

Thermoptim : de l'apprentissage à l'optimisation exergetique et systemique des cycles combines et installations de cogeneration et trigeneration a base de turbines a gaz

R. Gicquel

Ecole des Mines de Paris
renaud.gicquel@ensmp.fr

Ce document presente de maniere succincte quelques utilisations possibles du progiciel Thermoptim pour l'etude des turbines a gaz et cycles associes. Il est structure en deux parties :

- l'introduction generale resume les principales caracteristiques et applications de Thermoptim
- la seconde partie traite plus specifiquement des cycles mettant en jeu des turbines a gaz

1 Introduction generale

Le progiciel Thermoptim (www.thermoptim.com) est avant tout un **environnement de modelisation systemique** des technologies energetiques tres original et sans equivalent, qui rend possible l'adoption de nouvelles methodes particulierement fecondes en matiere de pedagogie, de modelisation et d'optimisation.

Le meme outil est aujourd'hui mis en oeuvre par une soixantaine d'utilisateurs pour deux grandes categories d'applications : soit pedagogiques, soit industrielles.

Par assemblage de modeles de composants predefinis ou specifiquement developpes, il permet de représenter très facilement des systèmes énergétiques très variés (figure 1), des plus simples aux plus complexes. Selon les cas, les modèles de ces composants peuvent être soit purement phénoménologiques, soit davantage technologiques, c'est-à-dire capables d'effectuer des dimensionnements ou de simuler le fonctionnement en régime non-nominal. Thermoptim se démarque d'autres logiciels orientés composants par l'accent qu'il met sur les couplages et interactions entre ces composants, c'est-à-dire sur les propriétés systémiques des installations étudiées. Il est ainsi complémentaire des outils spécialisés développés par les constructeurs pour la mise au point et la fabrication de leurs appareils.

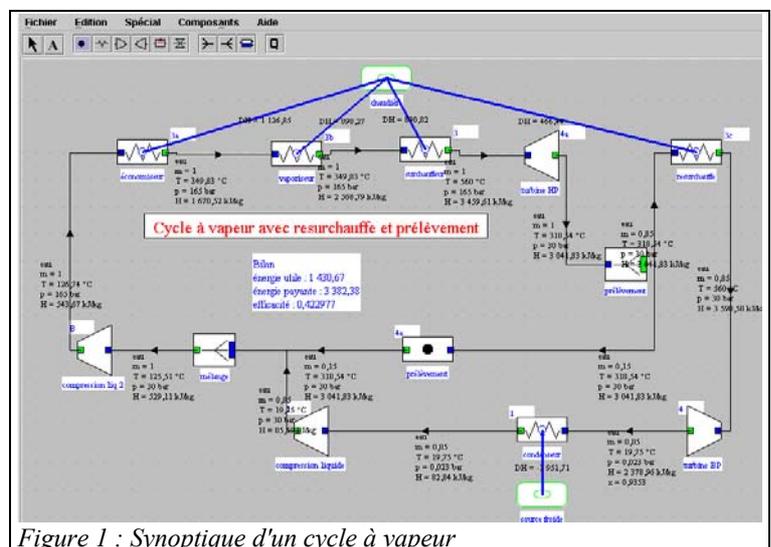


Figure 1 : Synoptique d'un cycle à vapeur

Les bibliothèques et les méthodes de calcul de son noyau lui permettent de couvrir très largement le champ de l'énergétique (cycles à vapeur, cycles de réfrigération, combustions, mélanges humides...), et un mécanisme d'extension lui confère de grandes possibilités en terme d'interopérabilité : ajout de composants externes, pilotage personnalisé de ses calculs... Plus de précisions sur les fonctionnalités de Thermoptim sont données en annexe 1.

1.1 Applications pédagogiques

Utilisé dans plus de 50 établissements d'enseignement supérieur depuis 1997, Thermoptim a prouvé qu'il permet d'améliorer sensiblement l'enseignement de l'énergétique, en quelque sorte de **faire de la thermo sans peine**.

Considérée jusqu'ici comme particulièrement difficile par des générations d'étudiants et d'ingénieurs, la thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques dispose désormais d'une méthode d'apprentissage originale et extrêmement simplifiée basée sur l'utilisation de Thermoptim, dans laquelle, pour étudier les technologies énergétiques,

l'accent est mis davantage sur les aspects systèmes et qualitatifs que sur l'analyse détaillée du comportement des composants et la quantification de leurs performances [1, 2,3, 4].

Les recherches en didactique des sciences appliquées ont montré que l'enseignement d'une discipline s'ancre dans un double référentiel correspondant d'une part aux connaissances scientifiques certifiées telles qu'elles sont produites par les laboratoires de recherche (on parle souvent du savoir ou des connaissances déclaratives), et d'autre part aux connaissances relatives aux techniques et à leurs applications dans la société (on parle alors du savoir-faire ou des connaissances procédurales) [5]. Les premières sont plutôt abstraites et relèvent de la théorie, tandis que les secondes sont plus pratiques et orientées vers l'action. Pour réussir leur apprentissage d'une discipline, il est de plus en plus généralement admis que les élèves doivent construire leur savoir à partir de leurs propres acquis antérieurs, grâce à un va-et-vient entre ces deux référentiels, la modélisation étant un des moyens privilégiés pour le faire.

Pour les systèmes énergétiques, il est malheureusement presque toujours impossible de trouver des modèles à la fois simples et précis. En caricaturant à peine, on pourrait dire que les approches classiques de la discipline sont confrontées à un dilemme, les modèles auxquels elles conduisent étant soit irréalistes, soit incalculables. Ceci explique pourquoi la thermodynamique est souvent considérée comme une matière difficile à enseigner. Le problème est identifié de longue date, et de nombreux efforts ont été faits pour y remédier, mais jusqu'à récemment on manquait encore de solutions, et ceci malgré les efforts déployés par les enseignants et les évolutions des programmes.

Thermoptim permet de représenter de nombreuses technologies énergétiques par simple assemblage graphique de composants prédéfinis. Sans écrire une seule ligne de code, il est possible d'établir des modèles phénoménologiques pour calculer leurs performances avec une très grande précision et tracer leurs cycles dans les divers diagrammes thermodynamiques. Déchargés des difficultés calculatoires habituelles en la matière, les élèves se motivent beaucoup plus pour la discipline et l'assimilent bien mieux.

Mise en œuvre depuis quelques années dans les différents cycles de formation de l'Ecole des Mines de Paris, et utilisée fin 2002 dans une cinquantaine d'établissements d'enseignement supérieur (classes préparatoires aux grandes écoles, IUT, Universités et écoles d'ingénieur, en France et à l'étranger), cette pédagogie vient compléter l'approche classique en proposant aux élèves de s'initier à l'étude des systèmes énergétiques en explorant ou en élaborant par eux-mêmes des modèles des principales technologies de conversion de l'énergie, ceci grâce au progiciel Thermoptim. Ils disposent ainsi d'une plate-forme d'expérimentations virtuelles leur permettant d'élaborer des modèles de nombreux systèmes énergétiques en dépassant les limites que nous venons de mentionner.

Sur la base de l'expérience acquise ces dernières années, on peut regrouper en trois grandes catégories les démarches pédagogiques envisageables lorsqu'on dispose d'un outil comme Thermoptim :

- les activités d'exploration guidées, dans lesquelles l'élève se contente de visualiser des modèles pré-assemblés dans un catalogue d'exemples,
- les activités d'assemblage de modèles à partir de composants prédéfinis, dans lesquelles il doit lui-même construire et paramétrer le système qu'il étudie,
- et enfin l'ajout de nouveaux composants à ceux du noyau existant, ce qui lui demande d'écrire par lui-même le modèle du composant (choix des paramètres caractéristiques, des variables de couplage et du jeu d'équations approprié, définition de l'interface graphique et implémentation informatique).

La première catégorie s'adresse à des débutants, surtout s'ils disposent de peu de temps et s'ils travaillent seuls, par exemple en suivant un module de formation en ligne. La seconde nécessite plus de temps, ainsi qu'un apprentissage plus poussé de Thermoptim, notamment de la part de l'encadrement, qui doit pouvoir corriger des erreurs de construction des modèles. La troisième enfin s'adresse à des élèves déjà familiers du progiciel et suffisamment confirmés en thermodynamique pour pouvoir commencer à concevoir des modèles de composants. Il faut de plus qu'ils aient un minimum de connaissances en programmation avec Java ou au moins C. Des interfaçages avec Fortran sont par ailleurs aussi possibles.

1.2 Applications industrielles

De plus en plus, les technologies énergétiques se présentent comme des systèmes complexes interconnectés aux fonctions multiples, ces systèmes étant eux-mêmes très profondément intégrés et devant s'adapter à des cahiers des charges évolutifs pendant leur durée de vie. Pour les étudier, il est souhaitable de pouvoir disposer d'environnements permettant de faciliter et de sécuriser leur modélisation ainsi que d'optimiser leur structure interne.

