

Thermoptim, une autre façon d'apprendre la thermodynamique

par **Suzanne FAYE**

Lycée Jacques Decour - 75009 Paris

mfaye@club-internet.fr

et **Renaud GICQUEL**

École des Mines - 75006 Paris

renaud.gicquel@cenerg.ensmp.fr

RÉSUMÉ

Une démarche pédagogique novatrice utilisant le progiciel Thermoptim a été développée depuis 1997 dans le cadre de l'École des Mines de Paris. Elle illustre parfaitement comment les Technologies de l'information et de la communication (TIC) permettent de renouveler de manière radicale l'apprentissage et l'approfondissement de la thermodynamique, discipline scientifique et technique classique considérée jusqu'ici comme particulièrement difficile par des générations d'étudiants et d'ingénieurs. Elle est aujourd'hui utilisée dans une vingtaine d'établissements d'enseignement supérieur en France, dont le lycée Jacques Decour à Paris, où elle a fait l'objet d'une expérience relatée dans cet article, portant sur un atelier scientifique, des travaux pratiques et des TIPE (Travaux d'initiative personnelle encadrés).

L'utilisation de Thermoptim permet de dépasser certaines limites que rencontre l'enseignement classique de la thermodynamique : parallèlement ou même préalablement à la présentation des bases théoriques, les élèves peuvent effectuer sans aucune difficulté calculatoire des exercices très pratiques portant sur des applications de la discipline aux machines réelles, comme par exemple l'étude d'un réfrigérateur ou d'une centrale électrique, et obtenir des résultats extrêmement précis qui peuvent être présentés visuellement sous des formes diverses. Les élèves peuvent ainsi travailler sur des applications concrètes des notions étudiées en cours et en comprendre l'intérêt pratique.

INTRODUCTION

L'apprentissage de la thermodynamique en classes préparatoires se heurte à diverses contraintes, et ceci malgré les efforts déployés par les enseignants et les évolutions des programmes préconisées par l'inspection générale :

- la discipline fait appel à certains concepts fondamentaux dont l'intérêt pratique est loin d'être simple à illustrer, comme l'énergie interne, l'enthalpie ou l'entropie ;
- les calculs à effectuer sont presque toujours complexes, tant sur le plan formel que numérique, notamment en système fermé ;

Bilan

énergie utile : 135,64
 énergie payante : 66,48
 efficacité : 2,04031

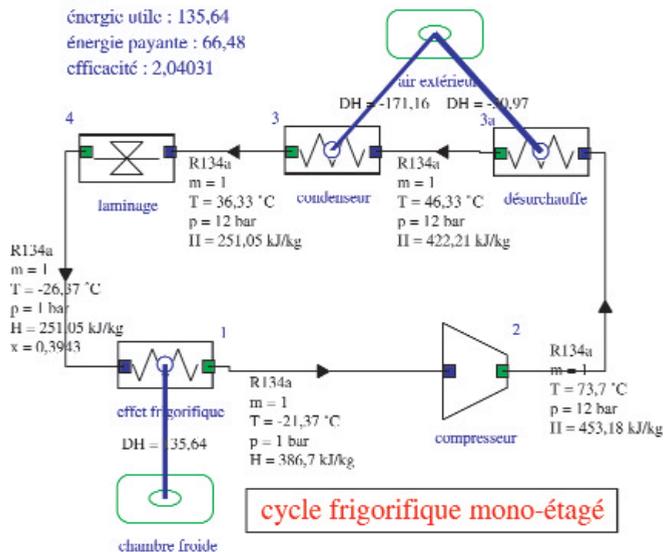


Figure 1 : Synoptique de machine frigorifique.

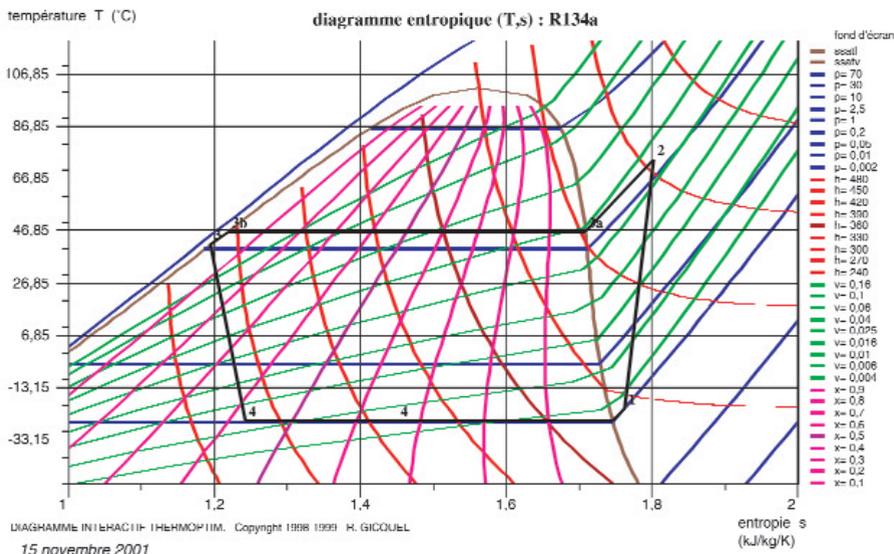


Figure 2 : Cycle frigorifique sur diagramme entropique.

- les lois même les plus simples sont fortement non-linéaires.
- les industriels travaillent essentiellement avec des systèmes ouverts et privilégient les représentations (T,s) ou $(h, \log P)$ au lieu du classique (P,v) des systèmes fermés des débutants.

