



## **Rapport final**

**Action "Thermoptim" dans le cadre d'UNIT  
réalisée par le Groupe des Ecoles des Mines**

**Convention n° 2005-40**

**16 août 2006**

**Porteur du projet : R. Gicquel  
Ecole des Mines de Paris**

## 1. Introduction

La Convention n° 2005-40 signée le 17 novembre 2005 correspond à la deuxième phase du projet Thermoptim au sein d'UNIT. Le présent rapport final, établi fin août 2006, rend compte de l'avancement du programme de travail correspondant à cette convention. Il en constitue le **quatrième livrable**.

Rappelons que l'objectif principal de cette deuxième phase est le développement de composants énergétiques à faible impact environnemental (CEFIE) pour l'enseignement de l'énergie avec Thermoptim, afin de pouvoir présenter aux élèves non seulement les systèmes énergétiques classiques, mais aussi les systèmes innovants à faible impact environnemental (SIFIE), ce qui demande de développer des ressources pédagogiques jusque là inexistantes.

## 2. Avancement des activités prévues dans le cadre de la deuxième phase

### 2.1. Rappel des activités prévues

Comme indiqué dans l'annexe technique de la Convention n° 2005-40, les travaux prévus comprennent d'une part la mise au point de huit nouvelles classes externes (modèles Java) permettant de représenter de nouveaux composants énergétiques, notamment à faible impact environnemental, d'autre part la réalisation de huit fiches-guides de TD pour faciliter la tâche des enseignants, et enfin des développements complémentaires de soutien sur le plan informatique, pour l'animation de la communauté, et en matière de diffusion internationale. Ces développements, intégrés dans le portail Thermoptim-UNIT, constituent le **premier livrable** de notre convention.

Ce programme de travail a été largement mené à bien, les développements réalisés dépassant les engagements pris, douze nouvelles classes et huit fiches-guides ayant été réalisées.

Signalons dès à présent que les fiches-guides de TD, dont l'idée était apparue lors de l'exécution de la première phase du projet, constituent un nouveau type de ressource pédagogique particulièrement intéressant à double titre :

- elles permettent en premier lieu de proposer aux élèves des activités personnelles de travaux dirigés, exercices ou projets, besoin qui était jusqu'ici mal résolu, les ressources antérieures couvrant uniquement le cours et les exercices guidés pas à pas ;
- elles constituent en second lieu un moyen particulièrement souple de réappropriation et personnalisation par les enseignants de ressources déjà développées, étant donné leur structure et leur contenu, qui est plus indicatif que normatif.

Les réactions de la Communauté UNIT-Thermoptim à ces fiches-guides ayant été très positives, nous prévoyons d'en rédiger d'autres dans l'avenir.

Suite aux demandes des enseignants exprimées en 2005 et 2006, les thèmes prioritaires ont été les suivants : les énergies renouvelables, les piles à combustible, les turboréacteurs, la cogénération, les tours de refroidissement, la capture du CO<sub>2</sub> et les indicateurs sur les gaz à effet de serre (GES).

## 2.2. Classes externes développées

Au cours des six derniers mois, le travail a principalement porté sur la modélisation de la combustion de la biomasse et sur celle du calcul des gaz humides depuis les classes externes, notamment pour les tours de refroidissement.

noeud  type

veine principale   m global

isobare h global

T global

nom transfo	m abs	T (°C)	H
air	3,2	20	-4,86
dry fuel	1,25	20	-6,42
humidity	1,25	20	83,99

**biomass combustion**

NH3 (% dry mass)

C solid (% dry mass)

quench T (°C)

CO2 diss. rate

H2O in combustion (%)

lambda

Figure 1 : composant gazéifieur de biomasse

Ces développements ont permis de mettre au point six nouvelles classes externes modélisant des CEFIE :