Combinant approche systémique et démarche analytique et/ou empirique classique, Thermoptim offre un potentiel significatif dans ce contexte. Son environnement graphique permet de construire visuellement des modèles de nombreux systèmes énergétiques, des plus simples comme un réfrigérateur aux plus complexes comme des centrales électriques à cycle combiné à gazéification de charbon intégrant mettant en jeu plusieurs centaines d'éléments.

Au niveau industriel, Thermoptim facilite et sécurise l'étude des systèmes énergétiques en simplifiant la démarche de modélisation et en la rendant plus sûre, et sa méthode exergétique est utilisée dans une dizaine d'entreprises comme Framatome, EDF ou le CEA pour optimiser les systèmes complexes.

1.2.1 Faciliter et sécuriser la modélisation des systèmes énergétiques

Thermoptim permet à ses utilisateurs de calculer très facilement des cycles thermodynamiques même complexes, et ceci sans avoir à écrire une seule équation ou programmer s'ils utilisent les composants prédéfinis dans le noyau du progiciel.

Non seulement une telle manière de faire simplifie notablement la démarche de modélisation et facilite ultérieurement l'utilisation et la maintenance du modèle, mais surtout elle sécurise sa construction en automatisant l'établissement des couplages entre les différents éléments qui le composent et en garantissant leur cohérence. Ce dernier point est essentiel pour les gros systèmes mettant en jeu plusieurs centaines ou milliers d'équations dont la vérification demande à être automatisée d'une manière ou d'une autre.

Sur la base de l'expérience accumulée par ses utilisateurs et des attentes qu'ils ont exprimées, il est apparu souhaitable d'étendre les capacités de l'outil pour qu'il puisse résoudre des problèmes encore plus difficiles que ceux pour lesquels il avait été initialement conçu : la modélisation avancée de certains systèmes énergétiques dépassait les capacités des versions de Thermoptim diffusées jusqu'à fin 2002, les limites concernant principalement deux dimensions :

- d'une part **le domaine couvert par le progiciel** : seuls les composants prédéfinis disponibles sur la palette de l'éditeur de schémas pouvaient être mis en jeu dans les systèmes énergétiques étudiés. Même s'ils permettaient de représenter la plupart des technologies énergétiques utilisées en pratique, certaines ne pouvaient être modélisées dans Thermoptim. Dans le même esprit, quelques utilisateurs avaient exprimé le souhait de pouvoir modifier les modèles disponibles dans l'outil en introduisant leurs propres équations, ce qui était jusqu'à récemment impossible ;
- d'autre part **la finesse de la modélisation** : les modèles phénoménologiques construits permettaient certes d'étudier le cycle thermodynamique de la technologie étudiée, mais pas d'en effectuer un dimensionnement technologique précis, ni d'en simuler les performances en régime de fonctionnement non-nominal, ces deux dernières problématiques étant beaucoup plus complexes que la première.

De nouvelles fonctionnalités ont été incorporées au progiciel pour lui permettre de dépasser ces limites. Pour élargir le domaine couvert par le progiciel, on distingue dorénavant d'une part le noyau interne de Thermoptim, qui inclut toutes les fonctionnalités des versions antérieures, et d'autre part un mécanisme d'extension qui permet à un utilisateur d'ajouter au noyau des éléments personnalisés (nouveaux corps, nouveaux composants...). Les utilisateurs peuvent ainsi personnaliser leur outil en définissant des corps ou des composants non disponibles dans le noyau de Thermoptim, qui s'intègrent parfaitement dans l'environnement : il devient possible d'étudier l'insertion dans des systèmes complexes de composants comme des piles à combustible, des réacteurs chimiques, des machines à absorption... Par ailleurs, pour pouvoir affiner la modélisation, on a introduit de nouveaux écrans, dits de dimensionnement technologique, ainsi que des algorithmes de calcul en régime non nominal.

1.2.2 Optimiser les systèmes énergétiques complexes grâce aux méthodes exergétiques

Les approches classiques en matière d'optimisation des technologies énergétiques, valables pour optimiser un par un les différents composants d'une installation, restent insuffisantes pour guider le concepteur dans le choix de la meilleure configuration du système complet. L'optimisation des couplages thermiques internes par analyse des pincements ("pinch analysis") fournit une méthode rigoureuse pour cela, en permettant d'optimiser la configuration globale de l'installation, et en garantissant la meilleure cohérence entre l'ensemble des besoins et des disponibilités en énergie.

L'optimisation par intégration systémique, sur laquelle nous travaillons depuis une dizaine d'années, relève des méthodes exergétiques. Dès lors que l'on assemble divers composants entre eux pour former un système, des irréversibilités particulières apparaissent en sus de celles de chaque élément. Ces irréversibilités peuvent être qualifiées de systémiques car elles dépendent principalement des positionnements relatifs des composants. La réduction de ces

irréversibilités permet d'augmenter l'efficacité des systèmes considérés, essentiellement grâce à une meilleure régénération interne. Ces travaux, présentés de manière plus détaillée dans la dernière partie de cette note, ont donné lieu à plusieurs publications et à des collaborations avec des industriels (Babcock, EDF, Framatome). Ils ont permis l'implémentation dans ThermoOptim d'un ensemble d'algorithmes bien validés.

2 Illustrations de l'utilisation de ThermoOptim pour l'étude de cycles de turbines à gaz

Dans cette partie, nous commencerons par indiquer comment ThermoOptim peut être concrètement utilisé pour montrer à des élèves débutants comment modéliser une turbine à gaz de manière réaliste [6], en s'affranchissant de l'hypothèse des gaz parfaits, puis nous donnerons quelques pistes pour des activités pédagogiques connexes.

Ensuite, nous présenterons un certain nombre de modèles de cycles mettant en jeu des turbines à gaz et réalisés avec l'aide de ThermoOptim. Faute de place, et l'objectif poursuivi étant essentiellement d'illustrer les possibilités du progiciel, ces modèles ne seront documentés que de manière très sommaire, des références externes étant fournies lorsqu'elles sont disponibles. Nous présenterons successivement :

- un cycle combiné à un niveau de pression
- une installation de cogénération industrielle
- une installation de trigénération
- une turbine à gaz associée à une pile à combustible du type SOFC
- le couplage dans ThermoOptim à un modèle d'IGCC d'unités de conversion du CO et de capture du CO₂

Enfin, nous parlerons de la mise en œuvre de la méthode d'optimisation en présentant un cycle combiné à deux niveaux de pression.

2.1 Modèle simple de turbine à gaz (apprentissage)

2.1.1 Elaboration du modèle

Une turbine à gaz simple comprend trois éléments interconnectés : un compresseur d'air, une chambre de combustion et une turbine. Pour les représenter, il suffit de sélectionner ces trois composants sur la palette de l'éditeur de schémas, et de les placer sur l'écran de travail. De plus, pour pouvoir bien représenter les choses, il est préférable de prévoir deux arrivées de fluides, l'une pour l'air et l'autre pour le combustible, et une sortie pour les gaz brûlés.

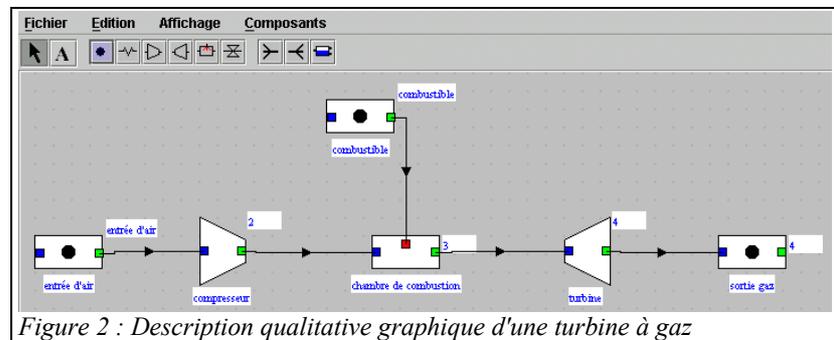


Figure 2 : Description qualitative graphique d'une turbine à gaz

Dans une première étape, ces six composants sont donc successivement placés sur l'écran. Lors du placement, une description minimale de chaque composant est demandée à l'utilisateur : nom du composant et du point de sortie, nom du fluide et débit traversant le composant.

Dans un second temps, les connexions entre ces composants sont établies, en cliquant sur le port de sortie de l'un d'entre eux et en faisant glisser le curseur jusqu'au port d'entrée de l'élément aval. Lors de cette connexion, diverses informations sont propagées d'amont en aval. On obtient alors le schéma de la figure 2, qui constitue le modèle qualitatif de la turbine à gaz. Sur le plan didactique, une telle représentation qualitative est essentielle pour bien assimiler les principes de conception des technologies.

Dans une troisième phase, une interface permet de créer à partir de ce schéma l'ensemble des points et transformations correspondant au problème décrit, et, en double-cliquant sur chaque composant, il est possible de quantifier le modèle en paramétrant chacun de ces éléments pour affiner la description puis effectuer les calculs.

La figure 3 montre par exemple l'écran relatif à la compression. Il faut y préciser si la transformation se fait en système ouvert ou fermé, si elle est représentée par une loi polytropique (comme ici) ou un rendement isentropique, entrer la valeur du rendement correspondant...