Il en résulte que les élèves rencontrent de sérieuses difficultés à maîtriser les notions de base, et jugent la discipline rébarbative, malgré le nombre et l'importance de ses applications industrielles et leur incidence dans la vie quotidienne (propulsion automobile ou aéronautique, production d'électricité, réfrigération...).

Thermoptim est un progiciel qui permet aux élèves d'apprendre la thermodynamique d'une autre façon : parallèlement ou même préalablement à la présentation des bases théoriques, ils peuvent effectuer des exercices très pratiques portant sur des applications de la discipline aux machines réelles, comme par exemple l'étude d'un réfrigérateur ou d'une centrale électrique... Comme les connaissances des élèves sont limitées, il faut que cet apprentissage soit aussi facile que possible. Pour les motiver, il faut qu'il fournisse des résultats suffisamment proches de la réalité.

Une expérience de cette nature a été réalisée par Suzanne FAYE, professeur de physique au lycée Jacques Decour, auprès d'élèves de mathématiques supérieures et de mathématiques spéciales. Elle repose sur l'introduction, en parallèle des cours classiques, de travaux dirigés effectués avec le logiciel Thermoptim, qui permet, grâce à ses bibliothèques de fonctions thermodynamiques, de modéliser graphiquement des technologies énergétiques simples ou complexes sans écrire une seule équation, et d'obtenir des résultats extrêmement précis, qui peuvent être présentés visuellement sous des formes diverses.

On peut en particulier s'affranchir de l'hypothèse très limitative des gaz parfaits, en introduisant des fluides réels. À titre d'exemple (cf. figures 1 et 2), des élèves de mathématiques supérieures ont pu calculer un cycle de réfrigération à compression fonctionnant avec du R134a, fluide de substitution de CFC, et à potentiel de destruction de la couche d'ozone nul.

Les élèves peuvent ainsi travailler sur des applications concrètes des notions étudiées en cours et en comprendre l'intérêt pratique. Ils concentrent leurs efforts cognitifs sur l'analyse qualitative des systèmes qu'ils étudient, l'évaluation quantitative étant réalisée par le logiciel. Le très grand intérêt qu'il y a à opérer de la sorte est que la thermodynamique est beaucoup plus simple sur le plan qualitatif que sur le plan quantitatif : les élèves n'ont aucune difficulté à comprendre et mémoriser les configurations des machines thermiques classiques, qui ne mettent en jeu que quelques composants

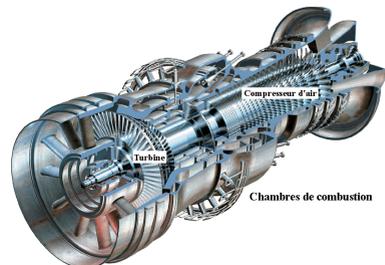


Figure 3 : Turbine à gaz Alstom Power GT24/26.

élémentaires, aux fonctionnalités directement intuitives : organes de compression et de détente, échangeurs de chaleur et chambres de combustion (cf. figure 3).

De plus, la représentation qualitative et visuelle de l'architecture de ces machines est très largement indépendante de la manière dont les composants sont ensuite calculés, c'est-à-dire des hypothèses que l'on retient pour l'évaluation quantitative. Les élèves voient ainsi comment un même élément peut être calculé de manière plus ou moins précise en fonction des outils mathématiques dont ils disposent. Concrètement, ils comprennent que l'hypothèse des gaz parfaits permet de mener quelques calculs analytiques approchés, alors qu'un environnement de modélisation comme Thermoptim conduit à des résultats beaucoup plus réalistes. Le lien entre les bases de la théorie présentées en classes préparatoires et la réalité industrielle peut ainsi être mieux perçu.

L'expérience prouve qu'ils parviennent très rapidement à maîtriser suffisamment bien les fonctions de base du logiciel pour pouvoir s'en servir comme d'un outil exploratoire leur permettant de mieux comprendre les concepts abordés en cours. Comme le montrent les exemples présentés dans la seconde partie de ce document, ils peuvent tracer les cycles réels sur les diagrammes thermodynamiques (T, s) ou ($h, \log p$) utilisés par les professionnels et voir en quoi et pourquoi ils s'écartent des cycles théoriques comme celui de Carnot.

Disposant des propriétés réelles des fluides, ils peuvent s'affranchir des hypothèses usuelles (malheureusement souvent caricaturales) et construire eux-mêmes des modèles de machines thermiques parfaitement réalistes (une élève de spéciales a ainsi travaillé sur un modèle de la centrale nucléaire de Nogent (cf. figures 13 et 14)). Dans les sujets de thermodynamique des concours, on fait parfois appel aux diagrammes de l'eau, et rarement à d'autres fluides. Thermoptim permet quant à lui de travailler avec de nombreux fluides, en particulier les CFC et leurs substituts.

La pédagogie employée consiste à illustrer les notions de base si peu intuitives en commençant par traiter des exemples simples mais réalistes. Les élèves sont attirés dans un premier temps par le côté ludique de l'exercice. Ils se prennent au jeu et cherchent à obtenir des résultats, ce qui leur demande de comprendre les écrans qui leur sont présentés. Ce faisant, ils acquièrent le vocabulaire de base de la thermodynamique et en viennent à assimiler assez rapidement les principales notions.

Dans un deuxième temps, une fois les transformations de base bien comprises, ils peuvent étudier des cycles complets qu'ils construisent par assemblage graphique de composants élémentaires, apprenant de manière intuitive comment les modéliser.

Le résultat est tout d'abord une motivation renforcée pour la thermodynamique, conduisant à une attention et une participation en classe plus soutenues que par les méthodes classiques, et ensuite une meilleure assimilation à la fois des notions théoriques et de leur mise en œuvre pratique.

