

Le projet Thermoptim-UNIT : cheminement et avancées pédagogiques

R. GICQUEL, Professeur, Mines ParisTech

Nous sommes confrontés à un nouveau défi : former des étudiants capables de traiter des problèmes plus complexes malgré un bagage scientifique plus léger, et ceci dans un volume horaire réduit. L'utilisation pédagogique des TICE et notamment des simulateurs peut être la solution à ce problème, dans la mesure où elle respecte un certain nombre de règles. Nous analysons dans cette présentation le cheminement suivi pour l'élaboration du projet Thermoptim-UNIT, aujourd'hui utilisé pour l'enseignement de l'énergétique dans plus de cent vingt établissements d'enseignement supérieur, aussi bien en premier cycle (CPGE et IUT) qu'en second ou troisième cycle (écoles d'ingénieur, universités) ou encore en formation continue.

Problématique pédagogique

Notre démarche a pour origine les difficultés que nous avons rencontrées lorsque nous avons commencé à enseigner la discipline : nous nous sommes trouvés en situation d'échec vis à vis des objectifs que nous nous étions fixés et que les approches pédagogiques classiques ne pouvaient pas permettre d'atteindre, à savoir rendre nos élèves capables, à l'issue du cours, de s'attaquer aux défis actuels de l'énergétique : réduction de l'impact environnemental des technologies, amélioration des rendements dans des conditions économiques acceptables...

En caricaturant à peine, on pourrait dire que les approches classiques sont confrontées à un dilemme, les modèles auxquels elles conduisent étant soit irréalistes, soit incalculables. Compte tenu des difficultés qu'il y a à estimer avec précision les propriétés des fluides thermodynamiques, elles conduisent en effet généralement soit à faire des hypothèses un peu trop simplificatrices, soit à adopter des méthodes fastidieuses à mettre en pratique. Il en résulte deux écueils qui ont pour effet de démotiver les étudiants :

- les hypothèses de calcul étant trop simplistes, ils ne comprennent pas l'intérêt pratique des modèles qu'ils élaborent, ceux-ci étant très éloignés de la réalité ;
- les calculs précis des cycles étant fastidieux, ils sont rebutés par la discipline.

De surcroît, le temps consacré à la mise en équation des propriétés des fluides et du comportement des composants élémentaires représente l'essentiel du cours, de telle sorte que les élèves ne peuvent *in fine* travailler que sur les exemples de base de la discipline, sans aborder l'étude des cycles innovants, pour laquelle ils ne sont pas outillés sur le plan méthodologique.

Le renouveau pédagogique que nous avons introduit est basé sur un déplacement du savoir acquis par les élèves. La mise en équation des évolutions subies par les fluides est drastiquement réduite, les calculs étant effectués par le simulateur sans que les apprenants aient besoin d'en connaître les détails. Ils consacrent en revanche l'essentiel du temps d'une part à l'apprentissage des technologies, et d'autre part à la réflexion sur les architectures des cycles thermodynamiques aussi bien classiques que novateurs, bâtissant graphiquement et paramétrant des modèles des diverses technologies énergétiques.

Chronologiquement, nous avons commencé par développer le progiciel Thermoptim. Très rapidement, il est apparu que son utilisation induisait un changement radical dans l'attitude des élèves vis à vis de la discipline : nous espérions une amélioration, mais sans imaginer qu'elle serait aussi nette. Pour tenter de comprendre l'accueil enthousiaste fait à cet outil à la fois par les élèves et par de nombreux collègues, nous avons mené quelques explorations sur la didactique des sciences et le cognitivisme. Considérant que les réponses à nos questions pourraient intéresser d'autres collègues, nous avons publié les résultats qui nous paraissaient les plus pertinents dans un article en deux volets du Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie [1], ceux dont l'influence vis à vis de nos propres développements a été la plus importante étant d'une part la théorie de la charge cognitive due à Sweller [2], et d'autre part le modèle RTM(E) dans lequel les connaissances à transmettre sont regroupées en quatre grandes catégories reliées entre elles, appelées la Réalité, la Théorie, les Méthodes (et les Exemples).