Figure 3 : Ecran de calcul de la compression

Enfin, une fois tous les calculs effectués, les performances du cycle sont déterminées et l'état des différents points peut être affiché sur le schéma (figure 4). Selon le paramétrage de la combustion, la composition des gaz brûlés varie.

Une fois ce modèle réalisé, des analyses de sensibilité peuvent être faites, pour par exemple étudier l'influence du rapport de compression sur les performances de la machine.

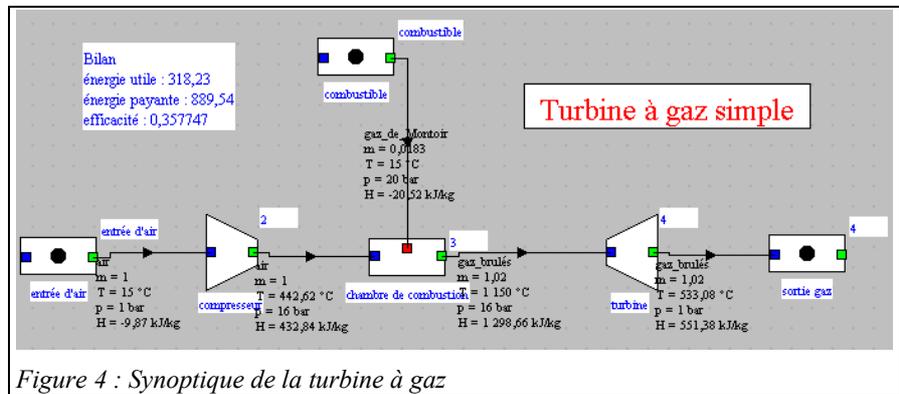


Figure 4 : Synoptique de la turbine à gaz

La représentation de ce cycle sur les différents diagrammes thermodynamiques pose toutefois un petit problème intéressant à discuter avec les élèves, du fait du changement de composition du fluide de travail dans la chambre de combustion : sur le diagramme entropique de l'air (figure 5), les points 3 et 4 n'apparaissent pas sur les bonnes isobares, du fait que leur état a été calculé avec les propriétés thermodynamiques des gaz brûlés et non celles de l'air. En toute rigueur, on ne devrait pas représenter un tel cycle sur le diagramme d'un seul gaz, bien qu'on le fasse fréquemment.

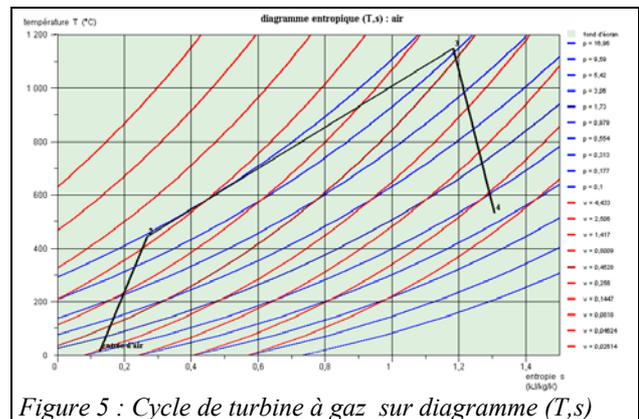


Figure 5 : Cycle de turbine à gaz sur diagramme (T,s)

2.1.2 Bilans énergétique et exergetique

À partir du modèle de turbine à gaz à cycle ouvert élaboré sous Thermoptim, il est facile de dresser le bilan énergétique du cycle. Le rendement est ici égal au rapport du travail fourni par le cycle à la chaleur apportée par la combustion.

Pour constituer le bilan exergetique, il faut commencer par se donner une température et une pression de référence. Nous prendrons ici $T_0 = 288,15 \text{ K}$ (15 °C) et $P_0 = 1 \text{ bar}$, correspondant aux conditions d'aspiration de l'air dans la turbine à gaz. La température de référence étant entrée dans l'écran de paramétrage de Thermoptim, le cycle doit être recalculé, et les résultats exportés pour pouvoir être facilement exploités.

Le bilan exergetique de la chambre de combustion s'établit facilement : par kg d'air aspiré, le combustible libère une exergie égale à 890 kJ. La variation d'exergie des fluides dans la chambre étant égale à 614 kJ, les irréversibilités sont égales à 276 kJ. Le rendement exergetique de la chambre est donc égal à 69 %, alors que son rendement énergétique est de 100 % car elle est adiabatique. Si l'on avait pris en compte des pertes de charge, ce rendement serait un peu plus faible.

Enfin, le cycle n'étant pas fermé, il faut tenir compte de l'exergie résiduelle des gaz d'échappement, qui vient s'ajouter aux pertes par irréversibilités.

bilan enthalpique			bilan exergetique					
évolution	dh	r	Q	Tk	dxq	dxh	dxhi	% pertes globales
compresseur	443	443				402	40	7,08%
turbine	-761	-761				-796	35	6,21%
chambre de combustic	890		890		890	619	270	47,27%
aspiration / échappement						-225	225	39,44%
cycle	571	-318	890			0	571	100,0%
						sigma(xq+)	890	
						sigma(tau+)	0,00	
rendement énergétique		35,77%	rendement exergetique		35,77%			

Figure 6 : Bilans énergétique et exergetique d'une turbine à gaz simple

Dans la figure 6, les pertes sont données en pourcentage du total des irréversibilités. Elle montre qu'elles sont principalement concentrées dans la chambre de combustion et dans l'échappement, et qu'elles sont sensiblement égales dans le compresseur et la turbine (leurs rendements polytropiques sont égaux).

Les pistes d'amélioration des turbines à gaz se déduisent de ce bilan exergetique :

- augmenter la température du cycle pour accroître le rendement de la combustion. Nous avons évoqué les limites technologiques que l'on rencontre à ce niveau ;
- récupérer l'exergie disponible à l'échappement.

2.1.3 Activités pédagogiques connexes

Autour du cycle de turbine à gaz, de nombreuses activités intéressantes les élèves peuvent prendre place [4] :

- comparer l'efficacité du cycle avec celle du cycle de Carnot fonctionnant entre 15 °C (source froide) et 1200 °C (température maximale du cycle), pour se faire une idée de l'écart du cycle réel (0,358) par rapport au cycle idéal (0,797) ;
- étudier l'évolution de l'efficacité du cycle et de la puissance produite lorsque la pression et la température d'entrée turbine varient. En faisant varier la pression du cycle, on obtient l'abaque de la figure 7 donnant l'évolution du rendement en fonction du travail utile. Le rendement maximum est obtenu, à température d'entrée turbine donnée, pour un rapport de compression de 27, et la puissance maximale pour 11 ;
- la plupart des turbines à gaz travaillent en cycle ouvert et rejettent dans l'atmosphère des gaz à température élevée (500 - 600 °C). Il peut quelquefois être possible d'améliorer le cycle en ayant recours à la régénération, c'est-à-dire en valorisant les gaz d'échappement en préchauffant l'air en sortie du compresseur. Une discussion sur les limites de cette solution fournit l'occasion d'un échange fructueux avec les élèves ;
- une autre manière d'améliorer le cycle consiste à injecter de la vapeur formée en utilisant les gaz d'échappement pour vaporiser de l'eau comprimée à l'état liquide ;
- un modèle reprenant les hypothèses du sujet du concours commun 2001 des écoles des mines d'Albi, Alès, Douai et Nantes (turbine à gaz traversée par de l'air supposé parfait) peut aussi être présenté, avec les résultats auxquels il conduit pour quelques rapports de compression (4, 8 et 12), et la représentation des cycles correspondants sur un diagramme entropique équipé des isobares (figure 8). Ce modèle peut être comparé au précédent, beaucoup plus précis du fait que la combustion est effectivement calculée.

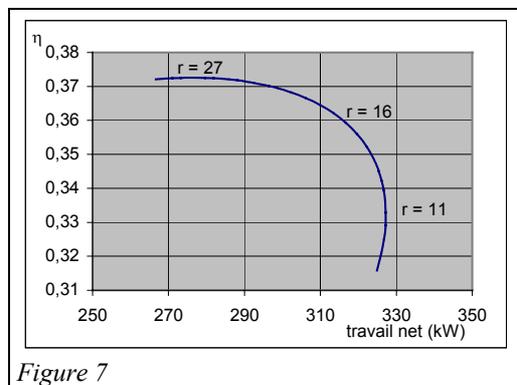


Figure 7

De telles études de variantes peuvent être proposées, notamment en se basant sur les huit exemples proposés dans le chapitre 2 de la référence [2], qui comportent, outre une turbine à gaz à régénération, et une turbine à gaz à injection de vapeur qui viennent d'être évoquées :

- une turbine à gaz à cycle fermé à hélium, l'intérêt de cet exemple étant, l'hélium étant un gaz parfait, de permettre d'obtenir les mêmes résultats avec le progiciel et avec une approche analytique.
- une turbine à gaz à refroidissement intermédiaire
- une turbine à gaz à combustion séquentielle
- une turbine à gaz bi-étagée à refroidissement intermédiaire, réchauffe et régénération. Cet exemple, beaucoup plus compliqué que les précédents, met en jeu deux échangeurs (de type croisé, non mélangé), dont l'un crée une boucle interne : le régénérateur ;
- une turbine à gaz réfrigérée

2.2 Cycle combiné à un niveau de pression

Les excellents rendements qu'atteignent aujourd'hui les centrales électriques à cycle combiné (supérieurs à 60 % sur PCI), sont le résultat de l'intégration en une seule unité de production de deux technologies complémentaires en terme de niveau de température : les turbines à gaz, qui fonctionnent à haute température (dans une machine aérodérivée les gaz entrent typiquement à 1300 °C dans la turbine de détente, et en ressortent vers 500 °C), et les centrales à vapeur, qui opèrent à des températures plus basses (entre 450 °C et 30 °C dans ce cas).