Thermoptim apparaît ainsi comme une sorte de **plate-forme d'expérimentation virtuelle** permettant aux élèves de faire le lien entre la théorie et la pratique en mettant

en œuvre les concepts étudiés en cours, et de s'initier à la modélisation des systèmes énergétiques. En ce sens, il répond à l'attente exprimée par le programme de physique des classes préparatoires qui insiste sur l'importance, dès la classes de mathématiques supérieures, de « s'attacher à présenter une machine réelle en insistant sur la modélisation des évolutions », et se prête à la mise sur pied de TP-cours, dont rappelons-le « l'objet essentiel est de rapprocher le temps de l'expérimentation du temps de son interprétation dans le cadre d'un modèle théorique ».

Thermoptim permet en quelque sorte de faire en thermodynamique ce que l'on fait couramment dans les programmes actuels en électronique et optique. D'ailleurs, pour les élèves, son utilisation présente de nombreuses analogies avec les logiciels de simulation disponibles dans ces disciplines.

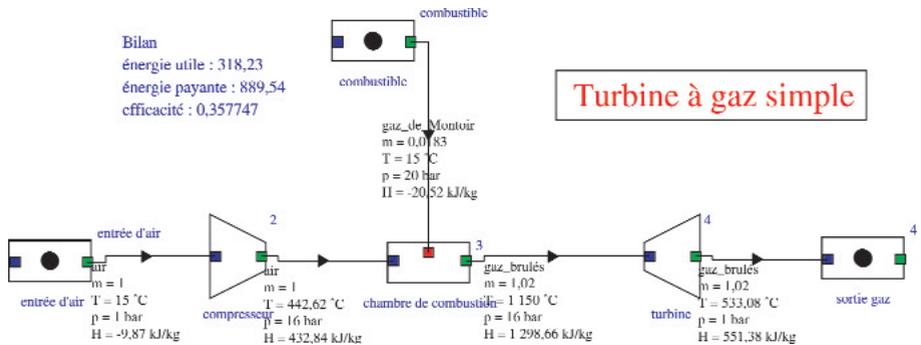


Figure 4 : Synoptique d'une turbine à gaz dans Thermoptim.

En conclusion, il est possible d'introduire dans l'enseignement des classes préparatoires une pédagogie plus constructiviste de la thermodynamique, complémentaire de l'approche analytique classique. Cet éclairage nouveau confère en quelque sorte une vision en relief de la discipline, et facilite son assimilation.

Les élèves travaillent sur des petits projets réalistes qui leur permettent de faire le lien entre la théorie et les applications, d'explorer l'influence de divers paramètres sur les performances des installations, et surtout de bien comprendre les architectures des machines usuelles. Ils développent ainsi leur sens physique, sans avoir à consacrer trop de temps aux aspects quantitatifs ni devoir recourir à des hypothèses trop simplificatrices.

Pour la plupart des élèves, une séance de travaux pratiques de 4 heures est suffisante pour atteindre ces objectifs. Pour ceux qui choisissent un TIPE concernant les systèmes énergétiques, ils disposent d'un environnement de simulation leur permettant d'effectuer des approfondissements très poussés.

L'expérience réalisée par Suzanne FAYE a confirmé l'intérêt de cette nouvelle approche, et suggère quelques pistes pour développer des exemples résolus à destination des classes préparatoires. Il serait en particulier intéressant de rédiger des petits fascicules détaillant le fonctionnement des machines usuelles (réfrigérateur, pompe à chaleur, cen-

trale électrique, turbine à gaz...), qui expliqueraient les hypothèses de modélisation à la lumière des contraintes technologiques (pourquoi un compresseur moderne peut-il être considéré comme adiabatique, pourquoi une chambre de combustion ou un échangeur de chaleur sont-ils à peu près isobares...), feraient le lien avec le programme de physique, et présenteraient les résultats que l'on peut obtenir avec Thermoptim. Ces fascicules pourraient être directement utilisés par les élèves pour travailler par eux-mêmes et bien comprendre l'intérêt pratique des notions abstraites qui leur sont présentées.

EXPÉRIENCES RÉALISÉES AVEC LES ÉLÈVES DES CLASSES PRÉPARATOIRES

Afin d'illustrer l'enseignement de thermodynamique par des exemples pratiques correspondant à des machines réelles, les élèves du lycée Jacques Decour ont réfléchi à trois questions complémentaires : comment produire du froid dans un cycle à compression de vapeur, et comment produire de l'électricité, soit à partir d'une turbine à gaz, soit à partir d'un cycle à vapeur d'eau. On remarquera que les deux dernières ont été abordées dans des sujets posés lors des concours communs 2001 et 2000 des écoles des mines d'Albi, Alès, Douai et Nantes.

Production de froid

Le problème a été posé dans ces termes aux élèves : on cherche à refroidir à -20 °C une enceinte située dans une pièce à la température ambiante de 30 °C environ ; préciser tout d'abord comment on peut envisager d'opérer sachant que la chaleur ne s'écoule que dans le sens des températures décroissantes, puis proposer un cycle qui permette de réaliser le transfert. L'ensemble du TD a été fait en interaction avec les élèves, qui ont prouvé qu'ils raisonnaient bien sur le plan de l'analyse physique des phénomènes. Les figures 5 et 6 montrent les principaux schémas qui ont été construits avec eux, avec leurs explications sommaires.