- un modèle de batterie de refroidissement avec condensation plus rigoureux que celui qui existait auparavant a été établi. Alors que dans le précédent (extThopt.ColdBattery), l'efficacité de condensation était exprimée par rapport à la fraction molaire d'eau contenue dans le gaz, le nouveau (extThopt.DehumidifyingCoil) la définit par rapport à l'humidité saturée à la température de la batterie froide. Ce nouveau modèle pourra être utilisé dans de nombreux cycles mettant en jeu une extraction d'eau ;
- un modèle d'humidification de gaz par lavage (extThopt.WaterQuench) a été mis au point. Il sert notamment à représenter le lavage d'un gaz de synthèse produit par un gazéifieur de biomasse ;
- une variante du précédent correspond à un modèle de saturateur d'eau pour cycle de turbine à gaz à air humide (classe extThopt.Saturator) ;

- deux modèles de tours de refroidissement à contact direct et indirect ont été bâtis et testés (classes `extThopt.DirectCoolingTower` et `extThopt.InDirectCoolingTower`). Ils permettent d'inclure de tels composants dans les systèmes thermodynamiques étudiés avec Thermoptim, ce qui était impossible auparavant, malgré tout l'intérêt qu'ils présentent pour de nombreuses applications industrielles ;
- un composant permettant de simuler un gazéifieur à tirage vers le bas a été réalisé (classe `extThopt.BiomassCombustion` ; la figure 1 montre son écran, et la figure 2 la composition du gaz de synthèse brut).

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,09095625	0,1780174
H2O	0,2800306	0,2243506
O2	0	0
N2	0,3332404	0,4151491
CO	0,1293294	0,1611006
H2	0,1626134	0,01457812
Ar	0,003829836	0,006804206

Figure 2 : composition du gaz de synthèse brut (PCI : 3,4 MJ/kg)

The screenshot shows a software interface for calculating the carbon balance of a gas turbine. The interface is divided into several sections:

- transfo:** sortie gaz
- type:** externe
- type énergie:** autre
- débit imposé:**  (unchecked)
- débit (kg/s):** 101,82686
- point amont:** 4
- point aval:** 5
- m ΔH (kW):** 0
- CO2 emissions:**
  - Gas naturel (dropdown)
  - duration (h): 7500
  - CO2 emissions (kg/s): 5.0132
  - CH4 emissions (g/s): 1.2938
  - N2O emissions (g/s): 0.8086
  - annual CO2 emissions (kt): 152.13
  - annual C emissions (kt): 41.490
  - Comment: (empty text box)

Figure 3 : Bilan carbone d'une turbine à gaz

Six autres classes externes, ne faisant pas appel à ces nouvelles fonctionnalités, ont aussi été réalisées, dont cinq pour des CEFIE :

- d'une part pour représenter les tuyères et les diffuseurs des turboréacteurs, ainsi qu'un pilote externe pour coordonner l'enchaînement des calculs dans ce type de moteur un peu particulier ;

- d'autre part pour modéliser deux réacteurs du type de ceux utilisés dans les cycles innovants de production d'électricité avec capture du CO<sub>2</sub> faisant appel à l'oxy-combustion, la première pour un réacteur-membrane du cycle AZEP (Advanced Zero Emission Power), et la seconde pour le réacteur du cycle CLC (Chemical Looping Combustion)
- enfin, une classe permettant de calculer les émissions de carbone et de gaz carbonique pour les cycles mettant en jeu des combustions a été mise au point (figure 3). La manière de l'utiliser est expliquée dans une fiche-guide de TD.