Le principe d'un cycle combiné consiste à faire fonctionner en cascade une ou plusieurs turbines à gaz, suivies d'une centrale à vapeur dont la source chaude est la source froide des turbines à gaz (figure 9). Dans ces conditions, les gaz d'échappement de la turbine à gaz sont valorisés dans une chaudière de récupération où l'on produit de la vapeur qui est ensuite détendue dans une turbine à condensation.

Le cycle combiné ainsi obtenu est un mariage particulièrement réussi dans la recherche de l'amélioration du rendement thermique : avec les matériels disponibles actuellement, les rendements atteints dépassent 55 % et sont donc supérieurs à ceux que l'on peut espérer, même à moyen terme, des futures centrales à vapeur les plus avancées.

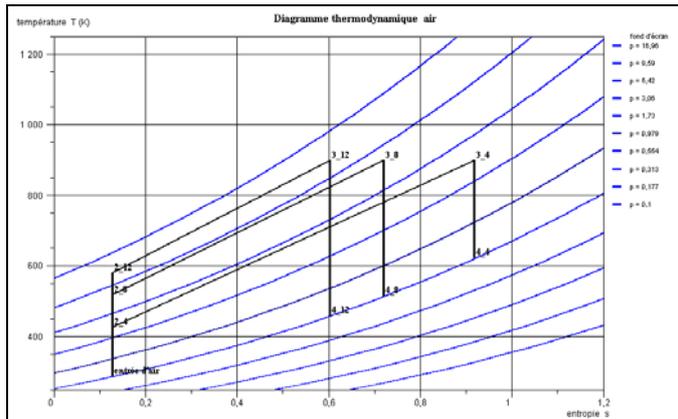


Figure 8 : Représentation de cycles de turbine à gaz à air parfait pour trois rapports de compression

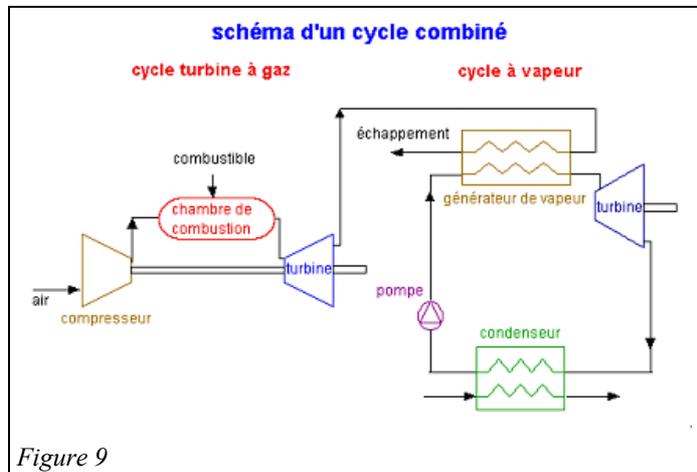


Figure 9

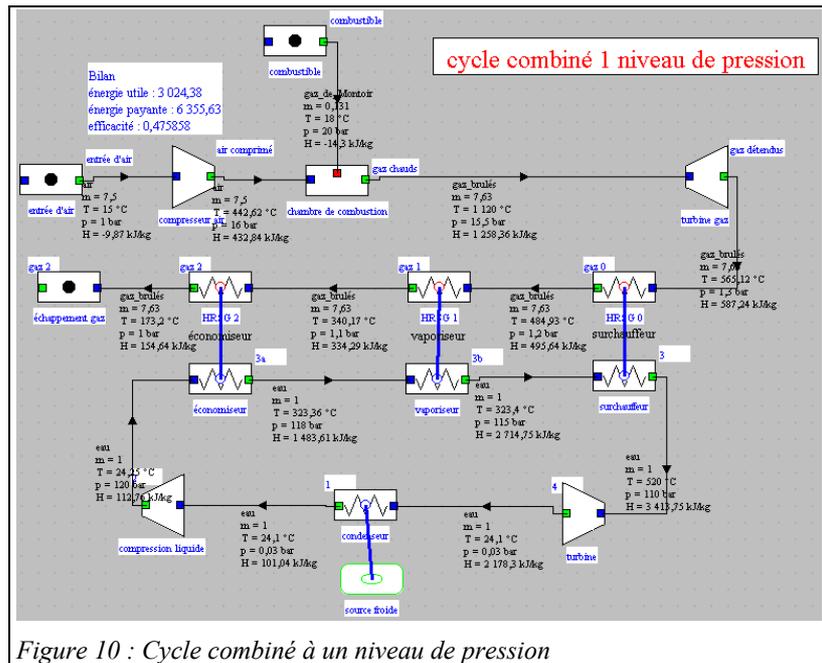


Figure 10 : Cycle combiné à un niveau de pression

Un exercice à la fois simple et intéressant pour les élèves consiste à déterminer le rapport des débits massiques entre les deux cycles pour refroidir au mieux les gaz d'échappement (figure 10).

On peut ainsi leur montrer qu'avec un cycle à un seul niveau de pression, il est impossible de refroidir totalement les gaz sortant de la turbine. La conception d'un cycle à deux ou trois niveaux de pressions étant grandement facilitée si l'on utilise la méthode d'optimisation de Thermoptim, elle sera évoquée plus loin.

Les bilans énergétique et exergetique de ce cycle combiné à un niveau de pression (fourni dans le catalogue d'exemples de Thermoptim) apparaissent figure 11.

bilan enthalpique				bilan exergetique				
évolution	dh	r	Q	Tk	dxq	dxh	dxhi	% pertes globales
HRSG 2	-1371		-1371			-681	212	6,06%
HRSG 1	-1231		-1231			-768	133	3,82%
HRSG 0	-699		-699			-498	102	2,92%
compression liquide	12	12				12	0	-0,01%
turbine	-1235	-1235				-1447	211	6,05%
condenseur	-2077		-2077	288,15		-64	64	1,82%
économiseur	1371		1371			469		0,00%
surchauffeur	699		699			395		0,00%
vaporiseur	1231		1231			634		0,00%
compresseur air	3320	3320				3017	304	8,69%
turbine gaz	-5121	-5121				-5358	237	6,80%
chambre de combustion	6356		6356		6356	4381	1974	56,49%
aspiration / échappement						-257	257	7,35%
						351		
cycle	1254	-3024	4278			188	3494	100,0%
						$\sigma(xq)$	6356	
						$\sigma(\tau+)$	0,00	
rendement énergétique		47,59%	rendement exergetique			45,02%		

Figure 11 : Bilans énergétique et exergetique d'un cycle combiné à un niveau de pression

2.3 Installation de cogénération industrielle

L'installation de cogénération (existante) que nous présentons ici est relativement complexe : elle produit de l'électricité et fournit de la chaleur au réseau de chauffage urbain d'une ville de 30 000 habitants. C'est une installation de type "chaleur-force", où la chaleur constitue le produit de base, l'électricité étant un sous-produit revendu à EDF permettant de mieux valoriser le combustible [7].

Le réseau de chauffage est un circuit d'eau sous pression dont la température est comprise entre environ 90 °C et 130 °C. Le circuit part de la centrale à sa température maximale, puis il parcourt la ville et alimente des sous-stations d'échanges elles-mêmes destinées à assurer le chauffage et/ou le réchauffage d'eau sanitaire d'habitations, d'immeubles, d'hôpitaux, de groupes scolaires... Enfin il revient à la centrale à sa température minimale, pour être réchauffé.

Les besoins en chaleur de la ville varient au cours de l'année en fonction des conditions climatiques. La centrale doit s'adapter à ces besoins et moduler la puissance thermique qu'elle fournit au réseau.

L'installation comporte trois circuits indépendants n'échangeant entre eux que de la chaleur (figure 12).

