



## **Rapport final**

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

**Convention n° 2005-40 (IV)**

**mars 2009**

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

## 1. Introduction

La Convention n° 2005-40 (IV) signée le 5 mars 2008 correspond à la quatrième phase du projet Thermoptim au sein d'UNIT. Le présent rapport final, établi en mars 2009, rend compte de l'exécution du programme de travail correspondant à cette convention.

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

### 2.1. Rappel des activités prévues

Comme indiqué dans l'annexe technique de la Convention n° 2005-40 phase 4, les travaux prévus comprennent :

- la poursuite de la réalisation du portail Thermoptim-UNIT en rédigeant notamment des guides méthodologiques à l'attention des élèves et des enseignants, portant par exemple sur les énergies renouvelables, les analyses entropiques et exergétiques
- l'initiation d'une démarche de gestion documentaire autour de la chaîne éditoriale SCENARichain
- la poursuite de la diffusion internationale des ressources disponibles.

### 2.2. Poursuite de la réalisation du portail Thermoptim-UNIT

Rappelons que la rubrique **Guides méthodologiques** regroupe diverses recommandations méthodologiques destinées à faciliter le calcul des systèmes énergétiques. Son principal objectif est de sensibiliser le lecteur aux diverses problématiques abordées et de suggérer quelques pistes pour trouver des solutions appropriées, sans chercher à les traiter de manière exhaustive.

Les thèmes mentionnés dans la convention, les énergies renouvelables et les analyses entropiques et exergétiques constituent des sujets d'intérêt majeur dans le contexte actuel de choc pétrolier et de recherche de solutions énergétiques alternatives. Sur le plan méthodologique, ils soulèvent de nombreuses difficultés, qui justifient qu'une attention particulière leur soit accordée dans notre portail.

Nous avons donc créé une sous-rubrique intitulée "**Simulation de systèmes à énergie solaire**", où est expliqué comment prendre en compte la variation de la ressource (estimation du rayonnement solaire reçu par un capteur d'orientation et d'inclinaison quelconques, construction et utilisation des Courbes de Fréquences Cumulées (CFC), conception de programmes de simulation horaire, méthodes simplifiées de calcul des installations basées sur les CFC).

A titre d'exemple, la figure 1 montre le résultat d'une simulation horaire de centrale électro-solaire à basse température, et la figure 2 l'énergie mensuelle thermique utilisable à Ajaccio, pour une inclinaison de 60°, en fonction du seuil, notion fondamentale dans la détermination des performances d'un capteur solaire.