Ces nouvelles classes, qui constituent le **second livrable** de notre convention, sont documentées, et ont été incluses dans la modélothèque. Elles sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/thermoptim/modelotheque/modeles-disponibles>

### 2.3. Rédaction des fiches-guides de TD

Huit fiches-guides de TD sont complètement terminées, dont sept pour des SIFIE :

- la première permet d'étudier le fonctionnement des centrales électriques solaires et de montrer comment on peut les modéliser de manière réaliste avec Thermoptim. Le TD est centré sur la modélisation d'une centrale solaire du type SEGS mise au point par la société Luz, représentée comme une simple variante d'un cycle de Rankine, où la chaudière est remplacée par un générateur de vapeur dont le caloporteur est réchauffé par le champ de capteurs ;
- la seconde traite des turboréacteurs et montre aux élèves comment construire des modèles de turboréacteurs de complexité croissante (simple flux au point fixe au sol avec une variante d'une turbine à gaz munie d'une tuyère, simple flux en vol avec diffuseur d'entrée, configuration à double flux)
- la troisième traite des systèmes de génération d'électricité à partir d'un étang solaire à gradient inverse ;
- la quatrième est consacrée à des piles à combustible du type SOFC. Elle permet de construire des modèles de complexité croissante, et s'appuie sur les séances Diapason S61 à S63 développées lors de la première phase ;
- la cinquième permet aux élèves d'étudier le fonctionnement de centrales électriques utilisant le gradient thermique des océans (OTEC pour Ocean Thermal Energy Conversion). Deux variantes sont étudiées : la plus simple correspond à un cycle fermé, et la seconde à un cycle ouvert qui présente l'avantage de produire aussi de l'eau potable ;
- la sixième est centrée sur la modélisation des tours de refroidissement, son objectif étant de montrer le gain de COP apporté à une machine frigorifique industrielle par l'utilisation d'une telle tour à la place d'un refroidissement par air du condenseur ;
- la septième présente un cycle de capture du CO<sub>2</sub> par oxycombustion appelé cycle AZEP pour Advanced Zero Emission Power. Elle a été préparée en partenariat avec l'EPFL ;
- la huitième explique comment calculer les émissions de carbone et de gaz carbonique pour les cycles mettant en jeu des combustions.

Ces fiches-guides, qui constituent le **troisième livrable** de notre convention, sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/fiches-guides-td-projets/fiches-guides>

En parallèle, l'EFPG (Prof. P. Nortier) et l'Ecole des Mines de Douai (Prof. J-L. Harion) travaillent sur la préparation de deux autres fiches-guides sur la cogénération, en papeterie pour le premier établissement et industrielle pour le second.

Un important travail de modélisation des cycles de capture du CO<sub>2</sub> par oxycombustion (qui constituent des SIFIE) a été réalisé au cours des derniers mois, permettant de comparer les performances de six variantes (cycle oxyfuel, cycle Matiant, cycle Graz, Water cycle, cycle AZEP, chemical looping combustion). La figure 4 montre le schéma d'un cycle de Graz dans Thermoptim. Des fiches-guides de TD sur la capture du CO<sub>2</sub> basées sur ces cycles pourront être préparées dans les prochains mois en complément de celle sur le cycle AZEP.