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

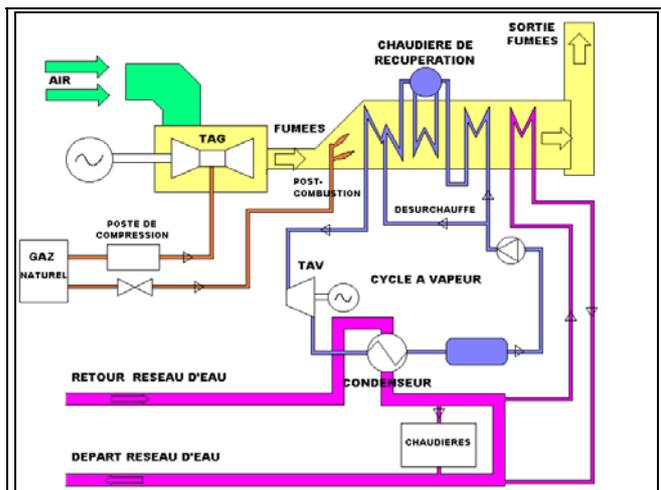


Figure 12 : Schéma de la centrale de cogénération

l'atmosphère, à environ 150 °C, à travers la cheminée ;

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

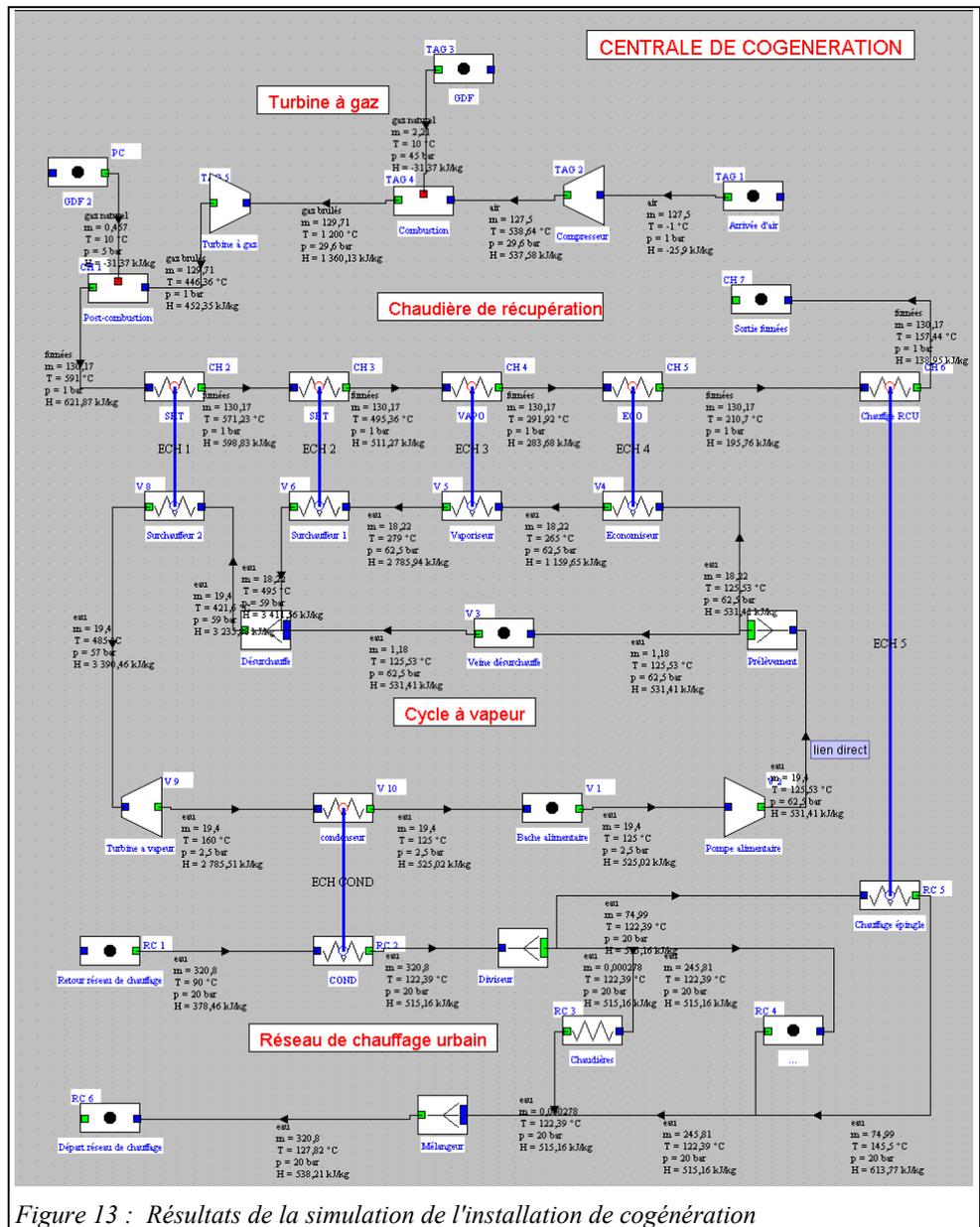


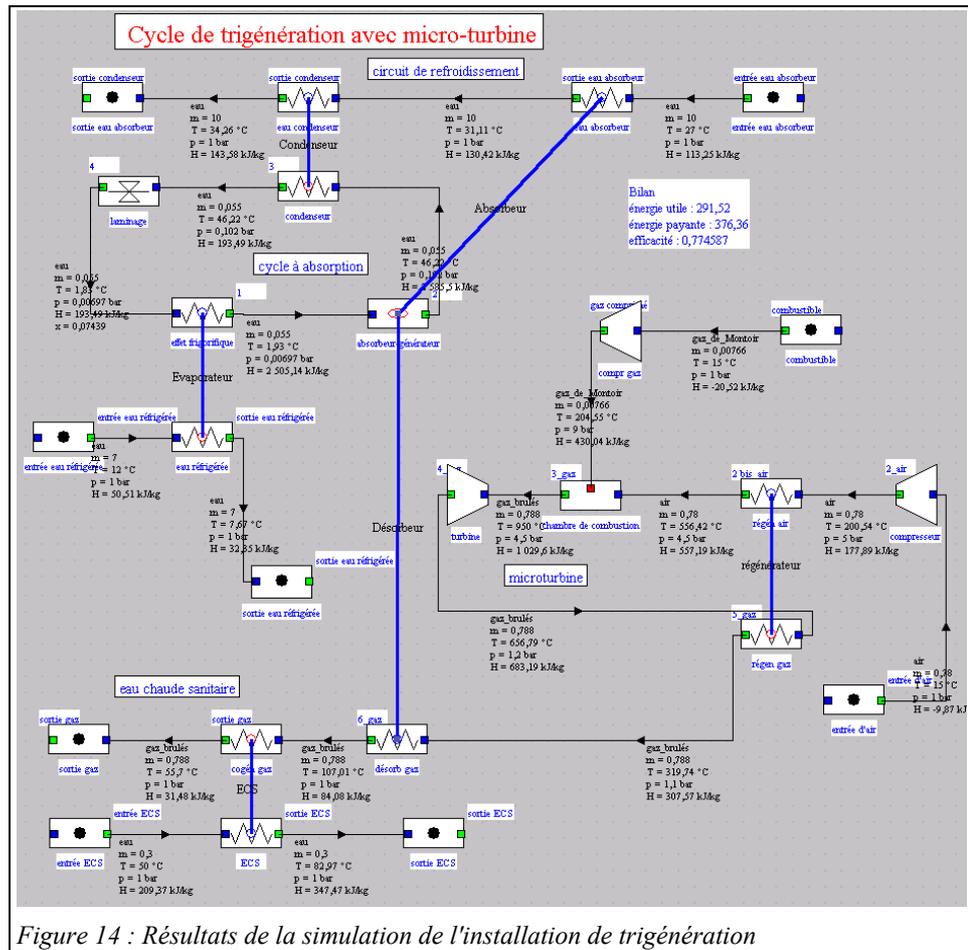
Figure 13 : Résultats de la simulation de l'installation de cogénération

La figure 13 montre le modèle de l'ensemble des trois circuits et leurs interactions thermiques par les échangeurs. Le bilan énergétique de la centrale, ainsi que les différents rendements de l'installation de cogénération : rendements mécanique (ou électrique), thermique, global, et rapport chaleur-force, ont pu être déterminés dans différents cas de fonctionnement.

2.4 Installation de trigénération à micro-turbine

Une micro-turbine à gaz est une turbine à gaz de petite puissance (quelques dizaines de kW), fonctionnant généralement avec un faible rapport de compression et avec un régénérateur pour en améliorer les performances [8].

Nous nous intéressons ici à une installation de trigénération où les gaz sortant d'une micro-turbine de 125 kWe sont utilisés d'une part pour fournir la chaleur nécessaire au désorbeur d'une machine à absorption LiBr-H₂O, et d'autre part pour produire 0,5 kg/s d'eau chaude sanitaire à 80 °C environ. La turbine aspire 0,78 kg/s d'air qui est comprimé à 5 bars, puis passe dans un régénérateur avant d'être porté à 950 °C dans la chambre de combustion brûlant du gaz naturel. Les gaz sont détendus jusqu'à la température de 650 °C puis traversent successivement le régénérateur, le désorbeur et l'échangeur de cogénération. Un compresseur de gaz est nécessaire pour rehausser la pression du gaz naturel du réseau GDF. Il s'agit d'une variante de l'exemple de cogénération 8.5.1 de [2].