En complément de cette modification en profondeur du contenu scientifique enseigné, les modalités pédagogiques ont elles aussi beaucoup évolué grâce aux éclairages que nous ont fournis ces réflexions.

Trois TICE innovantes

Cette nouvelle **méthode d'apprentissage originale et extrêmement simplifiée** est ainsi basée sur une reconception radicale de la pédagogie de la discipline et sur trois TICE innovantes, l'une spécifique de la discipline, le **simulateur Thermoptim**, l'autre beaucoup plus générique, les **modules de formation à distance sonorisés Diapason**, la troisième étant le **portail Thermoptim-UNIT**¹ (www.thermoptim.org).

Thermoptim permet de modéliser très simplement les systèmes énergétiques, tandis que les modules Diapason (Diaporamas Pédagogiques Animés et Sonorisés) donnent accès à tout moment aux explications orales de l'enseignant sur des questions relatives tant à la théorie et à la technologie qu'à la mise en œuvre pratique du simulateur.

Leur utilisation conjointe permet de recourir à des approches pédagogiques qui rencontrent un grand succès auprès des apprenants, ce qui a justifié des soutiens institutionnels qui ont permis de développer de nombreuses ressources numériques librement disponibles pour l'enseignement de l'énergétique. Nous avons pu les rassembler et les intégrer dans le portail qui a été conçu pour que leur accès soit le plus facile possible.

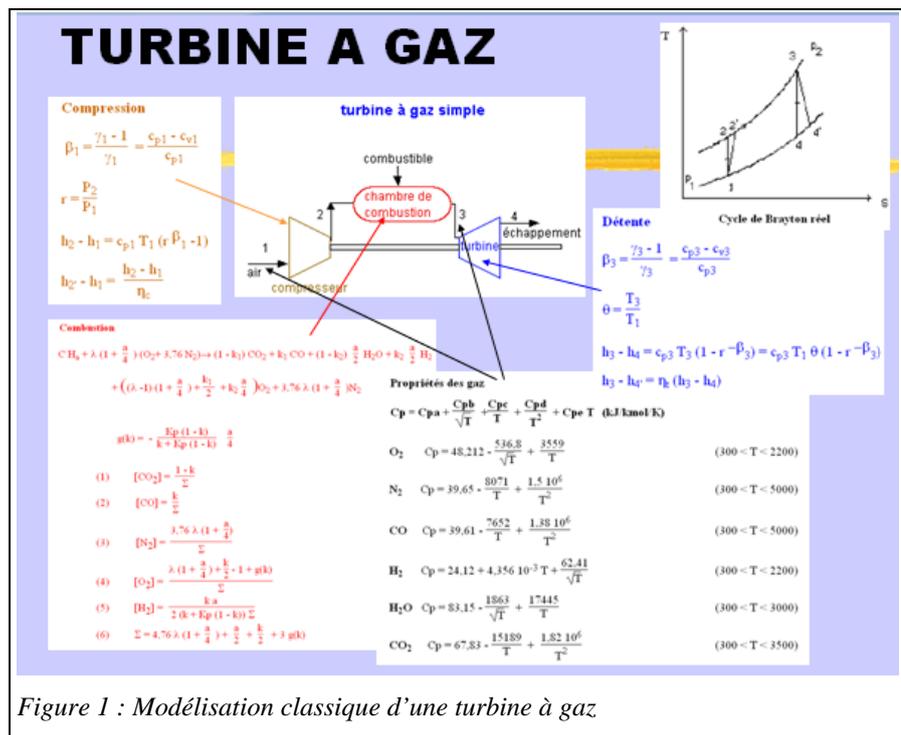
Thermoptim

Un outil comme Thermoptim permet de compléter un enseignement classique de la thermodynamique par une grande diversité d'activités pédagogiques, qui peuvent être regroupées en deux principales catégories : celles de **découverte et initiation**, notamment par exploration de modèles prédéfinis, et celles de **construction de modèles**, qui concernent des élèves cherchant à apprendre à modéliser par eux-mêmes des systèmes énergétiques. Selon les objectifs visés et surtout le temps disponible, l'enseignant peut privilégier l'une ou l'autre d'entre elles.