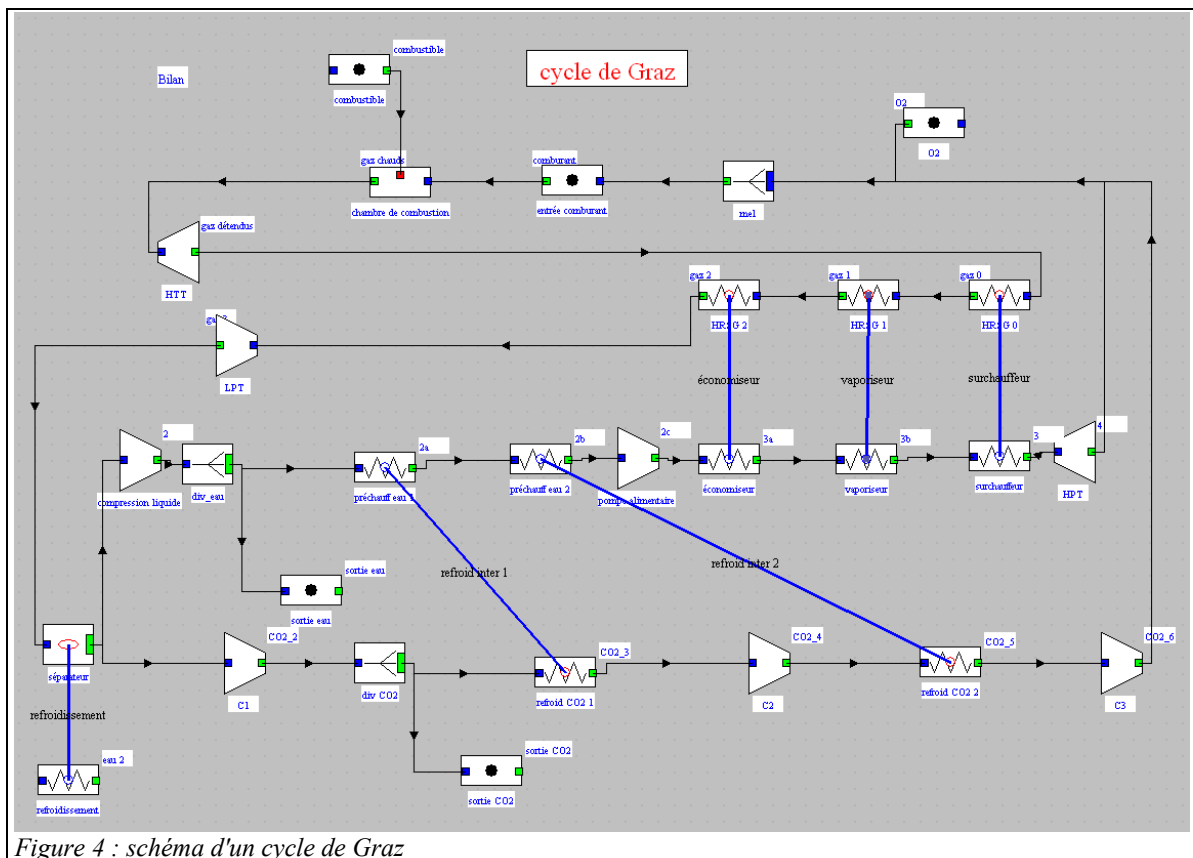


Figure 4 : schéma d'un cycle de Graz

En revanche, la fiche sur les centrales nucléaires initialement prévue a dû être différée du fait des difficultés rencontrées pour collecter les informations auprès d'EDF.

A l'Insa de Lyon, un module Diapason comportant quatre séances sur l'air humide a été réalisé par le Prof. P. Chantrenne. Elle est disponible à l'adresse suivante :

<http://www.thermoptim.org/SE/TraitAir/module.html>

## 2.4. Diffusion internationale

Le site de la Communauté d'Enseignants a été traduit en anglais (figure 5) et en espagnol (figure 6), et des contacts ont été pris avec des collègues étrangers, notamment canadiens et suisses. Un des premiers résultats de cette collaboration a été la préparation de la fiche-guide sur le cycle AZEP en partenariat avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL, Prof. D. Favrat, F. Marechal).

Quatre communications ont été préparées (et acceptées) par le porteur du projet pour des conférences internationales :

- Révolutionner la formation en thermodynamique, Colloque International l'Université à l'Ere du Numérique (CIUEN), Paris, 22-24 mai 2006
- Place des simulateurs dans la conception d'environnements pédagogiques virtuels : réflexions méthodologiques et mise en œuvre pour l'énergétique, Colloque SIMO 2006, le virtuel dans la réalité quotidienne, Toulouse, 11-12 octobre 2006 (conférence invitée)
- Fondements méthodologiques d'une reconception pédagogique de l'énergétique : le modèle RTM(E) et la théorie de la charge cognitive, Colloque TICE 2006, Toulouse, 25-26 octobre 2006 (présentation orale)
- Les modules sonorisés Diapason, une solution xml, à la fois pédagogiquement efficace et économique, pour la mise en ligne de leurs cours et TD par les enseignants, Colloque TICE 2006, Toulouse, 25-26 octobre 2006 (poster)