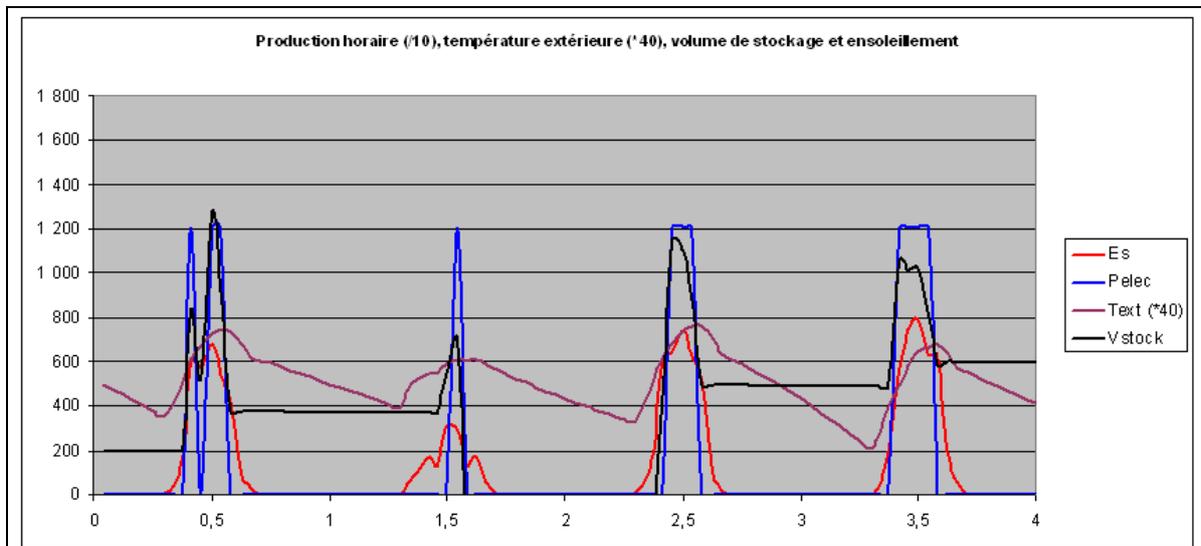


Figure 1 : Données climatiques et production d'une centrale électro-solaire

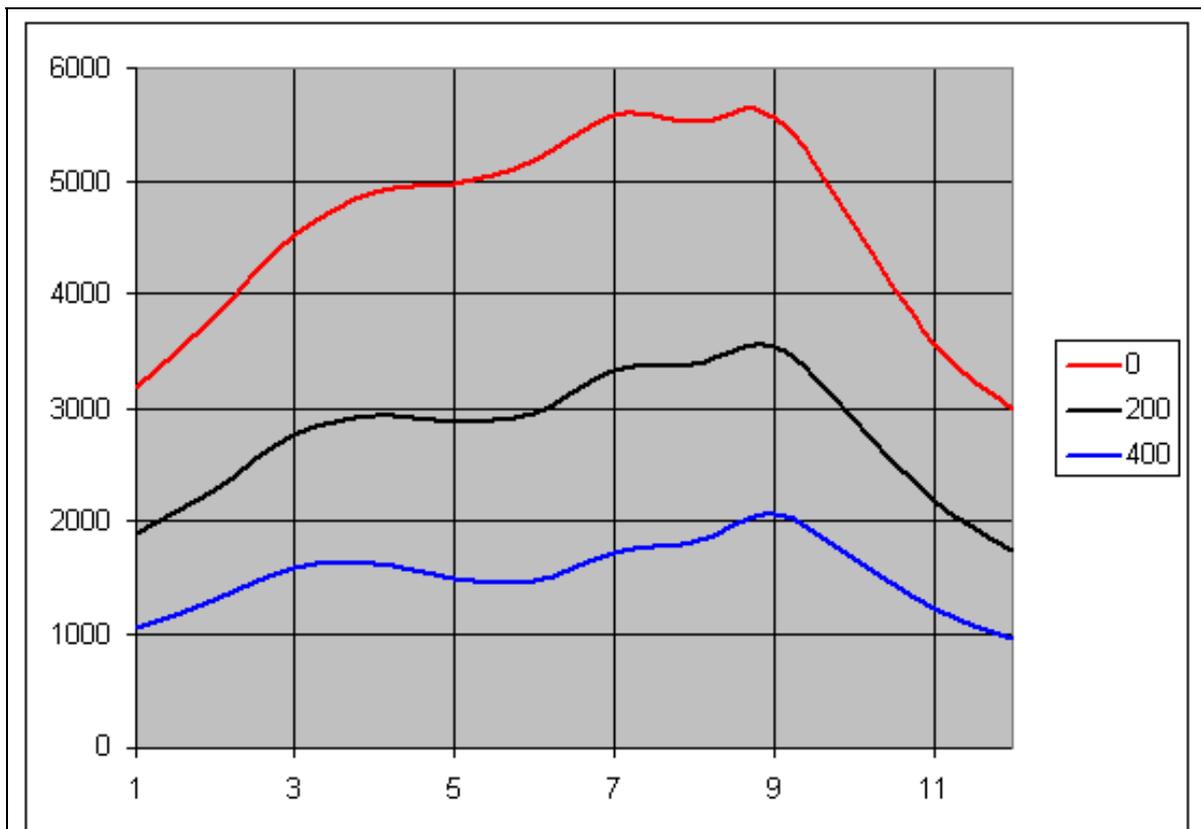
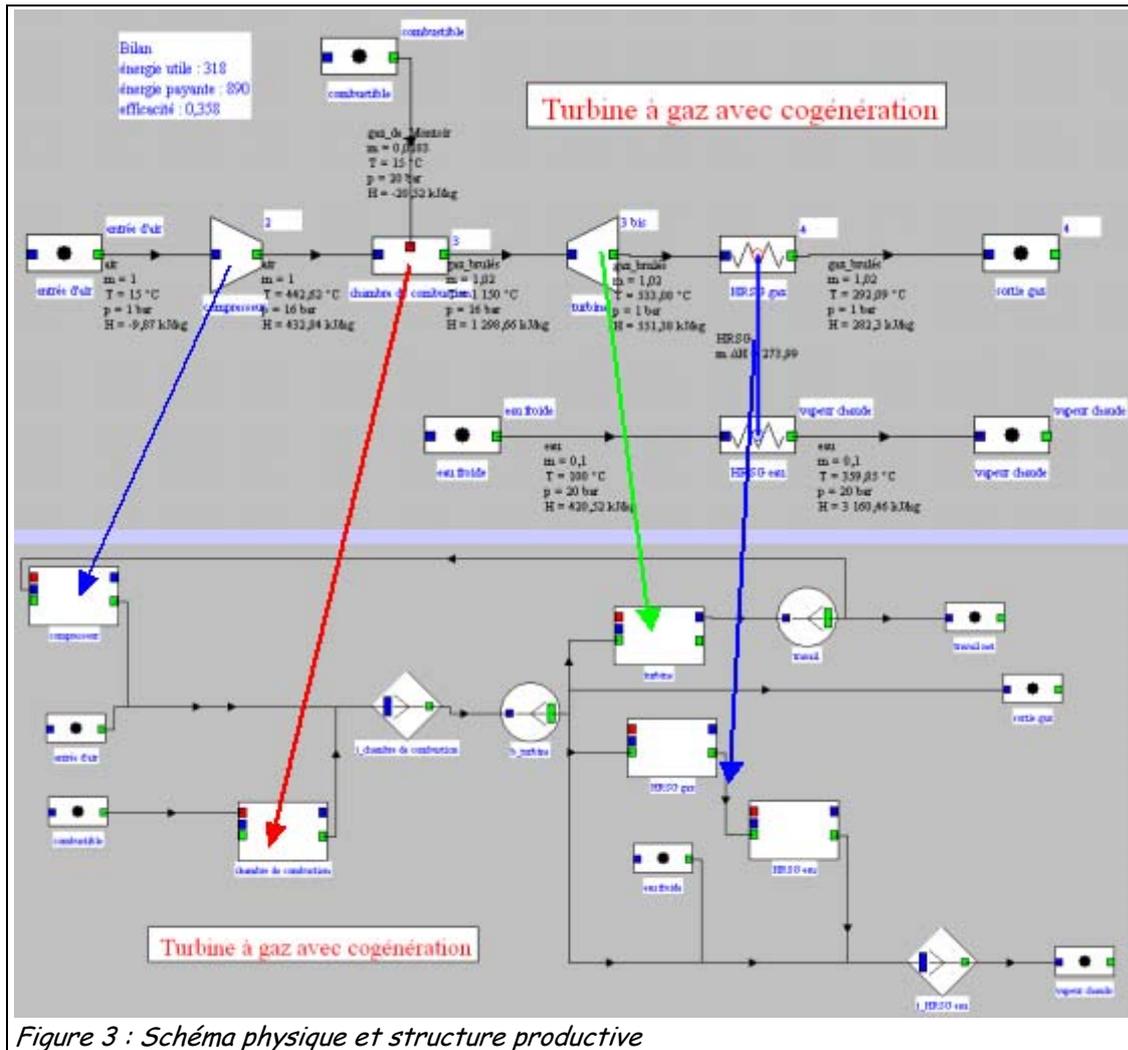


Figure 2 : Energie mensuelle utilisable à Ajaccio, 60 °, en fonction du seuil

Les méthodes entropiques et exergetiques sont de plus en plus considérées comme parmi les mieux adaptées pour effectuer des études d'optimisation, car elles permettent de tenir compte aussi bien des quantités d'énergie mises en jeu que de leur qualité. Toutefois, leur mise en œuvre pratique pose de nombreux problèmes d'ordre méthodologique. Pour faciliter leur apprentissage par les apprenants, nous avons créé deux sous-rubriques intitulées "**Analyses exergetiques**" et "**Optimisation systémique / méthode du pincement ou intégration thermique**".