Le principe consiste à évaporer un fluide frigorigène à basse pression (et donc basse température), dans un échangeur en contact avec l'enceinte froide. Pour cela, il faut que la température T_{evap} (environ -25 °C) du fluide frigorigène soit inférieure à celle T_{cf} de l'enceinte froide (-20 °C). Le fluide est ensuite comprimé à une pression telle que sa température de condensation T_{cond} (46 °C) soit supérieure à la température ambiante T_{a} (30 °C). Il est alors possible de refroidir le fluide par échange thermique avec l'air ambiant, jusqu'à ce qu'il devienne liquide. Le liquide est ensuite détendu par laminage isenthalpique à la basse pression, et dirigé dans l'évaporateur. Le cycle est ainsi refermé.

La figure 5 illustre les transferts énergétiques qui prennent place dans le cycle. Les petites flèches dirigées vers le bas représentent les échanges thermiques, qui, comme on le voit, respectent bien le second principe de la thermodynamique : la chaleur s'écoule des températures chaudes vers les températures froides. La longue flèche ascendante représente l'apport enthalpique au compresseur, qui permet de relever le niveau de tem-

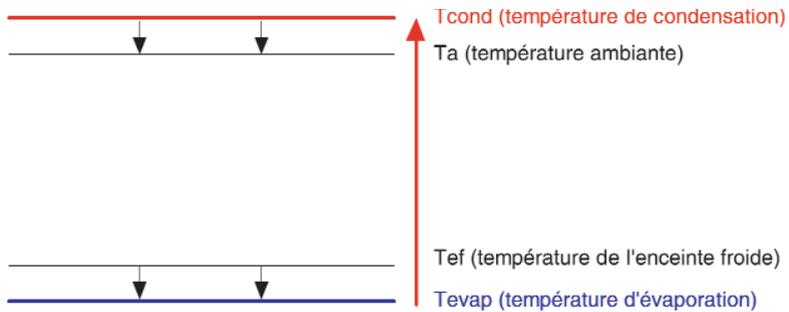


Figure 5

pérature du fluide (les quantités de chaleur ne sont pas proportionnelles à la longueur des flèches).

Dans l'exemple qui nous intéresse, les données du problème sont les suivantes : le fluide choisi est du R134a, hydrofluorocarbure de substitution aux CFC qui présente l'avantage d'avoir un potentiel de destruction de la couche d'ozone nul (une petite discussion sur ce sujet a bien sûr place avec les élèves).

Compte tenu des températures d'évaporation et de condensation désirées, le cycle de réfrigération par compression de R134a (*cf.* figure 6) fonctionne entre une pression d'évaporation de 1 bar et une pression de condenseur de 12 bars. Pour des raisons technologiques, avant d'entrer dans le compresseur, le gaz est surchauffé de 5 K au dessus de la température de saturation, et avant d'entrer dans le détendeur, le liquide est sous-refroidi de 5 K. Le compresseur est adiabatique, et ses irréversibilités sont prises en compte par un rendement isentropique égal à 0,75. Un schéma d'un groupe de froid industriel a été présenté et commenté aux élèves.

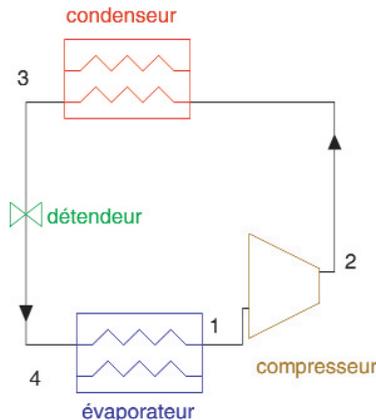


Figure 6 : Schéma d'un cycle frigorifique à compression.

La durée de l'exercice étant assez courte (il s'agissait d'un travail dirigé d'une heure), les élèves n'avaient pas le temps de bâtir eux-mêmes le cycle dans Thermoptim. Ils se sont contentés, une fois terminée la présentation des principes exposés ci-dessus, de charger un exemple déjà traité, et d'en analyser les résultats (cf. figure 1) : structure de la machine, coefficient de performance. De plus, ils ont étudié leur représentation dans les diagrammes du R134a (diagramme entropique figure 2 et diagramme (h, log P) figure 7).

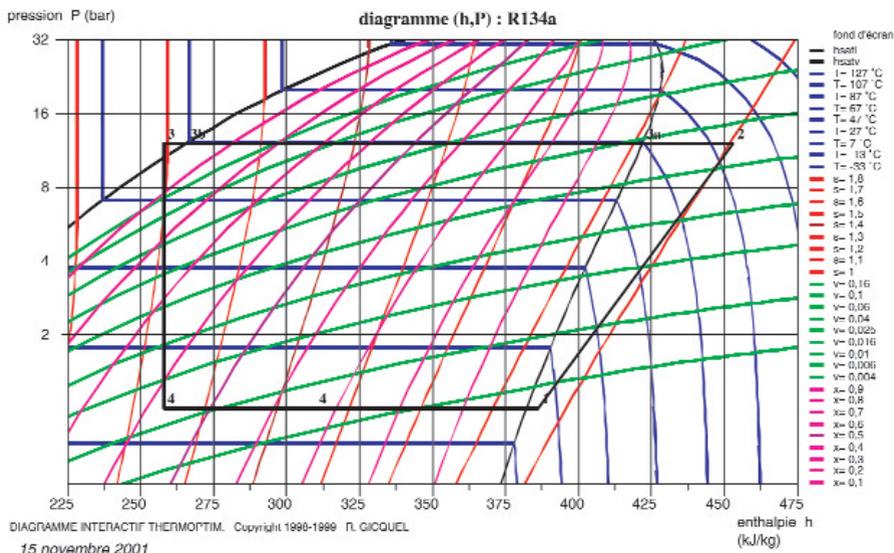


Figure 7 : Diagramme (h, log P).

