

## Etude d'une installation de cogénération : *Chaufferie de logicil, LONGCHAMP:*

### 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 urbain. L'électricité produite est revendue à Edf.

Le cas présenté ci-dessous est une installation de cogénération utilisée pour du chauffage urbain par la société *Logicil* à Longchamp réalisé par *Mitsubishi Engines* en partenariat avec *Dalkia*. Voici ses caractéristiques de fonctionnement :

Site	Chaufferie de Longchamp - LOGICIL
Type	Habitat collectif
Ville	Longchamp - 59100 Roubaix (FR)
Année d'installation	2001
Technologie	Moteur à gaz
fabriquant	Mitsubishi Engines MEEF
Modèle	GS 16U PTK
Nombre d'unité	2
Puissance électrique	2002 kW
Puissance thermique	2325 kW
Rendement électrique	36,2%
Rendement thermique	42,1%
Rendement global	78,3%
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 fournissant 2002 kW<sub>e</sub> et fonctionnant au gaz naturel. Il alimente un réseau de chauffage urbain à raison de 106 m<sup>3</sup>/h d'eau chaude à 90°C.

Remarque : Une unité de cogénération produit à la fois de l'électricité, qui est une énergie stockable et de réseau ; et de la chaleur, qui n'est pas stockable. C'est pour cette raison qu'une installation sera très souvent dimensionnée en fonction des besoins en chaleurs.

### Autres caractéristiques nécessaires à la modélisation :

	Données constructeur
Différence de température	20°C

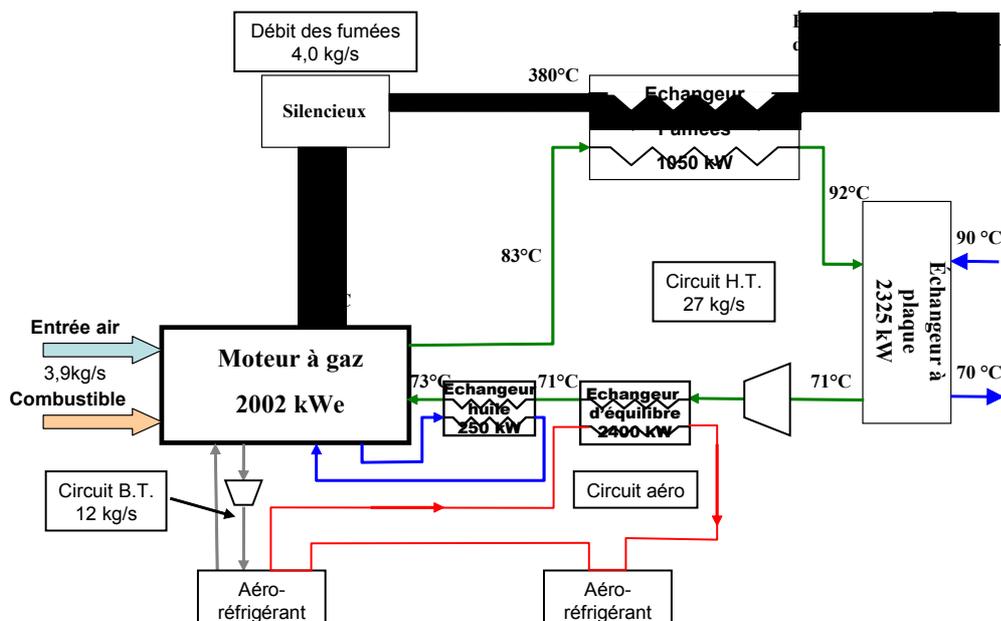
\*1 : <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/divers-portail/seances-disponibles>

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

Température eau de refroidissement entrée/sortie refroidissement moteur	71°C / 73°C / 75°C / 83°C
Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur gaz de combustion	83°C / 92°C
Température des fumées entrée/sortie	355°C / 120°C
Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur à plaques	92°C / 71°C
Température eau de chauffe entrée/sortie échangeur à plaques	70°C / 90°C
Débit eau de chauffe	-
Consommation moteur (gaz)	0,1 kg/s
Débit air de combustion	3,9 kg/s
Débit des fumées	4,0 kg/s
Température de sortie des fumées	120 °C
Débit volumique eau de refroidissement	27 kg/s
Puissance calorifique gaz introduite	5525 kW
Puissance calorifique refroidissement moteur	1402 kW
Puissance calorifique échangeur gaz de combustion	1002 kW
Puissance calorifique échangeur à plaques	2325 kW
Puissance mécanique	2020 kW