Dans la première, nous avons présenté les principes permettant de bâtir des bilans exergetiques d'une manière générale, et, de manière plus spécifique, en utilisant le concept de structure productive, qui permet de dresser presque automatiquement les bilans exergetiques de projets complexes grâce à ThermoOptim.

L'exemple de la figure 4 montre la correspondance entre le schéma physique (en haut) et la structure productive (en bas) d'une turbine à gaz utilisée en cogénération. A chaque composant est

associée une unité productive ou dissipative qui permet, moyennant éventuellement certains paramétrages complémentaires, d'établir le bilan exergétique du composant.

Le bilan exergétique peut être calculé une fois que la structure productive est établie, ce que Thermoptim permet de faire quasiment automatiquement, et une fois que les paramétrages exergétiques manquants sont fournis (par exemple, les puissances mécaniques ne sont pas connectées, tout comme ne sont pas définies les températures des sources externes avec lesquelles des exergies-chaaleur sont échangées, s'il y en a).

Dans le tableau présenté figure 5, chaque ligne résume le bilan exergétique d'un composant, sauf la dernière qui correspond au bilan global. L'échangeur étant représenté par les deux UPD des fluides appariés, il apparaît dans ce bilan par les lignes des deux fluides mises côte à côte, son irréversibilité étant la somme des valeurs entre parenthèses.

composant	Resource	Product	exergy efficiency	irreversibilities	% total	settings
combustible	897,041	0	0	0	0	
compresseur	442,71	402,238	0,908581	40,472	0,08269	
turbine	796,411	760,94	0,955462	35,471	0,07247	
chambre de combustion	0	613,557	0,683978	275,983	0,5639	
eau froide	4,593	0	0	0	0	
vapeur chaude	114,658	114,658	0	0	0	
HRSG gaz	157,839	0	0	(157,839)	(0,3225)	HRSG
HRSG eau	0	110,065	0	(-110,065)	(-0,2249)	HRSG
sortie gaz	0	0	0	89,751	0,1834	loss
global	901,634	432,888	0,4572	489,451	1	

Figure 5 : Bilan exergétique du projet complet

Dans la seconde sous-rubrique intitulée "**Optimisation systémique / méthode du pincement ou intégration thermique**", nous avons actualisé la présentation de la méthode d'optimisation de Thermoptim, rajouté une page de présentation de l'intégration thermique, avec un lien vers trois nouvelles séances Diapason d'initiation à cette méthode.

En complément de ces actions explicitement identifiées dans l'annexe technique de la convention, de nombreuses ressources ont été développées et mises en ligne : fiches thématiques, modèles de corps et composants pour Thermoptim, séances Diapason (cf. section 2.5).

### 2.3. Initiation d'une démarche de gestion documentaire autour de la chaîne éditoriale SCENARIchain

La collaboration initiée en 2007 avec l'Ecole des Mines d'Albi avait montré que, pour les documents de Thermoptim, il serait possible de définir une structuration commune, afin de permettre une édition sous SCENARIchain. Elle avait conclu qu'il serait préférable de définir un modèle éditorial spécifique.

Cette collaboration s'est poursuivie sur ce sujet. Elle a permis d'identifier diverses fonctionnalités manquantes dans le modèle éditorial Opale GEM (liens internes, images au format jpg, tableaux avec pointeurs, gestion du multilingue, activités de TD Thermoptim), qui vont lui être ajoutées afin de permettre une édition sous SCENARIchain des ressources numériques du portail. Dans ces

conditions, il apparaît inutile de développer un modèle spécifique, la nouvelle version d'Opale GEM en cours de réalisation devant suffire pour nos besoins.