Production d'électricité à partir d'une turbine à gaz

L'atelier de physique s'étant déroulé quelques jours après le concours commun 2001 des écoles des mines d'Albi, Alès, Douai et Nantes qu'avaient présenté certains élèves, une brève présentation a été faite sur la manière de modéliser une turbine à gaz avec Thermoptim (cf. figures 3, 4, 8 et 9).

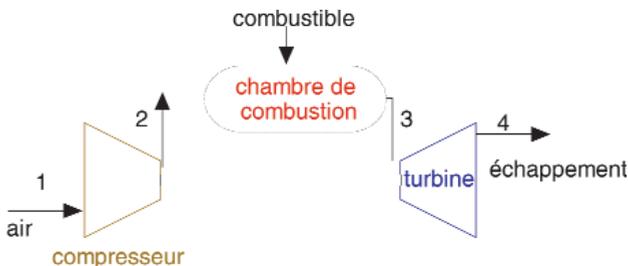


Figure 8 : Schéma de turbine à gaz.

Des éclatés de machines réelles ont été présentés, avec quelques explications sur les technologies employées et leur implication sur les évolutions des fluides thermodynamiques : caractère adiabatique des écoulements dans le compresseur et la turbine, contrainte technologique forte au niveau de la protection des premiers aubages de la turbine de détente, expliquant pourquoi la température de sortie de chambre de combustion est maintenue constante et égale à 900 K... Les progrès récents sur les performances de ces machines et leur parenté avec les turboréacteurs aéronautiques ont aussi été évoqués.

Un modèle reprenant les hypothèses du sujet du concours (turbine à gaz traversée par de l'air supposé parfait) a été 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 (cf. figure 9).

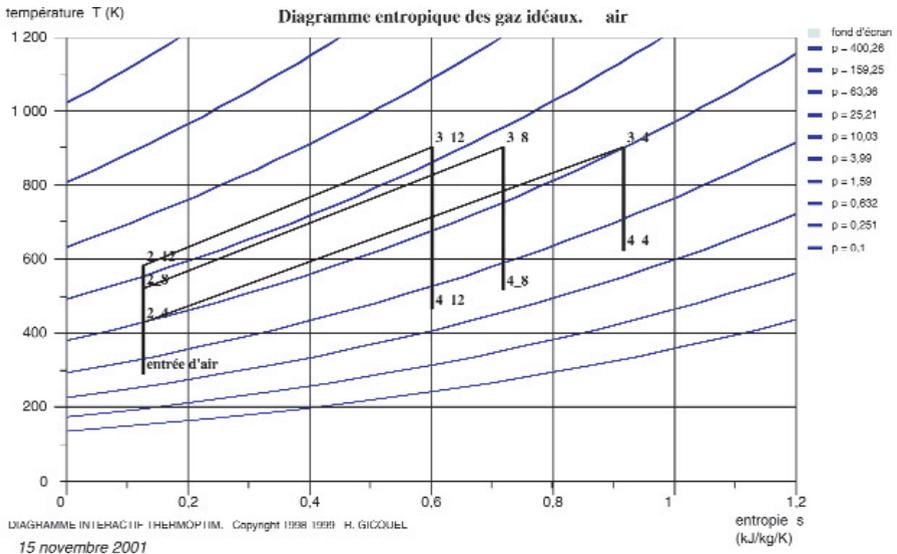


Figure 9 : Représentation de cycles de turbine à gaz à air parfait pour trois rapports de compression.

Un modèle beaucoup plus précis avec prise en compte de la combustion et de la composition des gaz brûlés et s'affranchissant de l'hypothèse du gaz parfait a ensuite été brièvement présenté, mais n'a pas donné lieu à manipulation par les élèves faute de temps, l'atelier étant consacré à la présentation de l'exemple de production de froid rapporté ci-dessus.

Production d'électricité à partir d'un cycle à vapeur d'eau

Le cycle de base d'une centrale à vapeur consiste essentiellement en une chaudière où le combustible (solide, liquide ou gazeux) est brûlé générant ainsi de la vapeur (en

général surchauffée) qui est ensuite détendue dans une turbine à vapeur dont l'arbre fournit le travail moteur (cf. figure 10).

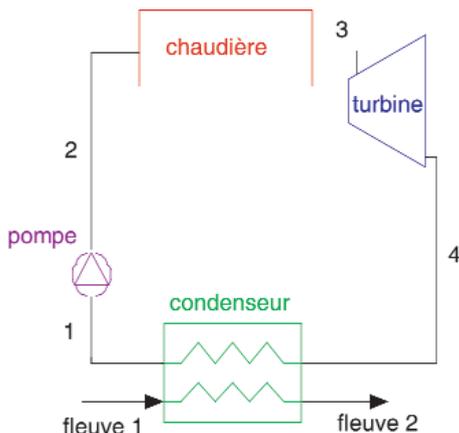


Figure 10

La vapeur sortant de la turbine est totalement liquéfiée (eau) dans un condenseur avant qu'une pompe ne lui redonne la pression de chaudière. L'eau étant comprimée à l'état liquide, le travail de compression est quasiment négligeable devant le travail récupéré sur l'arbre de la turbine. C'est là une différence très nette avec le cycle de la turbine à gaz, où le travail de compression représente 60 à 70 % du travail produit par la turbine.

Il s'agit d'un cycle à combustion externe, permettant d'utiliser une grande variété de combustibles (dont l'uranium). Dans la plupart des pays, plus de 90 % du parc des centrales thermiques était jusqu'à récemment composé de telles centrales.