L'écran de la figure 1 montre les 22 principales équations qu'il faut introduire pour étudier avec une précision raisonnable les performances de la plus simple des turbines à gaz dans le cadre d'un cursus classique. Il est bien sûr possible de simplifier, mais le modèle devient alors caricatural.

Les équations décrivant la compression apparaissent en haut à gauche en marron, et celles pour la détente en haut à droite en bleu. Ce sont les plus simples.

Les plus compliquées sont celles, en rouge en bas à gauche, qui permettent de déterminer la composition des gaz brûlés en sortie de chambre de combustion.



Et encore, pour simplifier les choses, avons-nous d'une part considéré ici un combustible particulièrement simple, et d'autre part omis de donner l'équation permettant de calculer la température de fin de combustion, qui est une équation implicite comprenant une intégrale dont l'une des bornes est inconnue.

¹ <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/divers-portail/presentation-du-portail>

Dans tous les cas, les propriétés des gaz font appel aux équations présentées en noir en bas de la figure. Elles sont nécessaires pour calculer les propriétés énergétiques de chacun des fluides mis en jeu.

Tout bien considéré, c'est au moins une quarantaine d'équations qui doivent être prises en compte pour obtenir un modèle à peu près vraisemblable de la turbine à gaz.

Bien évidemment, même si chacune des équations est connue, les risques d'erreur sont très nombreux lors de l'élaboration du modèle et de sa résolution, notamment du fait qu'elles sont couplées entre elles et que la résolution de certaines d'entre elles doit être faite de manière itérative.

Construire un modèle de turbine à gaz avec Thermoptim relève d'une logique radicalement différente de celle qui était traditionnellement mise en œuvre : nous privilégions en effet une **approche qualitative** des phénomènes, les calculs nécessaires pour les études quantitatives étant réalisés par les outils logiciels de manière transparente pour les apprenants, c'est-à-dire sans qu'ils aient besoin, au moins dans un premier temps, d'en connaître le détail.

Le recours aux équations est réduit au minimum lors de l'initiation à la discipline, l'effort cognitif portant alors essentiellement sur la **compréhension des concepts et des technologies** ainsi que sur leur mise en pratique, et ce n'est qu'une fois que l'élève a acquis une maîtrise suffisante de la discipline que nous considérons que la mise en équations devient possible et pertinente.

Concrètement, comme le montre la figure 2, le modèle est construit par assemblage d'icônes placées sur le plan de travail d'un éditeur de schémas, l'architecture de la machine étant très proche de son schéma physique.

Chaque composant est ensuite paramétré grâce à un tout petit nombre de grandeurs caractéristiques. Les propriétés thermodynamiques des fluides étant encapsulées dans le logiciel, le calcul des performances se fait sans aucune difficulté avec une précision beaucoup plus grande que dans l'approche classique.