Par ailleurs, le principal problème auquel nous étions confrontés sur ce sujet était de pouvoir récupérer dans l'environnement SCENARIchain l'ensemble des ressources numériques qui avaient progressivement été incorporées dans le portail ThermoOptim-UNIT depuis la mi-2006, la difficulté étant que CPS ne fournit qu'un accès page à page à ces ressources. Récupérer à la main un ensemble de plus de 1300 fichiers en changeant le format pour qu'ils soient structurés correctement sous SCENARIchain représentait un travail considérable qu'il fallait simplifier autant que possible et sécuriser.

Une collaboration entre F. Baillon de l'Ecole des Mines d'Albi, K. Oliver et N. Boyer de l'Ecole des Mines de Paris, a permis la mise au point d'une interface dédiée basée sur XSLT, capable de convertir les fichiers html extraits de CPS en fichiers xml compréhensibles par SCENARIchain (cf. annexe). Il a alors été possible d'effectuer l'ensemble du travail de récupération, de telle sorte que nous disposons maintenant d'un clone du portail modélisé avec OpaleSup Advanced 3 et SCENARIchain, et que nous pourrions dorénavant concevoir les futures pages du portail directement à partir de la chaîne éditoriale, une seconde interface permettant de générer des pages html compréhensibles par CPS. Dès que la nouvelle version d'Opale GEM sera disponible, nous l'utiliserons, car elle nous donnera accès aux liens internes.

Il s'agit d'une **avancée très intéressante qui garantit la pérennisation de nos ressources** en permettant leur portage dans les environnements de déploiement futurs, dont on peut légitimement supposer qu'ils disposeront de capacités d'importation de ressources structurées sous xml, ce qui n'est pas le cas des portails actuels.

L'ensemble des ressources déployées sur le portail pourra ainsi être transmis au secrétariat d'UNIT dans l'environnement SCENARIchain.

## 2.4. Diffusion internationale

La traduction des ressources pédagogiques en anglais a été poursuivie, le portail étant progressivement mis à jour.

Divers enseignants étrangers (Algérie, Canada, Maroc, Tunisie) nous ont contactés pour disposer des droits d'accès aux pages du portail contenant les divers corrigés, que les élèves ne peuvent consulter. Une collaboration avec l'Institut National des Sciences de l'Ingénieur et de la Technologie (INSAT) de Tunisie a été initiée en 2008 sur les méthodes exergétiques.

Le portail ThermoOptim-UNIT a par ailleurs été présenté comme l'un des exemples de bonnes pratiques préconisées par UNIT dans le cadre de divers échanges internationaux assurés par la Présidence d'UNIT, notamment en Jordanie, au Québec et dans le cadre du projet d'Union pour la Méditerranée (UPM). Ces présentations devraient déboucher sur un renforcement des collaborations.

La fréquentation du portail par des utilisateurs étrangers a d'ailleurs significativement crû au cours des dix-huit derniers mois.

## **2.5. Animation de la Communauté, Réflexions pédagogiques**

Les travaux d'animation de la Communauté des Enseignants UNIT-Thermoptim ont d'une part porté sur l'extension du portail et la préparation de l'espace partenaire pour les CPGE et le Club ALET. Ils ont été complétés par de nombreux échanges directs avec les membres de la Communauté. Une réunion commune du Club ALET et de la Communauté des Enseignants UNIT-Thermoptim s'est déroulée à Sophia Antipolis les 7 et 8 juillet 2008.

Trois stages de formation à Thermoptim ont été organisés (18-19 septembre 2008 à Paris, 24-25 septembre 2008 à Saint Mandrier, 24-26 février 2009 à Paris). Ils ont regroupé une trentaine de stagiaires, dont la moitié était composée d'enseignants membres de la Communauté.

Une collaboration structurée avec la Marine Nationale a par ailleurs été mise en place courant 2008. Elle a permis le développement et la mise en ligne sur le portail de séances Diapason communes basées sur des Applications Pédagogiques Informatisées (API) initialement créées par la Marine. De nombreux échanges pédagogiques ont pris place avec les enseignants "énergie" des écoles de la Marine, et sont venues nourrir nos propres démarches.