Au point 1, l'eau est à l'état liquide, à une température d'environ 20 °C, sous une faible pression (0,023 bar). Une pompe, de rendement isentropique égal à 1, met cette eau en pression à 165 bars (point 2). L'eau sous pression est ensuite chauffée à pression constante dans une chaudière à flamme (fuel, charbon, gaz naturel). L'échauffement comporte trois étapes :

- ◆ chauffage du liquide dans l'économiseur, de 20 °C à environ 355 °C, température de début d'ébullition à 165 bars : évolution (2-3a) sur le diagramme entropique ;
- ◆ vaporisation à température constante 355 °C dans le vaporisateur : évolution (3a-3b) ;
- ◆ surchauffe de 355 °C à 560 °C dans le surchauffeur : évolution (3b-3).

La vapeur est ensuite détendue dans une turbine de rendement isentropique égal à 0,85, jusqu'à la pression de 0,023 bar évolution (3-4). Le mélange liquide-vapeur est enfin condensé jusqu'à l'état liquide dans un condenseur, échangeur entre le cycle et la source froide, par exemple l'eau d'un fleuve. Le cycle est ainsi refermé.

Son synoptique dans Thermooptim est donné figure 11, et sa représentation sur diagramme entropique figure 12.

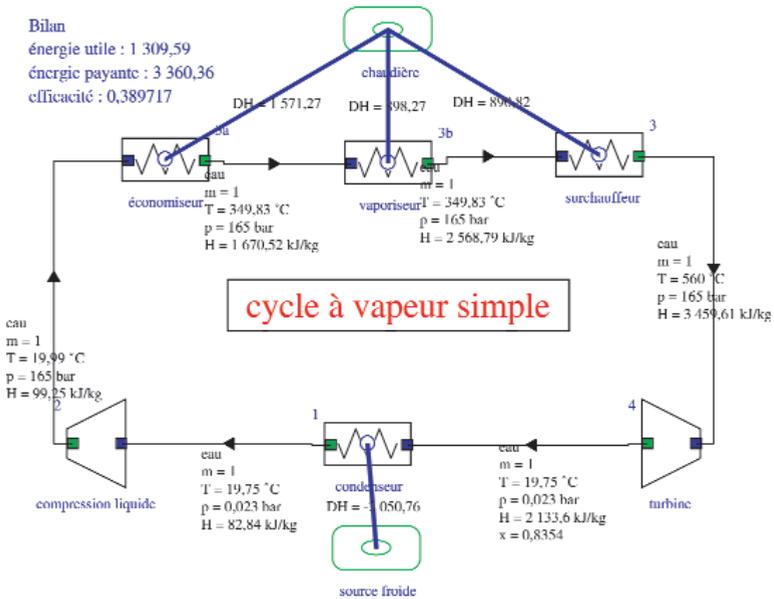


Figure 11 : Synoptique d'un cycle à vapeur.

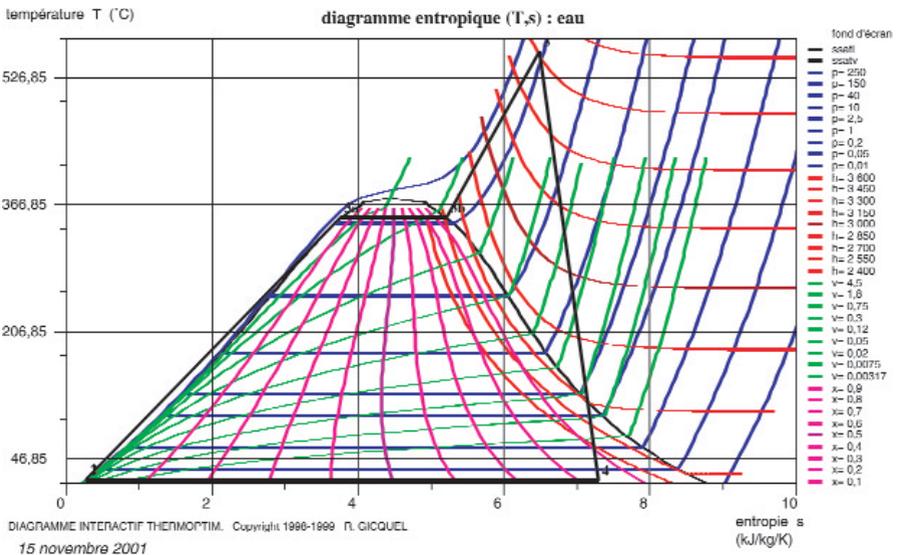


Figure 12 : Cycle à vapeur sur le diagramme entropique.

Le travail sur ce cycle a fait l'objet d'un TD effectué par des élèves de classes de Spéciales. L'intérêt des élèves était particulièrement développé, d'une part parce qu'un sujet de ce type leur avait été posé l'année précédente au concours commun 2001 des écoles des mines d'Albi, Alès, Douai et Nantes, et surtout du fait qu'un certain nombre d'entre eux, en provenance de pays d'Afrique de l'ouest, souhaitaient bien comprendre comment marchent les centrales de production d'électricité dans leur pays.

Une élève ayant visité la centrale nucléaire de Nogent a souhaité la modéliser, alors que ce cycle est beaucoup plus complexe (cf. figures 13 et 14). Pour toutes ces raisons, un groupe « Centrales thermiques » a été constitué ; ce groupe a réalisé une étude comparative de la production d'électricité en France et dans plusieurs pays d'Afrique. Le logiciel Thermoptim permet une modélisation des centrales thermiques visitées (centrale classique de Porcheville, centrale nucléaire de Nogent) ainsi qu'une recherche d'optimisation de centrales à construire (comme cela a été réalisé avec EDF à l'École des Mines).

