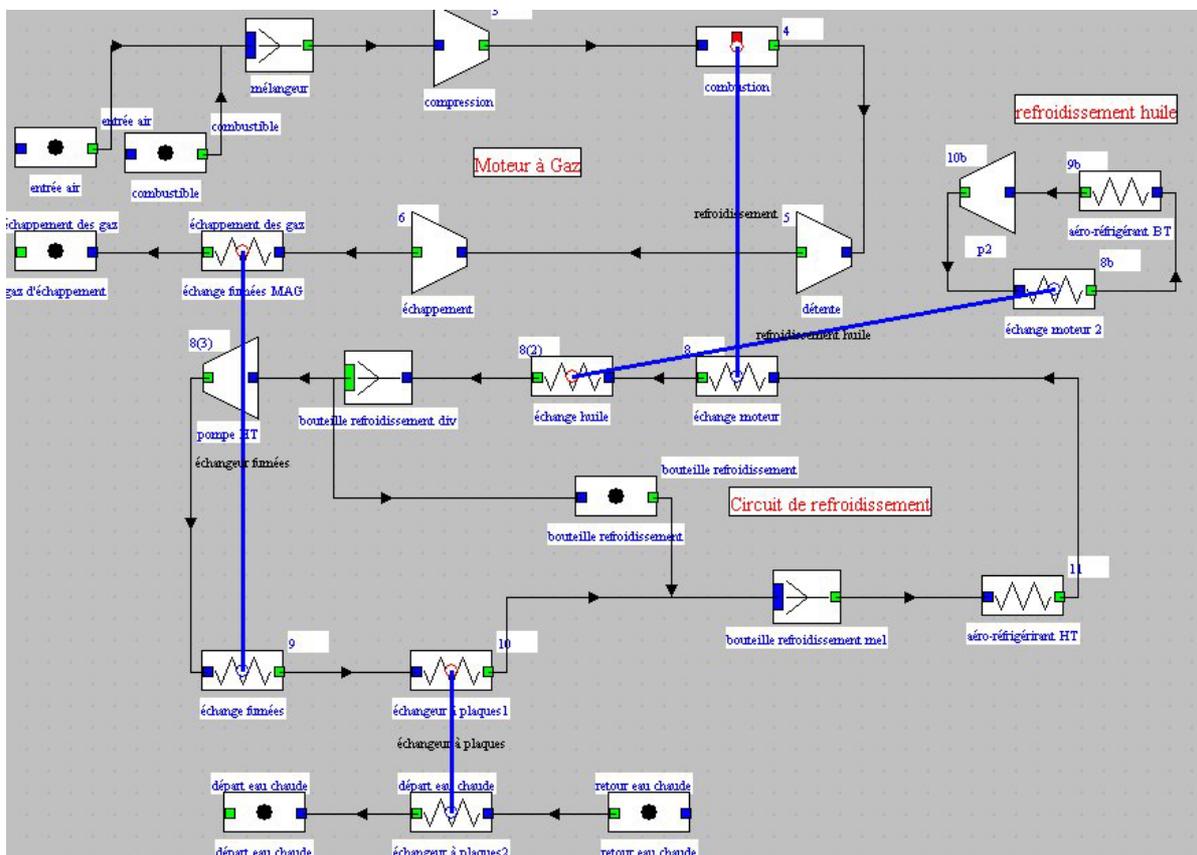
## Modélisation de l'installation complète :

### 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 ThermoOptim de l'installation modélisée est le suivant :



## Paramétrage (simulateur):

Le moteur étant déjà paramétré, il ne vous reste plus qu'à paramétrer les circuits (refroidissements internes 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.

Comme il s'agit d'une modélisation, on peut procéder à tâtons en jouant sur les paramètres imposé et à calculer afin de caler notre modèle. Une fois ceci fait, on peut essayer de se remettre dans le cas réel. Bien souvent, on est amené à calculer l'efficacité de l'échangeur donc imposé 5 variables.