La modélisation de cette installation fait appel à une trentaine de composants, ce qui représente plusieurs centaines d'équations couplées. Tous ces composants étant disponibles dans le noyau de Thermoptim, à l'exception du sous-système absorbeur-échangeur de solution-désorbeur du cycle de réfrigération à absorption, qui vient remplacer le compresseur d'un cycle à compression de vapeur, on comprend l'intérêt que présente le mécanisme des classes externes dans un cas comme celui-là : en ajoutant un composant spécialisé pour représenter le module manquant, le travail à effectuer est beaucoup plus réduit que s'il fallait écrire un programme pour modéliser tout le cycle.

Il suffit pour cela de créer un composant externe permettant de représenter le module inexistant, qui d'une part met en jeu le couple LiBr-H₂O, dont les propriétés peuvent être modélisées soit directement dans le composant externe soit dans un corps externe particulier, et d'autre part requiert à la fois un apport de chaleur à haute température au niveau du désorbeur, et une extraction de chaleur à moyenne température au niveau de l'absorbeur. La représentation de ces couplages thermiques est possible en utilisant deux thermocoupleurs, nommés "Absorbeur" et "Désorbeur" sur le schéma de la figure 14 : le composant externe "absorbeur-générateur" calcule les énergies thermiques qui doivent être échangées, et chaque thermocoupleur recalcule la transfo "échange" à laquelle il est connecté.

2.5 Turbine à gaz associée à une pile à combustible du type SOFC

Plusieurs constructeurs ont proposé de réaliser des systèmes composés d'une turbine à gaz couplée à une pile à combustible à haute température du type SOFC (Solid oxide fuel cell), qui présentent de très hautes performances : pour que la pile à combustible fonctionne avec un haut rendement, elle doit être alimentée en combustible et en air comprimés à une pression de l'ordre de 20 bars. Une fraction simplement du combustible étant utilisée, on dispose en sortie de pile d'air appauvri en oxygène et de combustible de PCI réduit, qui peuvent tous deux être utilisés dans une turbine à gaz. Grâce au mécanisme des classes externes, il est possible de créer un composant pouvant représenter la

pile SOFC grâce à un mélangeur externe connecté à un diviseur externe, les calculs étant effectués par ce dernier. Il est ainsi possible de déterminer la variation de composition chimique des gaz entrants et de disposer d'un modèle assez précis pour être connecté au reste du système. Le modèle de la pile associée à la turbine à gaz conduit aux résultats de la figure 15, pour un taux d'utilisation du combustible de 60 % et un rendement de pile de 50 %, le combustible étant du méthane que l'on commence par vapocraquer pour former de l'hydrogène et du monoxyde de carbone.

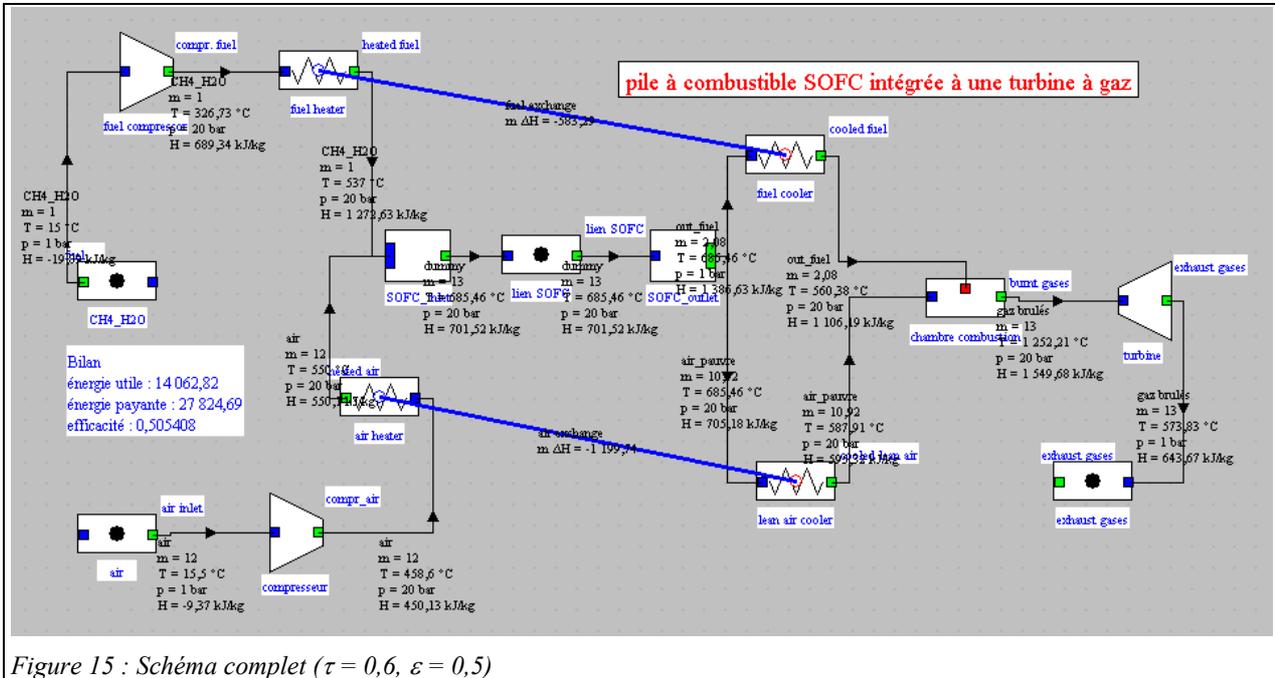


Figure 15 : Schéma complet ($\tau = 0,6$, $\varepsilon = 0,5$)

Les gaz sortant de la turbine étant à 550 °C environ, il y a moyen de prévoir un cycle combiné qui pourrait augmenter le rendement global de 15 points environ, atteignant ainsi près de 65 %. A titre indicatif, les compositions des gaz en sortie de pile et avant entrée dans la chambre de combustion sont données figures 16 et 17.

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO	0,09795918	0,1514938
CO ₂	0,1469388	0,3570395
H ₂	0,2938776	0,03270857
H ₂ O	0,4612245	0,4587582

Figure 16 : Combustible en sortie de pile, PCI : 5 454 kJ/kg

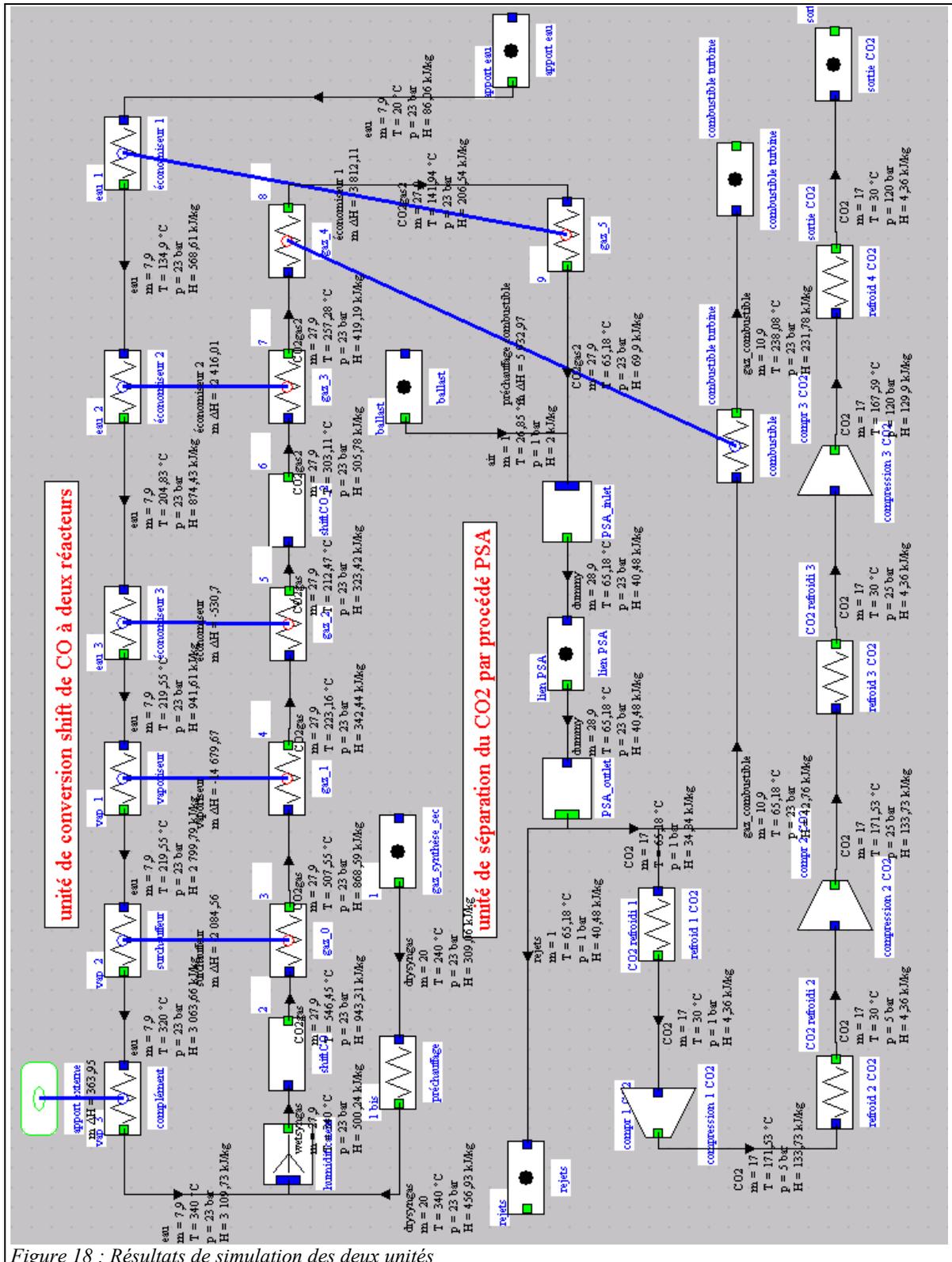
nom du composant	fraction molaire	fraction massique
N ₂	0,8502393	0,8302412
Ar	0,009797892	0,01364416
O ₂	0,1399628	0,1561146