The screenshot shows the English homepage of the THERMOPTIM website. At the top, there is a navigation bar with four tabs: 'UNIT community', 'simulation', 'instruction • teaching', and 'training • industry'. The 'instruction • teaching' tab is currently selected. Below the navigation bar, the page title is 'THERMODYNAMIC SIMULATION AND ON-LINE INSTRUCTION' and there is a 'home' link. The main content area contains several paragraphs of text. The first paragraph describes the UNIT consortium. The second paragraph describes the THERMOPTIM project. The third paragraph states that the new approach is named after the software it is based on. The fourth paragraph describes the THERMOPTIM project as a broad and coherent group of resources. The fifth paragraph states that the UNIT consortium supports the development of this project. At the bottom left, there is the UNIT logo (Université de Technologie). At the bottom right, there is a footer with navigation links, flags for France, UK, and Spain, and visitor statistics.

Figure 5 : page d'accueil du site en anglais

comunidad UNIT | simulación | formación • enseñanza | formación • industria

thermoptim

SIMULACION EN TERMODINAMICA Y FORMACION EN LINEA

comunidad unit

recursos producidos

unit  
universitat numèrica  
impulsant la tecnologia

Fase 1

El programa de trabajo preveía el desarrollo de una decena de clases externas; trece nuevas clases fueron finalmente desarrolladas. Han sido elaboradas sesiones DIAPASON para constituir recursos pedagógicos directamente utilizables tanto por los alumnos como por los profesores. Las clases externas están presentadas de manera contextual en los módulos DIAPASON correspondientes. Son descargables a partir de estos módulos según la licencia CECILL (  ), o a partir de la modeloteca.

contexto

pedagogías posibles

correspondientes UNIT

programa de trabajo

recursos producidos

capitalización de experiencia

Campo	Tipo de recursos	Título de los recursos
<b>Captura del CO2</b>	clase externa	Deshumidificador del gas convertido
	clase externa	Nodo externo: absorción del CO2 en el metanol
	clase externa	Nodo externo: regeneración del metanol
	módulo DIAPASON	<a href="#">Captura del CO2 mediante absorción en metanol (  )</a> Sesión S71 (52 etapas) sobre la captura del CO2 por un ciclo de absorción del metanol.
<b>Energías renovables</b>	clase externa	Sensor de concentración solar
	módulo DIAPASON	<a href="#">Conversiones Termodinámicas de las energías renovables (  )</a> Sesión ENR01 (35 etapas) sobre las energías renovables, con ejercicios/proyecto.
<b>Pilas de combustibles</b>	clase externa	Pila SOFC - complejidad de nivel 1
	clase externa	Pila SOFC - complejidad de nivel 2
	clase externa	Pila SOFC - complejidad de nivel 3

inicio | novedades | contacto | plan del sitio | info sitio

visitantes desde el 01/12/05 | visitantes conectados

Figure 6 : page en espagnol des ressources produites par la Communauté

## 2.5. Animation de la Communauté, Réflexions pédagogiques

Les travaux d'animation de la Communauté des Enseignants UNIT-Thermoptim ont essentiellement porté sur l'amélioration du site Web, la préparation d'un site partenaire pour le Club ALET, et l'organisation de deux téléconférences et de la réunion de Sophia Antipolis des 10 et 11 juillet, commune avec celle du Club ALET. Leurs comptes-rendus ont été placés sur le site de la Communauté. Ces travaux ont été complétés par de nombreux échanges directs avec les membres de la Communauté.

Les réflexions pédagogiques se sont poursuivies afin d'affiner les méthodes proposées en tenant compte des retours d'expérience maintenant disponibles.