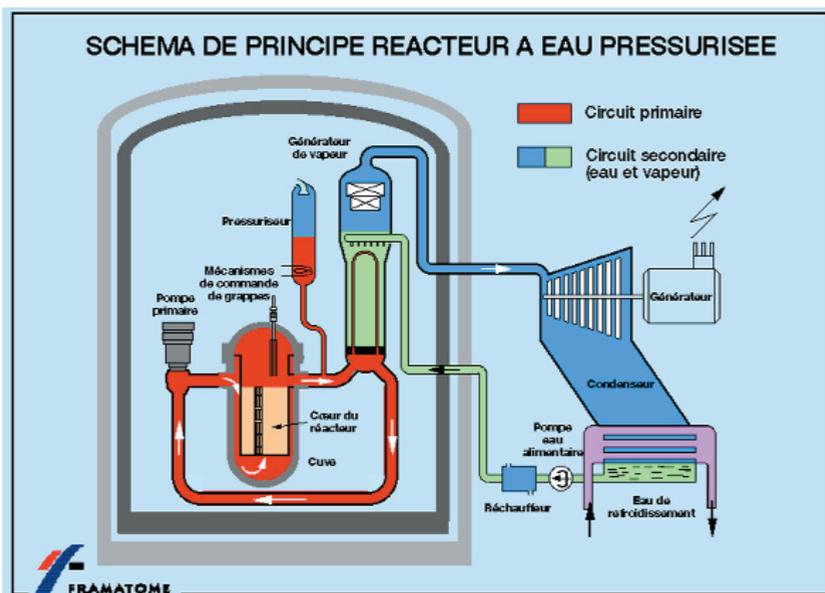


Figure 13 : Schéma de principe d'une centrale nucléaire.

En conclusion, les trois exemples proposés :

- cycle frigorifique ;
- turbine à gaz ;
- centrales thermiques ;

constituent un premier pas dans l'environnement Thermoptim, utilisé par ailleurs dans une vingtaine d'établissements d'enseignement supérieur en France pour développer des projets industriels (exemple EDF).

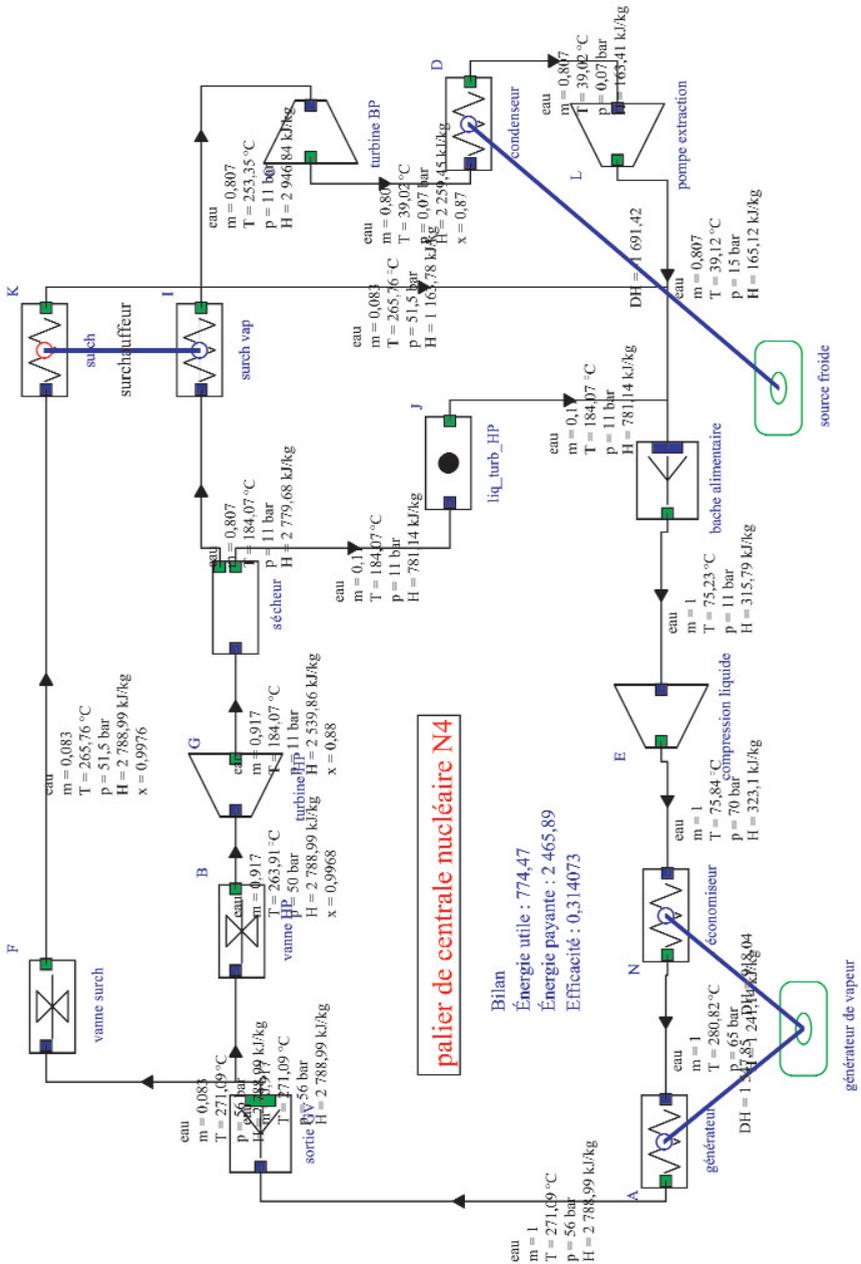


Figure 14 : Synoptique d'un cycle de centrale nucléaire dans Thermoptim.