Le débit d'air aspiré à 15 °C est égal à 3,9 kg/s. Le débit d'eau chaude n'est pas connu ; les températures et pressions de retour sont égales respectivement à 70 °C et 5 bars. Le taux de compression n'est pas donné, on choisit 12:1. Il y a quatre températures pour les températures eau de refroidissement entrée/sortie refroidissement moteur : 71°C / 73°C / 75°C / 83°C, car il y a trois échangeurs pour le refroidissement moteur : L'échangeur huile, l'échangeur air 1<sup>er</sup> étage et l'échangeur moteur. Mais il est possible de modéliser ces trois échangeurs par un seul.

Le schéma principe de l'installation est le suivant :



Ces caractéristiques sont celles données par le constructeur (cf. document intitulé *Cogénération\_Chauffage Lonchamp\_LOGCIL*).

Sous Thermoptim, votre objectif est d'essayer de vous en rapprocher le plus possible, mais il n'est cependant pas possible d'obtenir des résultats entièrement similaires car il s'agit d'une modélisation relativement simplifiée ; moteur, échappement...

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

Dans *les circuits de refroidissement interne* circulent des fluides caloporteurs. Il s'agit d'eau glycolée, afin d'assurer une bonne résistance à la corrosion ainsi qu'au gel. Sous Thermoptim, 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 le cas présent, le circuit d'huile est ressorti pour être refroidi, car des puissances relativement importantes sont mises en jeu. Dans le cas de petites puissances (micro cogénération par exemple), le circuit d'huile n'est pas ressorti.

Deux circuits de refroidissement sont présents : un pour le bloc moteur principal, l'autre pour le refroidissement annexe, huile... Des aéro-réfrigérants permettent de refroidir les deux circuits de refroidissement, le circuit Basse Température est toujours refroidi dans un aéro-réfrigérant tandis que le circuit Haute Température n'est refroidi dans l'aéro-réfrigérant que lorsque le circuit de chauffage ne fonctionne pas à 100%, et donc ne peut absorber toute la chaleur provenant du moteur.

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 Thermoptim) :

- Ils arrivent dans le moteur à des températures relativement faibles, 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. (Ceci sera modélisé par un thermocoupleur partant du moteur vers un module d'échange présent sur le circuit de refroidissement ; on ne représentera qu'un seul circuit de refroidissement dans ce cas en faisant le bilan des puissances mises en jeu.)

- Les *gaz d'échappement du moteur* ressortent à des températures élevées.

L'idée est de pouvoir réutiliser cette chaleur pour réchauffer le fluide de refroidissement interne principal. Celui-ci passe alors dans un second échangeur où il sera encore chauffé. Les fumées repartent ainsi plus froide, alors que l'eau glycolée ressort plus chaude.