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		type			
échangeur à plaques		contre-courant			
				Sauver	
				Supprimer	
				Fermer	
fluide chaud			fluide froid		
échangeur à plaques			échangeur à plaques		
affichage			affichage		
Calculer					
Tce (°C)	98,97840462	<input checked="" type="radio"/> imposé	Tfe (°C)	73	<input checked="" type="radio"/> imposé
		<input type="radio"/> calculé			<input type="radio"/> calculé
Tcs (°C)	75	<input checked="" type="radio"/> imposé	Tfs (°C)	91,66060189	<input type="radio"/> imposé
		<input type="radio"/> calculé			<input checked="" type="radio"/> calculé
mc	13,6	<input checked="" type="radio"/> imposé	mf	17,5	<input checked="" type="radio"/> imposé
		<input type="radio"/> calculé			<input type="radio"/> calculé
Cpc	4,20329568		Cpf	4,19744909	
m ΔHc	-1 370,7212132		m ΔHf	1 370,72121319	
<input checked="" type="radio"/> non contraint			UA	334,35778518	<input checked="" type="radio"/> dimensionnement
<input type="radio"/> pincement minimum	DTmin	0	R	0,778225332	<input type="radio"/> non nominal
<input type="radio"/> efficacité imposée	epsilon	0,923012978	NUT	5,84901305	
			DTML	4,09956422	

*Paramétrage de l'échangeur à plaques*

Les résultats sont tout à fait cohérents et proches de ceux indiqués. L'efficacité de 0,92 est une valeur courante, la variation de température du fluide chaud est quasiment identique à celle recherchée ; on peut d'ailleurs en conclure que ces valeurs ont été imposées dans un premier temps. Nous obtenons 1370 kW d'échangés pour 1280 recherché dans le cas réel, soit 7% d'erreur. La valeur indiquée de 1280 kW ne peut être obtenu puisque le débit est celui indiqué, et la variation de température est inférieure à celle figurant sur les données constructeur ; donc on devrait obtenir plus.

nom	échangeur fumées		type	contre-courant		<	>	Sauver
						Supprimer		Fermer
fluide chaud				fluide froid				Calculer
échange fumées MAC		afficher		échange fumées		afficher		
Tce (°C)	484,9992424	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	Tfe (°C)	84,56613333	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	
Tcs (°C)	110,59428542	<input type="radio"/> imposé	<input checked="" type="radio"/> calculé	Tfs (°C)	98,97840462	<input type="radio"/> imposé	<input checked="" type="radio"/> calculé	
mc	1,964	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	mf	13,6	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	
Cpc	1,12059645			Cpf	4,20398328			
m ΔHc	-824,00968607			m ΔHf	824,00968607			
<input type="radio"/> non contraint				UA	6,17267354	<input checked="" type="radio"/> dimensionnement		
<input type="radio"/> pincement minimum DTmin				R	0,0384938047	<input type="radio"/> non nominal		
<input checked="" type="radio"/> efficacité imposée epsilon				NUT	2,80467525			
				DTML	133,49315833			

*Paramétrage de l'échangeur fumées*

La valeur de sortie des fumées est de 485°C puisqu'elle a été calculée dans l'échappement en se basant sur les valeurs constructeur. 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 0,935, ce qui est plausible et permet d'avoir une variation de la température des fumées de 375°C.

Nous avons une quantité d'énergie échangée de 824 kW au lieu de 832, ce qui est correct : 1,0% d'erreur.

#### 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 sélectionnez "Ts calculé" pour que ce soit

la température de sortie de la transfo échange qui soit déterminée, son débit n'étant pas modifié (cas recommandé), 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. Dans notre cas, nous additionnons les valeurs des puissances du refroidissement moteur et huile soit  $538 + 114 = 652 kW$ . On enlèvera par la suite 114 kW pour les envoyer sur le circuit refroidissement huile.

nom	refroidissement	type	contre-courant	<	>	Sauver
			cooling	Supprimer		Fermer
thermal fluid			process			
échange moteur			combustion			
Te			Te			
79			1 091,66921813			
Ts			Ts			
85,74913932			1 091,56921812			
m			m			
23			1,964			
Cp			Cp			
4,19767474			3 317,65792967			
m ΔH			m ΔH			
651,60590854			-651,60590854			
			fluide méthode pinct.			
			pincement minimum 0			
<i>Paramétrage du thermocoupleur</i>						

Sur cette capture d'écran, les résultats obtenus avec notre modèle. La variation de 79 à 85,7°C est très satisfaisante en regard aux données de départ ; étant donnée que l'énergie du circuit de refroidissement de l'huile a été rajoutée.

Ci-dessous est représenté enfin l'échangeur de refroidissement de l'huile :

nom	refroidissement huile	type	contre-courant	<	>	Sauver
				Supprimer		Fermer
fluide chaud			fluide froid			
échange huile			échange moteur 2			
Tce (°C)			Tfe (°C)			
85,74913932			32,00171018			
Tcs (°C)			Tfs (°C)			
84,56882722			35,03389238			
mc			mf			
23			9			
Cpc			Cpf			
4,19933146			4,17740948			
m ΔHc			m ΔHf			
-114			114			

Les 114 kW ont bien été retranchés et la température finale du liquide de refroidissement est alors de 84,57°C au lieu de 85, soit une erreur de 0,5%.