Une première séance permettant aux élèves de comprendre le fonctionnement d'un attelage piston-bielle-vilebrequin a été réalisée. Elle s'appuie sur une présentation des différents composants de l'attelage puis de leur fonctionnement lorsqu'ils sont couplés, l'ensemble ayant été modélisé sous SolidWorks par G. Ober.

Une seconde séance de conception analogue permet aux élèves de comprendre le mécanisme de commande des soupapes par arbre à cames, grâce à un modèle SolidWorks complémentaire.

Une troisième séance illustre le fonctionnement de moteurs à 2 et 4 temps. Les différentes phases de fonctionnement du moteur ont été distinguées en remodelant légèrement les API initiales (4 phases pour le moteur à 4 temps, 6 pour le 2 temps), et des bandes-son ont été écrites et enregistrées pour chaque phase. La séance Diapason présente l'ensemble grâce à un scénario enchaînant progressivement ces étapes, jusqu'à reconstitution des API initiales.

Alors que celles-ci étaient certes superbes mais difficilement compréhensibles pour un non-initié, la séance Diapason constitue un outil d'auto-formation très facile d'emploi et de grande efficacité pédagogique.

Ces trois séances Diapason ont été mises en ligne aux adresses suivantes :

[http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s35\\_pbv-systeme](http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s35_pbv-systeme)

[http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s35\\_cds](http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/s35_cds)

[http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s35\\_4t2t-moteurs](http://www.thermoptim.org/sections/enseignement/cours-en-ligne/seances-diapason/seance-s35_4t2t-moteurs)

Les réflexions pédagogiques au sein de la Communauté se sont ainsi poursuivies et ont permis d'affiner les méthodes proposées en tenant compte des retours d'expérience maintenant disponibles.

## **3. Evaluation de l'utilisation de Thermoptim**

### **3.1. Problème posé**

Le Ministère souhaite disposer d'informations aussi précises que possible sur les utilisations qui sont faites des ressources numériques dont il finance le développement.

La Direction d'UNIT nous a donc demandé d'essayer d'estimer au mieux ces utilisations. Dans cette section, nous expliquons comment nous avons procédé.

### **3.2. Diffusion de Thermoptim**

Thermoptim est diffusé commercialement depuis 2001 par l'équipe de développement logiciel du CSTB.

Une soixantaine d'écoles d'ingénieurs et d'universités françaises, une quinzaine d'étrangères et une quarantaine de classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) ont acquis ce logiciel.

Deux types de licences existent :

- des licences annuelles, vendues par paquets de 10 (275 Euros HT les 10), destinées à l'enseignement (version dite Education salle de cours)
- des licences définitives, vendues à l'unité, à partir de 550 Euros HT la licence.

En toute rigueur les versions définitives sont limitées à un poste par licence, mais rien n'empêche de les installer sur plusieurs. De même, si la licence annuelle est périmée, une modification de l'horloge de la machine permet d'ouvrir le logiciel.