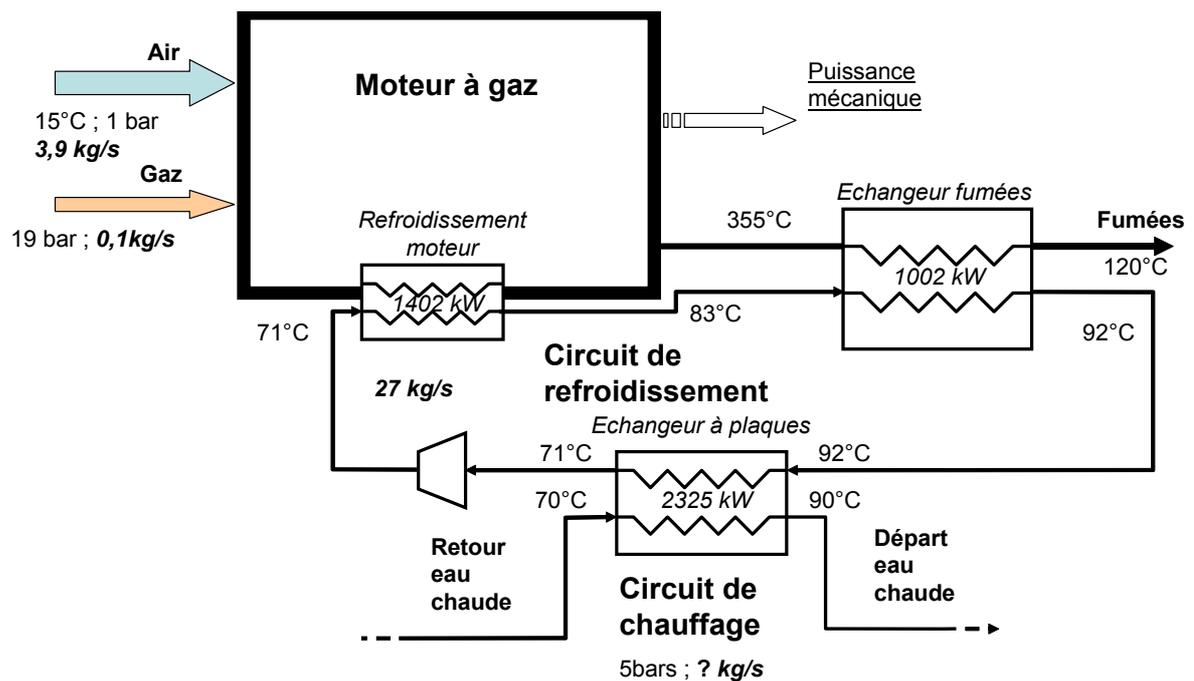
- Le fluide passe ensuite dans un second échangeur, où il échangera la chaleur qu'il a acquis à l'intérieur du moteur et au contact des gaz d'échappement avec un fluide plus froid, circulant dans un *circuit de refroidissement externe* étant ici un circuit de chauffage.

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 Thermoptim, 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 :

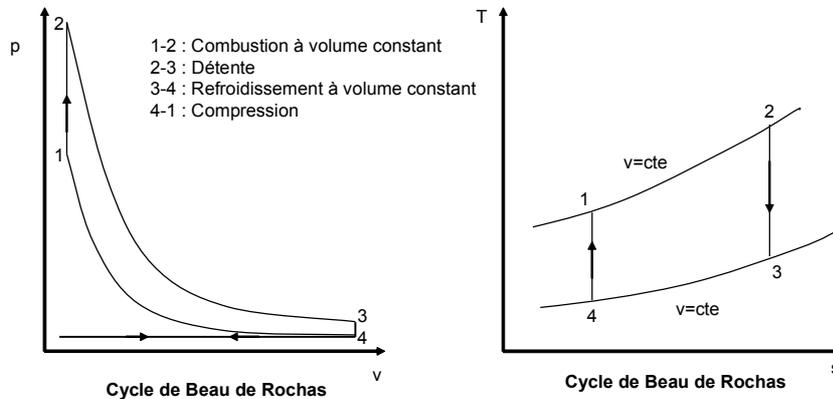


Sur ce schéma les éléments décrits précédemment dans le [descriptif de l'installation](#) se retrouve facilement.