Une nouvelle approche beaucoup plus progressive et détaillée du cours d'auto-formation en ligne a été définie, basée sur la définition de trois pages Web par cursus. La progression y est découpée en trois grandes étapes, dont l'articulation est soigneusement expliquée aux élèves afin qu'ils puissent mieux suivre l'avancement de leur apprentissage :



1) l'acquisition des concepts et des outils, consacrée aux rappels de thermodynamique, à l'étude des cycles de base, à la découverte des technologies mises en oeuvre et à l'apprentissage de Thermoptim

2) la consolidation des notions vues lors de la première étape, avec des compléments théoriques sur l'exergie et les échangeurs, l'étude des variantes des cycles de base, des cycles combinés et de la cogénération

3) les approfondissements et la mise en application personnelle, donnant lieu à l'étude de cycles novateurs et/ou plus complexes que les précédents ainsi qu'à des réflexions sur les perspectives technologiques, à l'occasion de mini-projets menés seuls ou en groupes. Les fiches-guides réalisées permettent notamment d'étoffer cette étape.

Une présentation de notre approche pédagogique et des liens vers des références utiles ont été mis en ligne : <http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/pedagogie/presentation-methode>.

Par ailleurs, les élèves pouvant rencontrer des difficultés pour bien maîtriser les fonctionnalités avancées de Thermoptim, une séance Diapason présentant une série de recommandations méthodologiques et de trucs et astuces de modélisation a été réalisée et mise en ligne à l'adresse suivante : [http://www.thermoptim.org/SE/seances/S07\\_trucs/seance.html](http://www.thermoptim.org/SE/seances/S07_trucs/seance.html)

The screenshot shows a presentation slide with the following content:

- Title:** Saisie des noms du point et du corps en sortie de mélangeur
- Diagram:** A schematic diagram of a compressor system. It features two 'air ambiant' (ambient air) sources on the left, a central 'admission' component, and a 'compression' component on the right. Arrows indicate the flow of air from the ambient sources through the admission and compression components.
- Dialog Box:** A window titled 'compression : compression' is open, showing the 'port d'entrée' (input port) settings. The 'nom du point' (point name) is set to '1' and the 'nom corps' (body name) is set to 'admission diesel'.
- Navigation:** A sidebar on the left lists various steps of the presentation, with 'Saisie des noms du point et du corps en sortie de mélangeur' highlighted. At the top right, there are controls for 'écoute' (listen) and 'pause'.

Figure 6 : séance Diapason sur les trucs et astuces pour Thermoptim

## 2.6. Développements informatiques

En complément des travaux réalisés lors de la première phase, le travail a porté sur les deux points suivants :

- l'API des classes externes a encore été améliorée sur plusieurs points
- la gestion des exceptions a été complétée, notamment du fait de l'introduction des nouvelles fonctionnalités relatives aux calculs humides et aux combustions

Mais surtout, l'utilisation des ressources mises en ligne a montré qu'il serait maintenant souhaitable d'effectuer un travail d'aide à la navigation dans l'ensemble de ce dispositif afin notamment de faciliter la construction de parcours pédagogiques personnalisés en fonction des objectifs visés par les différentes catégories d'apprenants.

Cela nous paraît d'autant plus important que les développements en cours et envisagés (nouveaux modèles, fiches-guides...) vont avoir pour effet d'augmenter encore l'étendue de cet environnement.

Nous nous sommes donc proposé d'utiliser les fonctionnalités d'outils comme Plone ou CPS pour concevoir un portail d'entrée convivial, partant des besoins des différentes catégories d'utilisateurs, et capable de guider ces derniers en fonction de quelques profils-types.

Les gains es-comptés sont un meilleur accès aux ressources pour les utilisateurs, avec un seul point d'entrée et un temps d'apprentissage très réduit, des droits d'accès variables selon les catégories (élèves/enseignants, partenaires d'UNIT ou non...), des facilités pour intégrer les contributions des différents membres de notre communauté...

Figure 7 : prototype de portail de ressources UNIT-ThermoOptim

Un prototype de portail a été réalisé sous CPS. Son adresse est : <http://www.thermooptim.org/>. Son élaboration sera poursuivie dans les mois qui viennent.