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), ainsi que les autres énergies mécaniques.
- ✓ L'énergie récupérée dans le module d'échange d'échappement des fumées (échange fumées 1) est utile, mais nous la comptabiliserons en comptant comme

utile l'énergie provenant du circuit de refroidissement dans le module d'échange de l'échangeur à plaques.

- ✓ L'énergie récupérée 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, mais l'énergie du circuit de refroidissement est utile (échangeur à plaques).

Pour 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 :

- rendements isentropiques de compression et détente
- rendement de chambre (qui conditionne la charge thermique du thermocoupleur)
- efficacité des échangeurs

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

Plusieurs étapes peuvent nous intéresser pour le paramétrage.

➤ Le rapport entre l'énergie transmise au fluide dans la chambre de combustion et celle cédée sous forme de chaleur au circuit de refroidissement permet de déterminer le rendement de la chambre de combustion, qui vaut ici environ 0,78.

➤ 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.

On peut essayer de paramétrer l'échangeur des fumées en calculant la température d'échappement des fumées à la sortie (Tcs), les autres données étant connues.

On peut aussi calculer la température de sortie du fluide froid de l'échangeur à plaques.

Pour le thermocoupleur, la puissance thermique cédée au système de refroidissement par le moteur, il suffit de faire varier le rendement de la chambre de combustion jusqu'à obtenir la valeur recherchée.

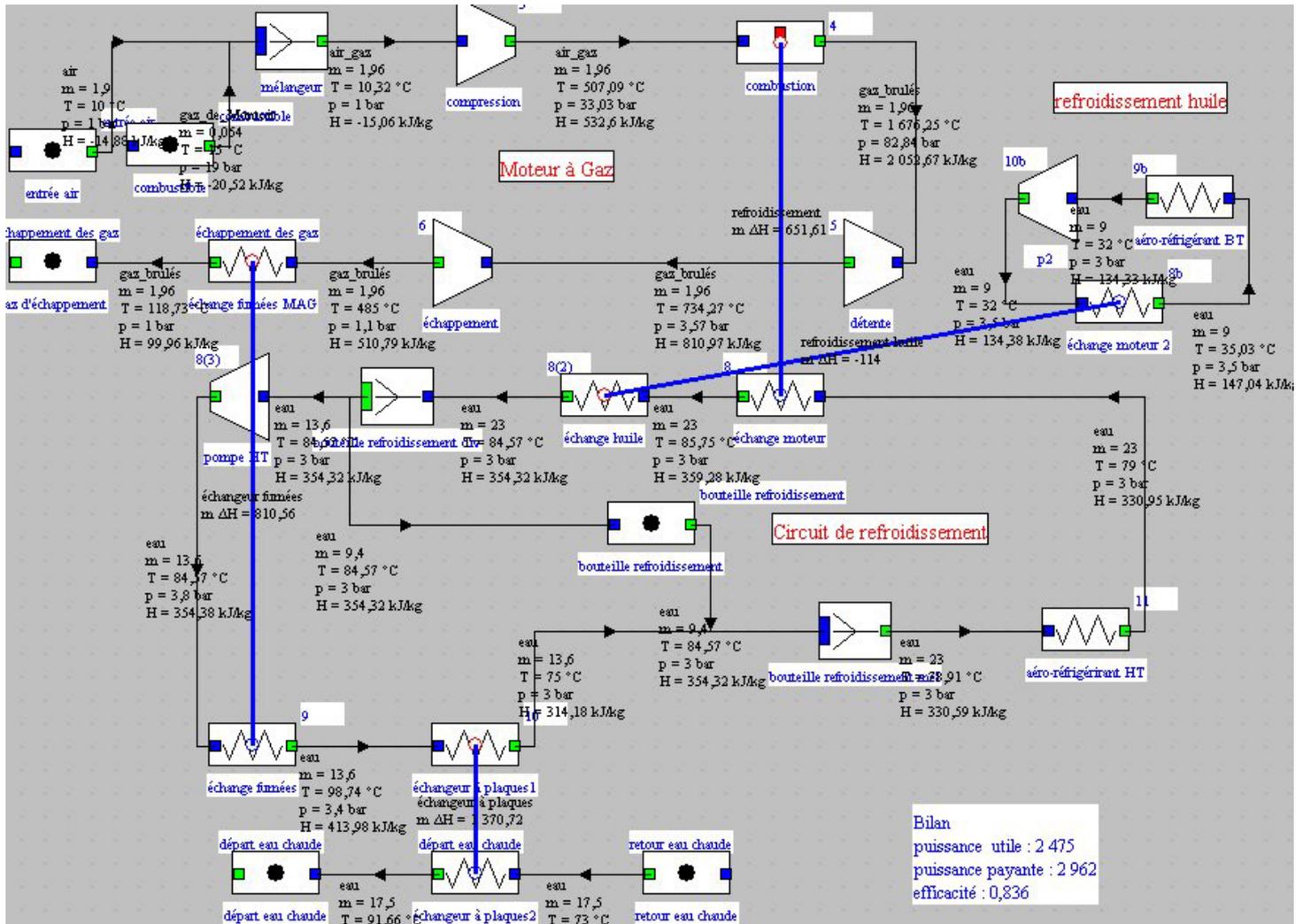
Avec ces trois échangeurs, et connaissant les quantités que l'on doit trouver, on peut essayer de s'approcher du cas réel.