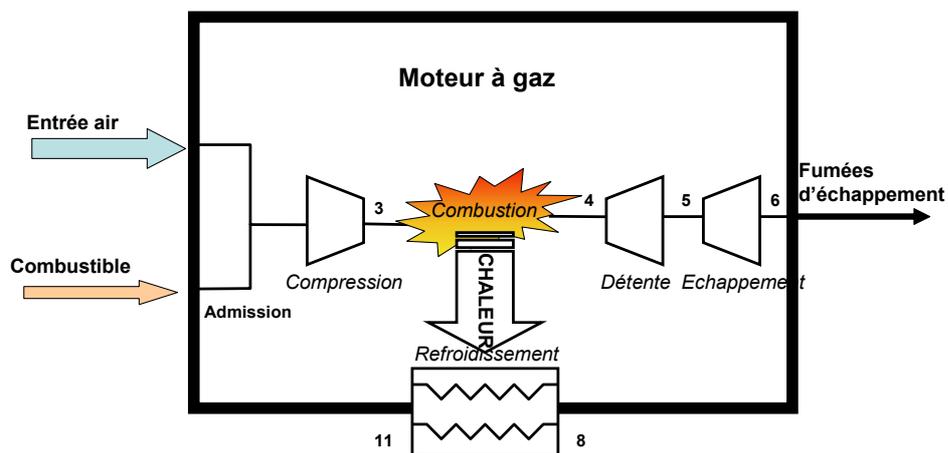
Il est alors facile de faire un modèle sous Thermoptim ; il faut en revanche encore décomposer les différentes transformations qui prennent place à l'intérieur du *Moteur à gaz*.

## 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.

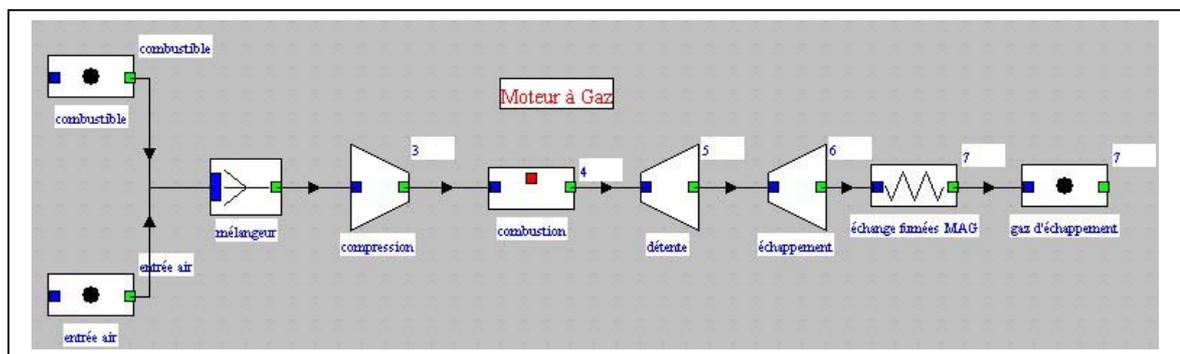
- Le mélangeur ne propage pas le nom du corps car il peut y avoir deux corps différents en entrée, il faut donc indiquer le nom du corps et du point en entrée ET en sortie lors de la mise en place de la compression

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  débit imposé

point amont: 3e  débit: 4,02  système fermé  observée

système ouvert

T (°C): 15 m Δu: 1 642,47

P (bar): 1 Q: 0

h (kJ/kg): -10,19  adiabatique  non adiabatique

titre: 1  référence isentropique  référence polytropique

rend. polytropique: 0,9

point aval: 3  exposant polytropique: 1,4078

T (°C): 520,64 rapport de pression (>= 1): 12  calculé

P (bar): 33,0574  imposé

h (kJ/kg): 546,04

titre: 1

Imposer le rendement et calculer la transfo

Calculer le rendement, le point aval étant connu

La température de fin de compression est de 520°C, le taux de compression de 12:1, le rendement polytropique choisi est de 0,9.

### Combustion

transfo: combustion type: combustion

type énergie: payante  débit imposé

point amont: 3  débit: 4,02  système fermé  observée

système ouvert

T (°C): 520,64 m Δu: 4 227,6

P (bar): 33,0574 W: 0

h (kJ/kg): 546,04 combustible

titre: 1  prémélangé a: 0

dissociation hf0: 0

point aval: 4  taux dissociation: 0,05

T (°C): 1 580,64 temp. figeage (°C): 1 500

P (bar): 77,4791 rendt. combustion: 1

h (kJ/kg): 1 908,86 rendement chambre: 0,751

titre: 1  Calculer T ksi: 0,963

T (°C): 1 580,6414644927

La température de fin de combustion est de 1580°C, le rendement de la chambre permettant de satisfaire aux résultats constructeur est 0,751. On prend un taux de dissociation de 5%, et ksi de 0,963.