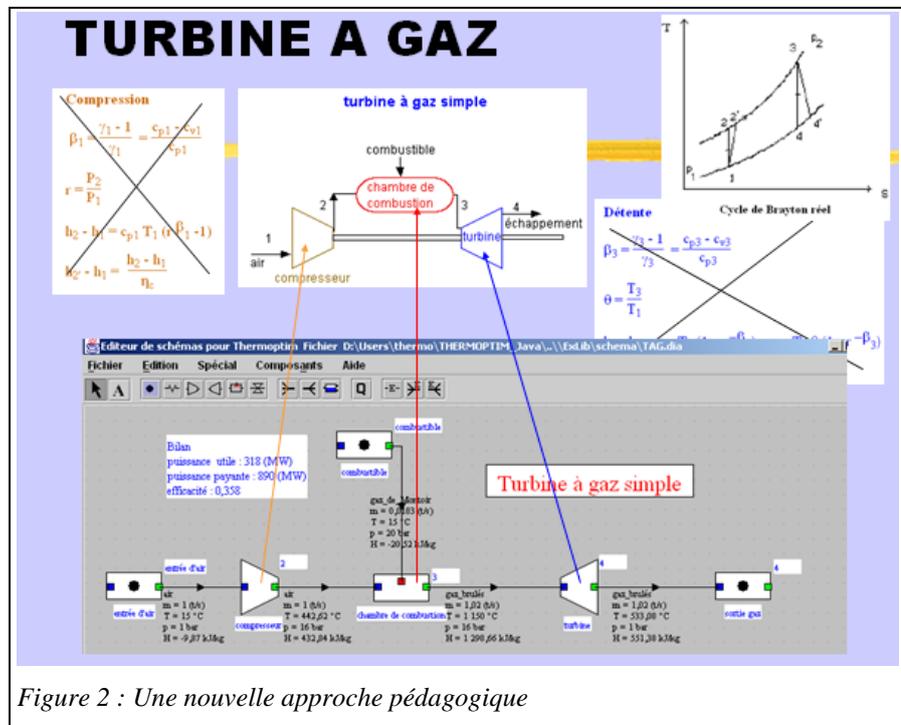


Figure 2 : Une nouvelle approche pédagogique

En utilisant un outil comme Thermoptim, on divise par 5 ou 6 le temps nécessaire pour calculer un cycle thermodynamique, et une fois le modèle établi, il est possible d'effectuer des analyses de sensibilité et de résoudre en quelques minutes ce qui demanderait des heures par les méthodes classiques.

De plus, il n'y a aucun risque d'erreur de programmation ou de lecture des propriétés. Il en résulte un gain de temps considérable sur un aspect des choses non essentiel sur le plan pédagogique, à savoir la résolution des difficultés calculatoires. Outre le temps gagné, la pénibilité du travail est grandement réduite, ce qui se traduit par un gain important de motivation des élèves, qui ne sont plus rebutés par la lourdeur et le caractère fastidieux des calculs.

De surcroît, des gains considérables sont obtenus en précision et donc en vraisemblance des calculs : il n'est plus nécessaire de recourir à des hypothèses caricaturales dans le seul but de rendre possibles les calculs. L'exemple type est celui des études des moteurs à combustion interne, qui à notre connaissance sont in fine considérés comme traversés par de l'air supposé parfait dans la quasi-totalité des enseignements de premier et second cycle

dispensés dans le monde. Comment avec de telles hypothèses espérer intéresser des élèves qui aujourd'hui se soucient de l'impact environnemental de ces technologies : un moteur à air parfait n'a jamais pollué et ne polluera jamais !

Diapason

Comme nous le verrons plus loin, les réflexions didactiques accompagnant le développement de ThermoOptim ont fait apparaître l'intérêt de compléter le simulateur par d'autres outils relevant des TICE afin notamment de présenter aux élèves la réalité technologique, qu'ils méconnaissent très largement au début de leur apprentissage.

Ainsi, depuis septembre 2004, ThermoOptim est complété par les **modules de formation à distance sonorisés Diapason**.

Diagramme de Watt théorique

- ☘ a - b : admission (Δm)
- ☑ (Δm_0) dans volume mort
- ☘ b - c : compression isentropique ($\Delta m + \Delta m_0$) jusqu'à P_2
- ☘ c - d : expulsion Δm

Figure 3 : Modules Diapason

Ces modules permettent aux étudiants de travailler par eux-mêmes, à leur rythme, seuls ou en groupe, et d'avoir accès en ligne à tout moment :

- aux explications orales données par l'enseignant en complément des supports écrits dont ils disposent ;
- à des exercices utilisant le simulateur qui leur donnent la possibilité de se familiariser avec les différents cycles et leurs méthodes d'analyse.