Le but premier est évidemment de se rapprocher le plus possible de l'installation réelle, mais dans le cas présent malgré quelques impossibilités, il est assez facile de valider la modélisation.

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 :



Et un tableau récapitulatif des résultats :

	Données constructeur	Résultats obtenus avec notre modèle
Différence de température	20°C	18,66°C
Température eau de refroidissement entrée/sortie refroidissement moteur	79°C / 85°C	79°C / 84,6°C
Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur gaz de combustion	85°C / 100°C	84,6°C / 98,7°C
Température des fumées entrée/sortie	485°C / 110°C	485°C / 118,7°C
Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur à plaques	100°C / 75°C	98,7°C / 75°C
Température eau de chauffe entrée/sortie échangeur à plaques	75°C / 95°C	73°C / 91,7°C
Température eau de chauffe entrée/sortie aéro-réfrigérant	35/32°C	35,0°C / 32,0°C
Débit eau de chauffe	17,5 kg/s	17,5 kg/s
Consommation moteur (gaz)	3010kWPCI	
Débit air de combustion	0,064kg/s	0,064kg/s
Débit des fumées	1,9 kg/s	1,964 kg/s

Température de sortie des fumées	110 °C	118,7°C
Débit volumique eau de refroidissement	23 kg/s	23 kg/s
Puissance calorifique gaz introduite	2867 kW	2961,5 Kw
Puissance calorifique refroidissement huile	114 kW	114 kW
Puissance calorifique refroidissement moteur	538 kW	537,6 kW
Puissance calorifique échangeur gaz de combustion	832 kW	824 kW
Puissance calorifique échangeur à plaques	1280 kW	1370,7 kW
Puissance électrique	1140 kW	1105,3 kW

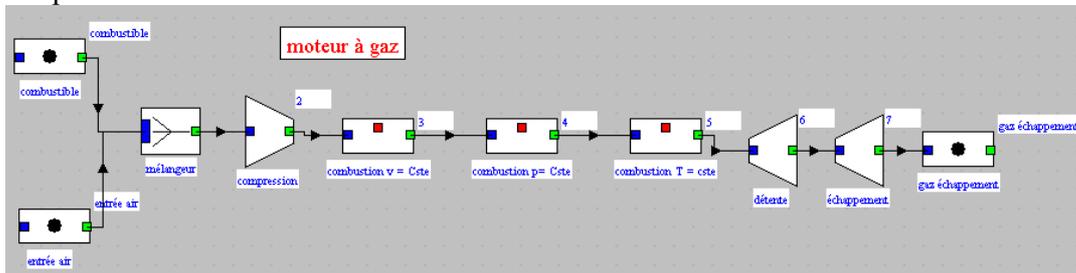
Quelques paramètres supplémentaires :

Paramètres	
rendement chambre de combustion	0,78
rendement polytropiques détente et compression	0,9 et 0,92

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

Ceci peut s'expliquer par différents phénomènes :

❖ 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 il faudrait une combustion à volume constant, une combustion à pression constante et une combustion à température constante.



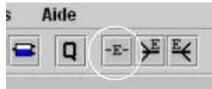
❖ Le modèle d'échappement est imparfait ; par la suite, il est expliqué comment créer un modèle plus vraisemblable

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 de ne pas 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)