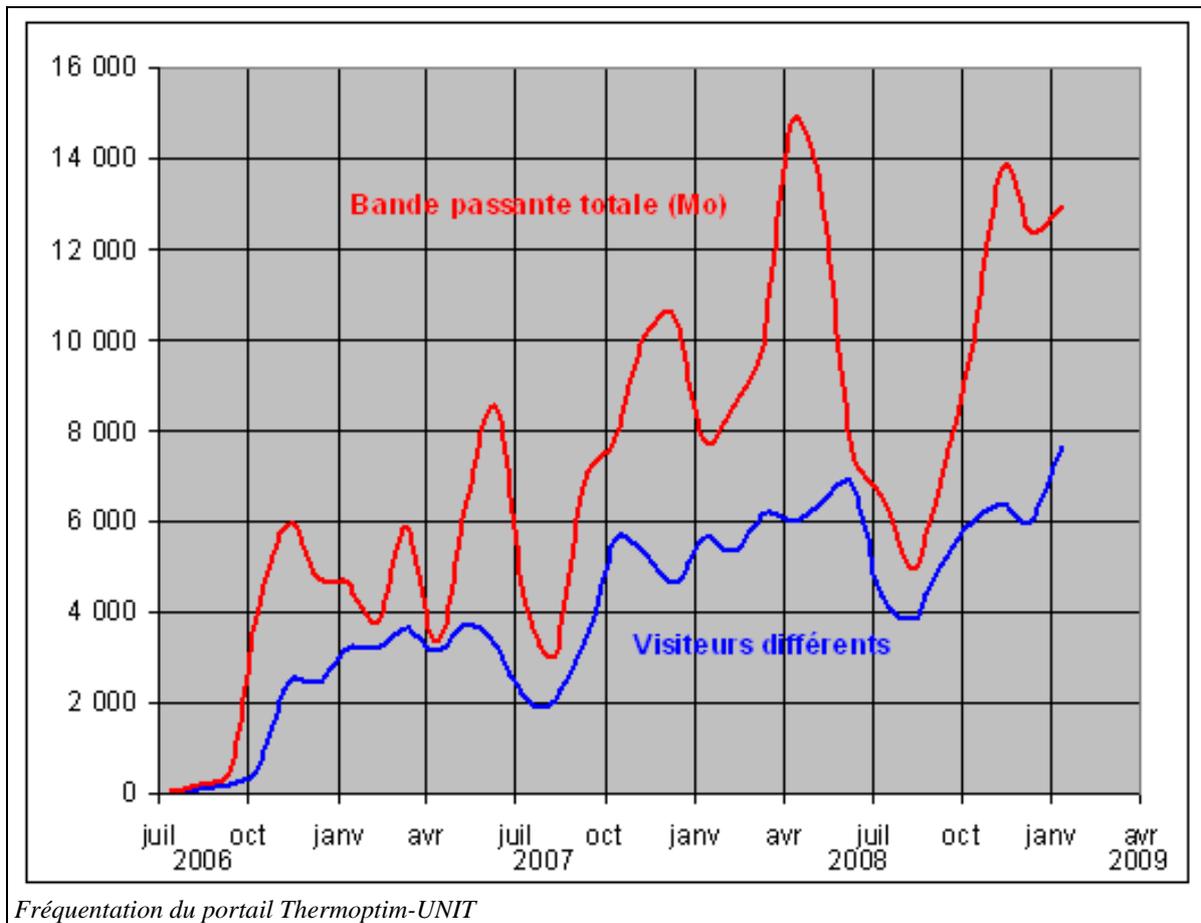
De surcroît, une version de démonstration est diffusée librement, sa principale limitation étant qu'elle ne permet pas de sauvegarder les fichiers de travail. En revanche, elle permet d'ouvrir n'importe quel fichier existant et suffit pour utiliser à des fins pédagogiques les ressources du portail Thermoptim-UNIT ([www.thermoptim.org](http://www.thermoptim.org)). Elle est très utilisée dans les CPGE.

Les partenaires d'UNIT ont de droit accès à la version Education salle de cours, sur simple demande. Il leur est demandé de remplir une fiche d'utilisation, ce qu'ils font généralement.

### 3.3. Estimation de l'utilisation de ThermoOptim

L'estimation de l'utilisation de nos ressources est un problème difficile que nous avons conscience de ne faire qu'imparfaitement car les seules informations détaillées dont nous disposons sont les fiches d'utilisation remplies par les partenaires d'UNIT. Le questionnaire porte sur les points suivants :

- nombre de machines équipées de ThermoOptim
- pour chaque enseignement, nombre d'élèves et nombre d'heures d'utilisation du logiciel, niveau, et type d'enseignement



Toutefois, d'autres indicateurs peuvent être employés, car ils sont corrélés à l'utilisation de ThermoOptim :

- tout d'abord, les 11 stages LIESSE sur ThermoOptim qui ont été organisés depuis novembre 2001 pour les professeurs de CPGE ont rassemblé plus de 230 stagiaires. Même si cela ne fournit pas d'éléments quantitatifs directs sur l'utilisation effective de l'outil, cela prouve leur intérêt. Rappelons que si les stages LIESSE sont gratuits, les frais de déplacement sont à la charge des stagiaires

- ensuite, la fréquentation du portail est suivie depuis son ouverture grâce aux outils de gestion fournis par Apache (AwStats). La croissance moyenne est d'environ 100 visiteurs différents par mois et atteint aujourd'hui 6000, soit 20 par jour, et celle de la bande passante est d'environ 500 Mo par mois, et atteint aujourd'hui un peu plus de 12 Go par mois, soit environ 400 Mo par jour (cf. graphique ci-dessus).