Annexe

Construire avec Thermoptim un modèle de cycle thermodynamique

Thermoptim est un progiciel de thermodynamique appliquée qui fournit un environnement de modélisation cohérent combinant les apports des approches systémique et analytique. Pour chaque écran de Thermoptim, le menu « Aide » contient une ligne « Référence rapide » qui explique toutes les fonctionnalités de la page :

1. PRISE EN MAIN DU PROGICIEL

On utilisera les pages suivantes :

- ◆ Écran de base, comportant :
 - Fichiers de projets ;
 - Fichiers de résultats ;
 - Spécial.
- ◆ Dans « Spécial » de l'écran de base :
 - Édition de schémas d'une part ;
 - Diagrammes interactifs d'autre part.
- ◆ Dans Édition de schémas, explorer les commandes :
 - Composants ;
 - Spécial : Afficher les valeurs - Interface Schéma/Simulateur ;
 - Édition : Afficher les propriétés ;
 - Fichier.
- ◆ Pour un simple chargement d'un projet existant à partir du catalogue d'exemples :
 - Dans « Fichiers de projets » sélectionner Catalogue d'exemples, puis ouvrir les chapitres de la liste ;
 - Sélectionner l'exemple désiré (son descriptif s'affiche) et double-cliquer.

2. SCHÉMAS

Chercher dans **Fichiers de projets**, sinon utiliser **Spécial/ Éditeur de schémas**

- ◆ Étape qualitative avec l'éditeur de schémas :
 - Dessiner et définir les composants ;
 - Connecter ces composants entre eux.
- ◆ Dans « Spécial » de l'éditeur de schémas, demander les opérations suivantes :
 - Interface Schéma/Simulateur et demander les mises à jour ;

- Enregistrer sous un chemin à retenir, par exemple ThOpEdu/Schéma/ Essai ;
- Afficher les valeurs/ Calculer/ Sauver.
- ◆ Sélectionner un composant et double cliquer ; apparaît à l'écran un tableau qu'il convient de renseigner case par case, notamment :
 - Température(s) et Pression(s) ou enthalpie(s) ;
 - Calculer ;
 - Sauver ;
 - Fermer.

3. PASSAGE DU SCHÉMA AU DIAGRAMME THERMODYNAMIQUE

Demander les opérations suivantes :

- ◆ Dans « Spécial » de l'écran de base, demander Diagrammes Interactifs :
 - Dans l'interface Diagramme/Simulateur, double-cliquer pour choisir le diagramme ;
 - Sélectionner le type de diagramme, par exemple vapeur condensable ;
 - Sur l'écran, apparaît un diagramme (T,s) ou (p,h) selon choix de « Graphe » ;
 - Dans « Graphe », passer de diagramme (T,s) à diagramme (p,h) ;
 - Demander les mises à jour de la table des points, puis du diagramme ;
 - Dans « Cycle », demander « Points reliés » ;
 - Pour modifier le cycle, ajouter des points... ouvrir l'éditeur de cycle par Ctrl C ou « Éditer le cycle » du menu « Cycle ».
 - Insérer, couper, coller des points, déplacer les lignes de haut en bas, valider...

4. SAUVEGARDE / CHARGEMENT D'UN CYCLE

- ◆ Dans « Fichiers de résultats » de l'écran du simulateur :
 - Exporter un fichier de cycles ;
 - Enregistrer dans ThOpEdu/cycle/vap.
- ◆ Ou bien, dans l'écran des Diagrammes Interactifs :
 - Dans « Cycle », enregistrer le cycle dans ThOpEdu/cycle/vap ;
 - Dans « Cycle », charger un cycle dans ThOpEdu/cycle/vap.

5. REPORTER DANS WORD

- ◆ Impr écran/ Programmes/ Accessoires/ Paint.
- ◆ Dans Paint : Édition /Coller :
 - Dans Paint : Sélectionner/ Édition / Copier ;
 - Aller dans Word : Édition /Coller.

6. RENSEIGNEMENTS UTILES

- ◆ *Site Internet* : www.thermoptim.com
- ◆ *Livre* : GICQUEL R. *Systèmes Energétiques, Tome 1 : méthodologie d'analyse, bases de thermodynamique*, Thermoptim. Presses de l'École des Mines de Paris, février 2001.
- ◆ *Adresse* : ÉCOLE DES MINES DE PARIS
60, boulevard Saint-Michel
75272 PARIS CEDEX 06

Stages LIESSE sur Thermoptim

Deux stages LIESSE sur Thermoptim seront organisés le mercredi 22 mai 2002 et le jeudi 30 mai 2002 à l'École des Mines (60, boulevard Saint-Michel - PARIS VI^e) - métro : Luxembourg.

Tous les renseignements sont disponibles sur le serveur LIESSE :

<http://www.int-evry.fr/LIESSE/stages.htm>

ou bien auprès de l'organisateur (Renaud GICQUEL).

Les stages LIESSE étant réservés aux professeurs de CPGE, il est aussi possible d'organiser des journées de formation à Thermoptim pour d'autres enseignants. Si vous êtes intéressé, envoyez un mél à Renaud GICQUEL en lui indiquant vos périodes de disponibilité (renaud.gicquel@cenerg.ensmp.fr).