La puissance fournie venant du combustible est donc de  $\frac{4227,6}{0,751} = 5629,3kW$ . Cela correspond avec les valeurs constructeur.

*Détente*

transfo	détente	type	détente	<	>	Sauver
type énergie	utile	<input type="checkbox"/> débit imposé	débit	4,02	<input checked="" type="radio"/> système fermé	<input type="checkbox"/> observée
point amont	4	afficher	m Au	-3 863,95	<input type="radio"/> système ouvert	Calculer
T (°C)	1 580,64146	Q	0	<input checked="" type="radio"/> adiabatique	<input type="radio"/> non adiabatique	
P (bar)	77,47909			<input type="radio"/> référence isentropique	<input checked="" type="radio"/> référence polytropique	
h (kJ/kg)	1 908,86			rend. polytropique	0,92	
titre	1			exposant polytropique	1,2708	
point aval	5	afficher		rapport de détente (>= 1)	12	<input type="radio"/> calculé
T (°C)	672,68					<input checked="" type="radio"/> imposé
P (bar)	3,2943					

La température de fin de détente est de 672,7°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  $|1642,5 - 3664,0| = 2021,5kW$ . Cela correspond à peu près aux données.

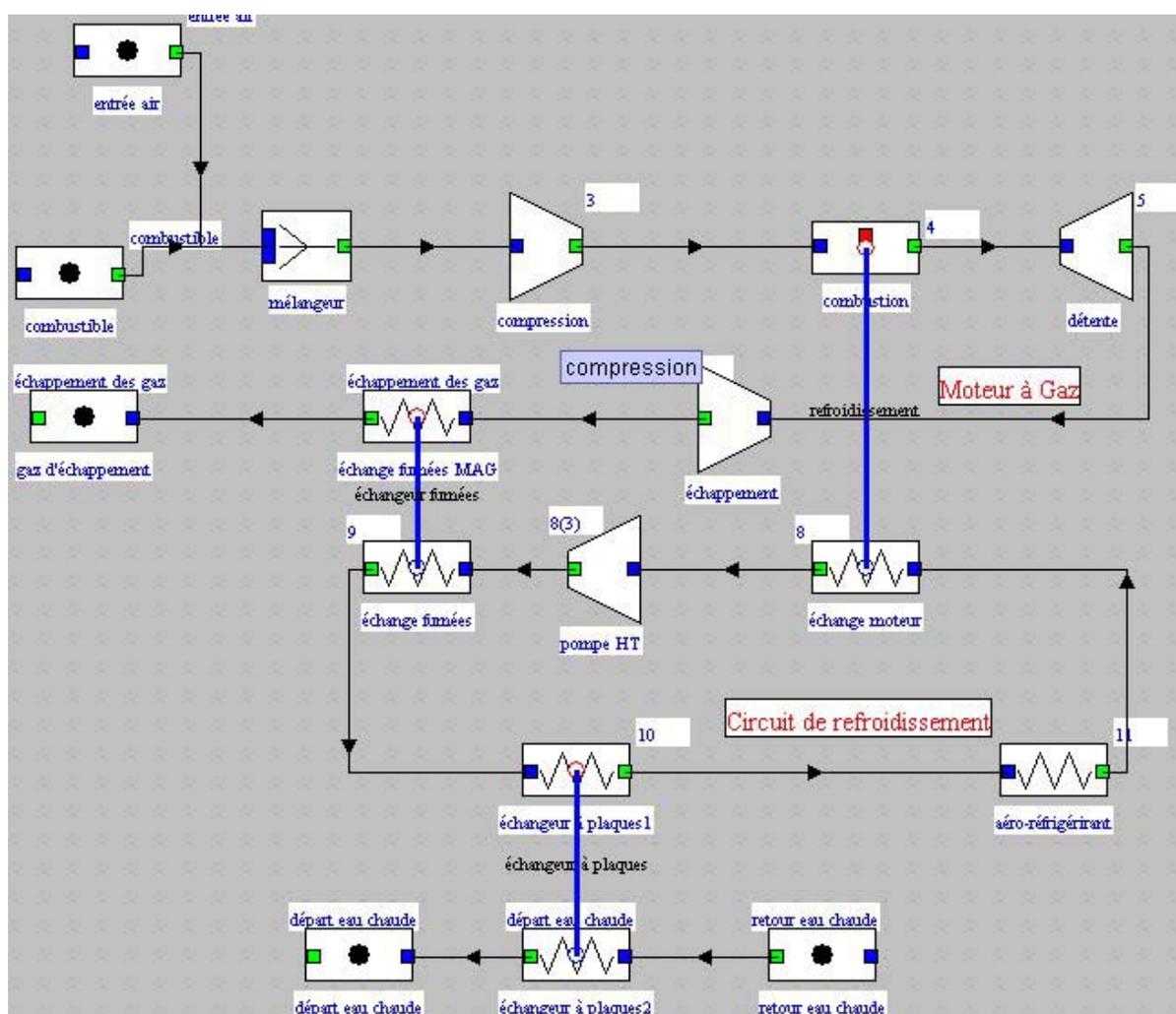
## Modélisation de l'installation complète :