Figure 17 : Air appauvri en O₂ en sortie de pile

2.6 Couplage à une IGCC d'unités de conversion du CO et de capture du CO₂

Dans le cadre d'un Projet de Recherche Intégré du Programme Energie du CNRS [9], nous avons couplé dans Thermoptim des unités de conversion du CO et de capture du CO₂ à un modèle de centrale à cycle combiné à gazéification intégrée (IGCC). Le problème peut ici être résumé de la manière suivante : en sortie de gazéifieur, on dispose, à une pression de 20 bars, d'un gaz dit "de queue", qui contient typiquement 55 % en volume de CO et 20 % de H₂. Le CO₂ est capturé avant la chambre de combustion, par un procédé d'adsorption modulée en pression (PSA), ce qui

permet de traiter un volume de fumées moindre qu'en sortie de centrale et de tirer parti de la pression disponible. Pour cela il faut commencer par convertir le CO en CO₂.



Le procédé complet fait donc appel à deux unités : la première, de conversion shift, met en œuvre deux réacteurs à des températures différentes, capables de convertir 85 % du CO, tandis que la seconde réalise la capture du CO₂ proprement dite. Pour que la réaction shift soit réalisable, le gaz de queue doit être hydraté par de la vapeur à haute température. Enfin, le CO₂ capturé doit être comprimé dans l'état supercritique. Le schéma de la figure 18 montre les résultats d'une simulation réalisée dans Thermoptim, les deux réacteurs shift et le module de capture par procédé PSA ayant été réalisés sous forme de classes externes.

2.7 Mise en œuvre de la méthode d'optimisation : cycle combiné à deux niveaux de pression

Un générateur de vapeur récupérateur (GVR) du type de ceux que l'on utilise pour les cycles combinés constitue un bon exemple d'application pour la méthode d'optimisation de Thermoptim. Dans un tel GVR, la vapeur est produite à plusieurs niveaux de pression (2 à 4), dont les valeurs peuvent être librement choisies dans certaines limites.

Si l'on fait abstraction du support théorique relativement complexe sur lequel elle repose (dérivé de la méthode du pincement avec distinction des irréversibilités de composants et systémiques, [10], [11]), la mise en œuvre de la méthode d'optimisation de Thermoptim est en fait relativement simple à expliquer. Il s'agit d'une variante pour les systèmes énergétiques de la méthode de Linhoff [12], cette dernière s'appliquant à la conception des réseaux d'échangeurs complexes mettant en jeu un grand nombre de fluides comme on en rencontre notamment dans le génie chimique.

Un système énergétique un peu complexe peut mettre en jeu un assez grand nombre de fluides qui échangent de la chaleur entre eux, les uns se réchauffant, les autres se refroidissant. L'appariement de ces fluides peut généralement être fait de nombreuses manières différentes, et le choix de la meilleure architecture n'est pas nécessairement intuitif, loin s'en faut. Pour choisir une configuration d'échangeurs performante, les méthodes dérivées de l'intégration thermique apparaissent aujourd'hui parmi les plus performantes, et présentent en particulier l'avantage de fournir des éclairages qui renforcent le sens physique de l'analyste alors que les méthodes purement automatiques l'obligent à travailler à l'aveuglette.

Notons aussi que l'utilisation de ces méthodes dans un outil de conception des systèmes énergétiques est d'autant plus justifiée que les problèmes d'optimisation qui se posent dans les centrales électriques modernes à très haut rendement ou dans les unités de cogénération font précisément intervenir des pincements (dans les échangeurs de récupération, au niveau du poste d'eau...), alors qu'ils n'apparaissent pas dans les centrales plus anciennes.

Sur le plan pratique, la mise en œuvre de la méthode peut être décomposée en deux grandes phases :

- la première phase consiste à décrire le système sans faire d'hypothèse a priori sur les appariements dans les échangeurs (on parle de système non contraint), et à chercher à optimiser l'énergie récupérée (puissance électrique produite, puissance cogénérée...) en s'assurant, grâce aux algorithmes d'intégration thermique, qu'il n'y a pas d'incompatibilité de température. La procédure (itérative) consiste à faire varier par simulation les paramètres clés du système (débits, températures, niveaux de pression) et à en optimiser les performances, tout en vérifiant par la

méthode du pincement que l'on n'introduit pas de besoins additionnels de chaleur à haute température et que l'on minimise les rejets à basse température. Le progiciel fournit un environnement de modélisation où les fonctions de simulation et la méthode d'optimisation sont profondément interconnectées, afin de pouvoir facilement faire varier l'ensemble des paramètres caractéristiques du système étudié.

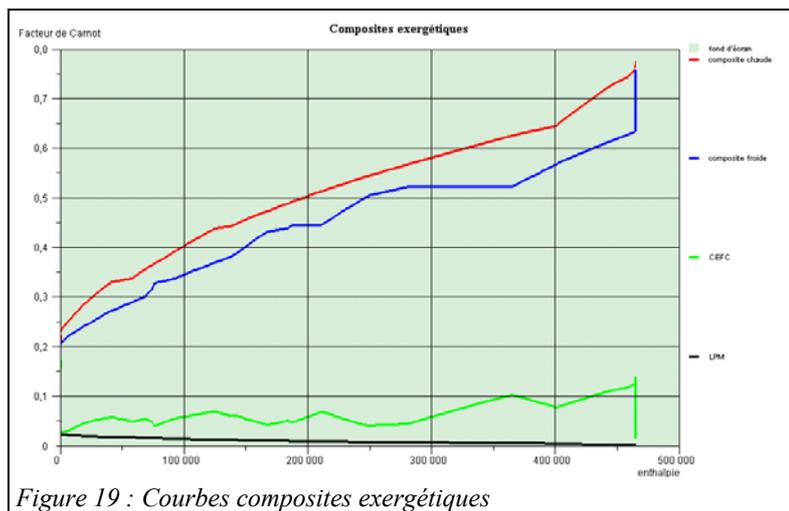


Figure 19 : Courbes composites exergetiques

La distinction entre les irréversibilités de composants (spécifiques de leur fonctionnement propre) et les irréversibilités systémiques (liées à l'architecture du système) permet de connaître les degrés de liberté qui existent en matière de conception. C'est au cours de cette phase que prennent place les allers et retours entre les personnes chargées de l'optimisation et celles qui conçoivent les procédés. L'un des intérêts de la méthode est qu'à tout moment, il est possible de se faire une idée des enjeux associés à l'optimisation et des limites que l'on peut atteindre. Les outils graphiques classiques de l'intégration thermique sont accessibles, ainsi que la Courbe des Ecarts de Facteurs de Carnot, bien adaptée au problème posé (figure 19).

- la seconde phase, une fois le système optimisé, consiste à chercher une configuration d'échangeurs compatible (la mise en œuvre préalable de la méthode d'optimisation garantit qu'il en existe une), en appariant judicieusement les fluides existants et en divisant (en série ou en parallèle) ceux qui doivent l'être. Pour cela, Thermoptim propose des blocs d'échangeurs qui permettent d'opérer par étapes et de définir ainsi progressivement le réseau, en effectuant l'appariement des fluides en partant des zones les plus contraintes, les pincements. Il arrive que des contraintes technologiques ou économiques obligent à choisir une configuration d'échangeurs différente de celle qui permettrait d'atteindre les performances optimales. C'est au cours de cette étape que l'on s'en aperçoit.