A partir des informations dont nous disposions, nous avons fait en septembre 2007 l'estimation de l'utilisation effective de Thermoptim qui est succinctement présentée ci-dessous.

Les tableaux récapitulatifs de l'utilisation par une dizaine d'établissements pour 2006-2007 et 2007 - 2008 sont :

#### 2006-2007

machines	370
enseignants	10
élèves	678
heures par élève	9,93
élèves-heures	6 732

#### 2007 - 2008

machines	365
enseignants	20
élèves	798
heures par élève	9,36
élèves-heures	7 473

Pour l'utilisation en classes préparatoires, nous n'avons pas de retour direct, mais nous savons que 38 lycées au moins utilisent le progiciel, et que près de 230 stagiaires ont participé à des stages LIESSE sur Thermoptim. Un assez grand nombre de TIPE ont aussi fait appel à Thermoptim. En considérant par lycée 4 enseignants, 10 machines et 2 classes (hypothèse très conservative) travaillant 5 h avec l'outil, nous obtenons l'estimation suivante :

#### CPGE

machines	380
enseignants	152
élèves	3 040
heures par élève	5
élèves-heures	15 200

En nous basant sur une diffusion de Thermoptim dans 100 établissements d'enseignement (seuil dépassé depuis 2005) l'estimation globale de son utilisation que nous pouvons faire à partir de ces

valeurs est la suivante : nous reprenons tels quels les chiffres des CPGE, et considérons donc que 60 établissements autres que les lycées sont utilisateurs, soit environ 6 fois ceux partenaires d'UNIT.

De manière conservatrice, nous multiplions les chiffres du tableau récapitulatif de 2007 - 2008 par 5 et ajoutons ceux des CPGE :

**Total**

machines	2205
enseignants	252
élèves	7 030
heures par élève	7,48
élèves-heures	52 565

Cette estimation à la date de septembre 2007 est certainement contestable, et nous sommes prêts à utiliser une autre méthode. Nous pensons cependant qu'elle est assez réaliste compte tenu des données dont nous disposons.

Mi juin 2008, nous avons relancé une enquête sur l'utilisation de ces ressources auprès d'une part des partenaires UNIT, d'autre part des enseignants qui se sont inscrits pour avoir accès aux corrigés du portail, et enfin des CPGE. Vingt-cinq enseignants ont rempli les fiches qui leur avaient été transmises et nous les ont retournées.

L'ensemble de ces éléments a été remis au secrétariat d'UNIT le 23 février 2009, pour être exploité dans le cadre de l'étude sur les usages qu'il doit mener en 2009.

## Annexe

### Récupération des données du portail Thermoptim vers ScenariChain

#### Passage de CPS vers OpaleSup

Les fichiers html de CPS ont été transformés en fichiers de cours au format OpaleSup 3,0,8 de ScenariChain. Le tableau suivant rappelle les transformations qui ont été faites.

Html	OpaleSup
Premier <h1> grand titre	Titre de la page
Second <h1>	Balise remarque
<h2> titre	Balise information>titre
<h2> second titre simultané	Balise importante
commentaire,description du fichier	Balise remarque
lien de référence de la page	méta-données>mot clé>mot clé (lien public si il existe, sinon lien privé)
lien dans titre	lien dans texte après le titre
Plusieurs grands titres	Partie
<hr> ligne horizontale	Remplacé par _____ (touche 8)
tableau (qui ne contient pas de lien)	tableau en open office
tableau (avec lien)	liste avec lien
phrase en rouge	Balise attention
fichiers attachés(txt, doc, zip, pdf,java,)	Balise information>lien vers document ou ressource (téléchargement)
fichier lu (animation flash swf)	Balise information>vidéo, son , interaction embarqué(e)
image, (gif, jpg)	Balise information>image
gras	Balise important
Applet Java	Balise information> site web embarqué