### Modélisation (éditeur de schéma):

Une fois, le moteur modélisé, il ne reste plus qu'à modéliser le reste de l'installation. On a 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 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 imposés 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		échangeur à plaques		type		contre-courant				Saver	
		affichage								Supprimer	
		affichage								Fermer	
fluide chaud		échangeur à plaques		fluide froid		échangeur à plaques				Calculer	
Tce (°C)	92,50151207	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	Tfe (°C)	70	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé				
Tcs (°C)	71	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	Tfs (°C)	90	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé				
mc	27	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	mf	29,04966502	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé				
Cpc	4,19894141			Cpf	4,1956713						
m ΔHc	-2 437,65691479			m ΔHf	2 437,65691479						
<input checked="" type="radio"/> non contraint				UA	1 488,55037542			<input checked="" type="radio"/> dimensionnement			
<input type="radio"/> pincement minimum	DTmin	0		R	0,930167141			<input type="radio"/> non nominal			
<input type="radio"/> efficacité imposée	epsilon	0,955558542		NUT	13,12985583						
				DTML	1,63760458						

*Paramétrage de l'échangeur à plaques*

Les résultats sont cohérents et proches de ceux indiqués. L'efficacité de 0,95 est une valeur courante bien que légèrement haute, 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 2437 kW d'échangés pour 2325 recherchés dans le cas réel, soit 3,7% d'erreur.

nom	échangeur fumées		type	contre-courant		<	>	Sauver
						Supprimer		Fermer
<b>fluide chaud</b>				<b>fluide froid</b>				
échange fumées MAC				échange fumées				Calculer
affichage				affichage				
Tce (°C)	354,9880579	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	Tfe (°C)	83,39083748	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	
Tcs (°C)	126,84639275	<input type="radio"/> imposé	<input checked="" type="radio"/> calculé	Tfs (°C)	92,28402612	<input type="radio"/> imposé	<input checked="" type="radio"/> calculé	
mc	4,02	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	mf	26,99971239	<input checked="" type="radio"/> imposé	<input type="radio"/> calculé	
Cpc	1,09927328			Cpf	4,19874685			
m ΔHc	-1 008,17595031			m ΔHf	1 008,1759503			
<input type="radio"/> non contraint				UA	8,27371882	<input checked="" type="radio"/> dimensionnement		
<input type="radio"/> pincement minimum DTmin				R	0,0389809929	<input type="radio"/> non nominal		
DTmin				0	NUT	1,87227238		
<input checked="" type="radio"/> efficacité imposée epsilon				0,84	DTML	121,8528176		

*Paramétrage de l'échangeur fumées*

La valeur de sortie des fumées est de 355°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 0,84, ce qui est plausible et permet d'avoir une variation de la température des fumées de 228,1°C. Nous avons une quantité d'énergie échangée de 1008 kW au lieu de 1002, ce qui est correct : 0,6% 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  $250 + 225 + 935 = 1410 kW$ .