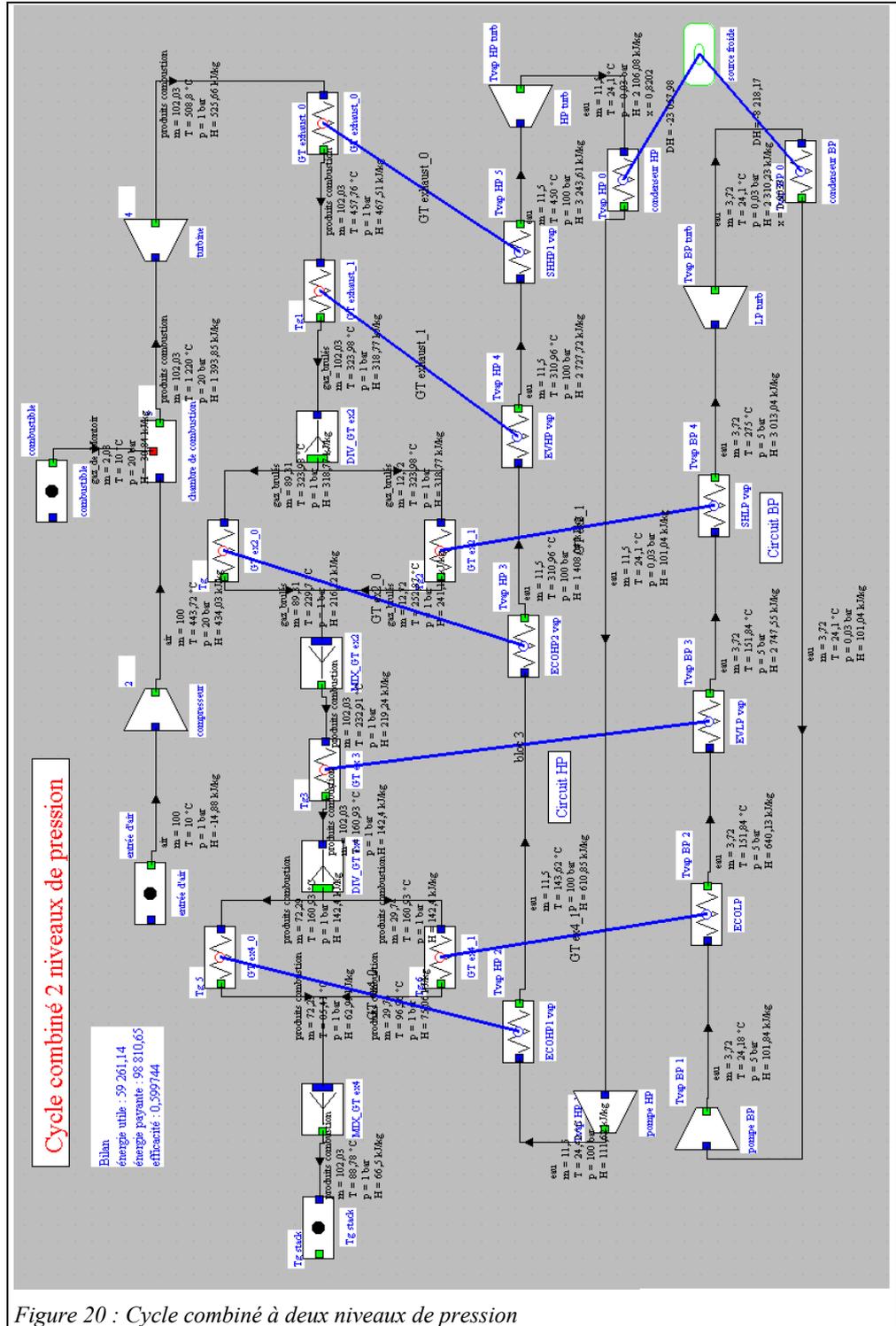


Figure 20 : Cycle combiné à deux niveaux de pression

Nous sommes jusqu'ici partis de l'idée que le réseau d'échangeur n'était pas connu a priori. S'il l'est, Thermoptim permet bien évidemment de le modéliser et de le

tester. Il est ainsi possible de comparer la configuration initialement proposée avec celle à laquelle aurait conduit une optimisation non contrainte.

Il est aussi possible de n'imposer qu'une partie des échangeurs et d'optimiser le reste du réseau. Thermoptim permet alors de combiner les échangeurs contraints et les échangeurs libres, ce qui facilite l'optimisation globale du système.

Les outils d'optimisation proposés par Thermoptim sont accessibles à partir d'un écran particulier, complémentaire de celui qui est utilisé pour la simulation. Les modifications effectuées dans l'un des deux environnements sont, automatiquement ou sur commande, facilement reportées dans l'autre.

Cette méthode a été mise en œuvre pour résoudre des problèmes industriels, chez Babcock pour la conception d'une installation de cogénération, où elle a permis de réduire de 8 % le dimensionnement auquel le Bureau d'Etudes était arrivé en utilisant sa méthode classique [13], ainsi que chez EDF, pour l'optimisation d'unités de cogénération, ainsi que d'une centrale à cycle combiné à gazéification de charbon de 282 MW, où elle a conduit à un gain de puissance électrique de près de 3,3 %, soit 9,4 MWe [14] (la figure 19 est tirée de cette étude).

L'étude détaillée d'un cycle combiné à deux niveaux de pression est présentée au chapitre 12 de [2]. Elle conduit aux résultats de la figure 20.

En créant un composant externe spécifique, il est possible d'affiner le modèle de turbine à gaz jusqu'ici présenté, en prenant en compte un refroidissement des premiers aubages de détente. Un tel travail n'est cependant justifié que pour modéliser des machines à fort prélèvement ou à refroidissement par de la vapeur d'eau. Un élève du CNAM (A. Sgubini) est précisément en train de réaliser un tel composant pour modéliser un cycle combiné à trois niveaux de pression du type STAG 109H utilisant la turbine MS9001H de General Electric.

3 Conclusion et perspectives

Cette note présente de manière synthétique quelques applications de Thermoptim pour l'étude des cycles mettant en jeu des turbines à gaz. Le progiciel permet comme on l'a vu de mener des études très variées, des plus simples destinées à des débutants à certaines relativement complexes, notamment lorsqu'il s'agit d'intégrer entre elles plusieurs techniques complémentaires comme dans le cas des cycles combinés et des unités de cogénération ou trigénération.

Une version de Thermoptim, que l'on peut qualifier de phénoménologique, est pleinement opérationnelle depuis la mi 2002. Les composants du noyau permettent déjà de décrire un grand nombre de technologies énergétiques, et le mécanisme d'extension par addition de classes externes élargit notablement le potentiel de l'outil, un utilisateur pouvant sans difficulté insérer des composants spécifiques, ceci au prix d'un travail modique et tout en bénéficiant d'un environnement de modélisation sécurisé.

Les développements actuels concernent d'une part les aspects dimensionnement et non-nominal, notamment pour les cycles utilisant des turbines à gaz, et d'autre part le pilotage par des applications externes, comme les modules de formation à distance (FAD) ou les tuteurs intelligents.

Nous espérons, en développant ce type d'outil, faciliter l'accès à la thermodynamique pour de nombreux ingénieurs et scientifiques qui étaient jusqu'ici rebutés par la complexité des calculs à réaliser et leur caractère rébarbatif.

4 Références

- [1] GICQUEL R., Systèmes Energétiques, Tome 1 : méthodologie d'analyse, bases de thermodynamique, Thermoptim, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, février 2001.
- [2] GICQUEL R., Systèmes Energétiques, Tome 2 : applications, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, novembre 2001.
- [3] GICQUEL R., Utilisations pédagogiques de Thermoptim, note interne disponible sur demande, janvier 2003.
- [4] GICQUEL R., Activités pédagogiques avec Thermoptim : Exploration de divers cycles, problématique d'optimisation, Ecole des Mines de Paris, Stage LIESSE, 24 octobre 2002.

- [5] TOUSSAINT J., (Coord.) Didactique appliquée de la physique-chimie, Nathan Pédagogie, Paris, 1996.
- [6] GICQUEL R., Les Aides Logicielles Pédagogiques : une réponse aux nouveaux défis posés à l'enseignement de la thermodynamique appliquée. Exemple de la famille Thermoptim, Colloque International TICE 2000, UTC de Troyes, 18-20 octobre 2000.
- [7] CANDELIER S., Modélisation d'une installation de cogénération industrielle avec Thermoptim, Ecole des Mines de Paris, juillet 2001, Paris.
- [8] GICQUEL R., Trigénération par micro-turbine à gaz et cycle à absorption, note interne disponible sur demande, janvier 2003.
- [9] TONDEUR D., Rapport du PRI CO2, Programme Energie du CNRS, mars 2003.
- [10] GICQUEL R., Méthode d'optimisation systémique basée sur l'intégration thermique par extension de la méthode du pincement : application à la cogénération avec production de vapeur. Revue Générale de Thermique, tome 34, n° 405, octobre 1995.
- [11] GICQUEL R., MODICS. Généralisation de la méthode d'optimisation systémique aux systèmes thermiques avec échangeurs imposés. Revue Générale de Thermique, tome 35, p. 423-433, 1996.
- [12] LINNHOFF B., Use pinch analysis to knock down capital costs and emissions, Chemical Engineering Progress, august 1994, pp. 32 - 57
- [13] LEIDE B., GICQUEL R., Systemic approach applied to dual pressure HRSG, International Gas Turbine & Aeroengine Congress and Exhibition, Orlando, Florida, 2-5 June 1997
- [14] GICQUEL R., WILLIAMS M., AUBERT K., Optimisation du cycle eau-vapeur d'une centrale IGCC, Conférence hpc'01, Paris, septembre 2001.