nom	refroidissement	type	contre-courant	<	>	Sauver	
			cooling	Supprimer		Fermer	
thermal fluid			process				
échange moteur		affichage		combustion		Calculer	
Te	71	<input checked="" type="radio"/> calculé		Te	1 050,64095014	<input type="radio"/> fluide méthode pinct.	
Ts	83,37883625	<input type="radio"/> calculé		Ts	1 050,54095014		
m	27					m	4,02
Cp	4,193864					Cp	3 486,80496461
m ΔH	1 401,7092059					m ΔH	-1 401,7092059
pincement minimum 0							
<i>Paramétrage du thermocoupleur</i>							

Sur cette capture d'écran, les résultats obtenus avec notre modèle. La variation de 71 à 83,4°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.

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 polytropiques 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 ( $T_{cs}$ ), 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.

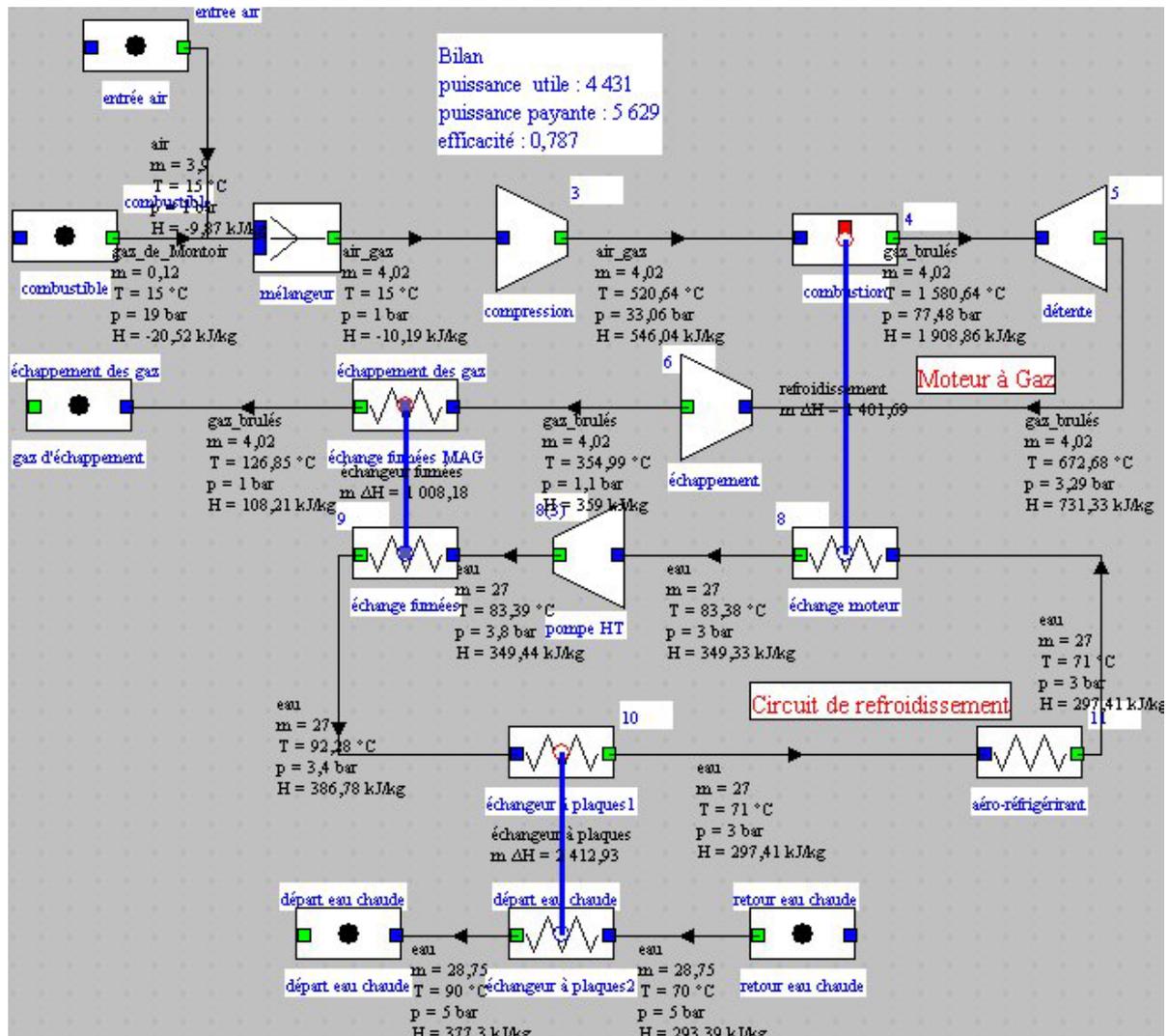
Avec ces trois échangeurs, et connaissant les quantités que l'on doit trouver, on peut essayer de s'approcher du cas réel.

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	erreur
Différence de température	20°C	20°C	-
Température eau de refroidissement entrée/sortie refroidissement moteur	71°C / 73°C / 75°C / 83°C	71°C / 83,4°C	3,3%
Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur gaz de combustion	83°C / 92°C	83,4°C / 92,3°C	1,1%
Température des fumées entrée/sortie	355°C / 120°C	355,0°C / 126,9°C	2,9%
Température eau de refroidissement entrée/sortie échangeur à plaques	92°C / 71°C	92,3°C / 71°C	1,4%
Température eau de chauffe entrée/sortie échangeur à plaques	70°C / 90°C	70°C / 90°C	-
Débit eau de chauffe	-	28,75 kg/s	-
Consommation moteur (gaz)	0,1 kg/s	0,12kg/s	20%
Débit air de combustion	3,9 kg/s	3,9 kg/s	-
Débit des fumées	4,0 kg/s	4,02 kg/s	0,5%

Température de sortie des fumées	120 °C	126,9°C	5,8%
Débit volumique eau de refroidissement	27 kg/s	27,0 kg/s	-
Puissance calorifique gaz introduite	5525 kW	5629 Kw	1,9%
Puissance calorifique refroidissement moteur	1402 kW	1401,7 kW	-
Puissance calorifique échangeur gaz de combustion	1002 kW	1008,2 kW	0,6%
Puissance calorifique échangeur à plaques	2325 kW	2412,9 kW	3,7%
Puissance mécanique	2020 kW	2021,5 kW	-

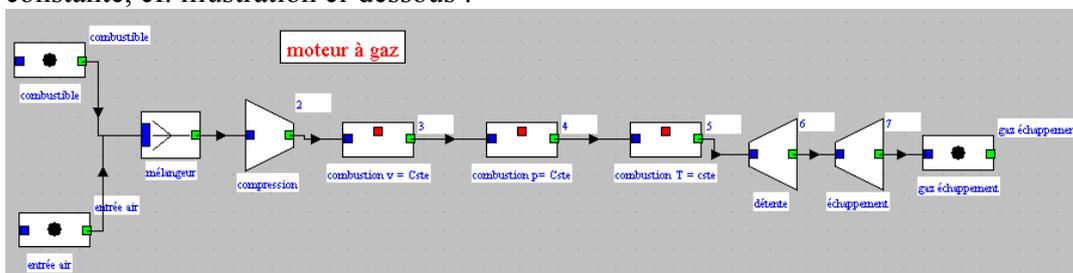
Quelques paramètres supplémentaires :

Paramètres	
rendement chambre de combustion	0,751
rendement polytropiques détente et compression	0,9 et 0,92

Malgré des résultats très proches de ceux données par le constructeur, quelques différences subsistent, une notamment, au niveau de la consommation en gaz. Ceci peut s'expliquer par différents phénomènes :

- ❖ Le gaz *de Montoir* que l'on utilise n'a peut-être pas la même valeur de Pouvoir Calorifique, cela expliquerait pourquoi il est nécessaire d'avoir un débit de combustible plus important que celui indiqué.

- ❖ Le modèle du moteur à gaz est imparfait car 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, cf. illustration ci-dessous :



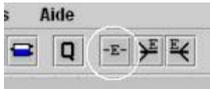
- ❖ Le modèle d'échappement est imparfait ; par la suite, il est expliqué comment créer un modèle plus vraisemblable

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 modules [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)