Structurés en étapes, séances, parcours et cursus, les modules Diapason sont un environnement générique utilisable dans de nombreux contextes pédagogiques. Leur spécificité est **d'associer une bande son à un écran**, permettant aux élèves d'obtenir des explications orales contextuelles. Des **hyperliens** permettent d'accéder à des documents divers comme des tableaux ou des documents de référence au format pdf.

Ces modules, qui permettent de faire aussi bien des présentations théoriques, méthodologiques que technologiques, utilisent comme visualisateur un environnement d'exécution Flash supporté par la quasi-totalité des navigateurs Web, qui permet de synchroniser des ressources multimédia variées, comme des images, des bandes-son, des documents pdf, des animations swf, des tableurs, des liens hypertexte...

L'intérêt principal des modules Diapason est leur excellente efficacité pédagogique :

- lors de l'utilisation de ces modules, les élèves sont plus actifs qu'en salle de cours, en ce sens qu'ils règlent eux-mêmes leur rythme d'écoute, mais surtout ils choisissent eux-mêmes les moments où ils étudient, et sont donc disponibles lorsqu'ils le font ; ils apprennent mieux, d'autant plus qu'ils ont tout loisir de revenir en arrière ou de compléter les informations qui leur sont présentées en recourant aux documents écrits ;
- les bandes-son ayant une durée moyenne de moins d'une minute, leur attention peut être soutenue lorsqu'ils étudient une étape, et ils ne passent à la suivante qu'après un temps de repos ;
- les élèves peuvent travailler à leur rythme, seuls ou en groupe. En cas de doute ou s'ils ont été absents, ils peuvent se référer aux explications de l'enseignant sans aucune difficulté.

ThermoOptim et la nouvelle approche pédagogique qu'il rend possible ont progressivement diffusé dans l'enseignement supérieur, en France et dans le monde, de telle sorte qu'on a pu estimer qu'en 2008, **plus de 120 établissements et plus de 7 000 élèves l'ont utilisé**, pour un total d'environ **57 000 heures-élèves**.

Bien que le simulateur et les modules Diapason soient utilisés de manière différenciée selon les établissements de formation, leur mise en œuvre se traduit généralement l'adoption d'un mode de formation hybride alternant séances en présentiel et autoformation en ligne. L'organisation et la conduite d'une formation de ce type induisent notamment une évolution du rôle de l'enseignant vers davantage de tutorat.

Cheminement chronologique

A l'origine de Thermoptim, dans les années 1990-1995, j'avais développé de nombreuses feuilles de calcul pour résoudre les équations que je présentais aux élèves, mais cette manière de faire a assez rapidement trouvé ses limites, d'une part parce que les élèves ne maîtrisaient pas bien les tableurs à cette époque, et aussi parce que, dès lors que le nombre de feuilles de calcul augmentait, j'avais de plus en plus de mal, au delà de quelques mois après les avoir créés, à me souvenir du détail des formules saisies dans les différentes cellules.

Il est ainsi progressivement devenu souhaitable de changer d'environnement de travail, ce qui m'a conduit à intégrer ces feuilles de calcul dans un outil unique plus convivial, qui allait en quelques années devenir le simulateur Thermoptim.

Thermocalc sous 4D

La première version, qui s'appelait ThermoCalc, a été développée avec le logiciel 4^{ème} Dimension, ou 4D, qui est un système de gestion de bases de données relationnelles dont le principal intérêt était d'une part sa facilité à créer des interfaces homme-machine portables sur PC ou sur MacIntosh, et d'autre part d'être bien adapté au problème, du fait que la structure sous-jacente à Thermoptim est précisément celle d'une base de données relationnelle.

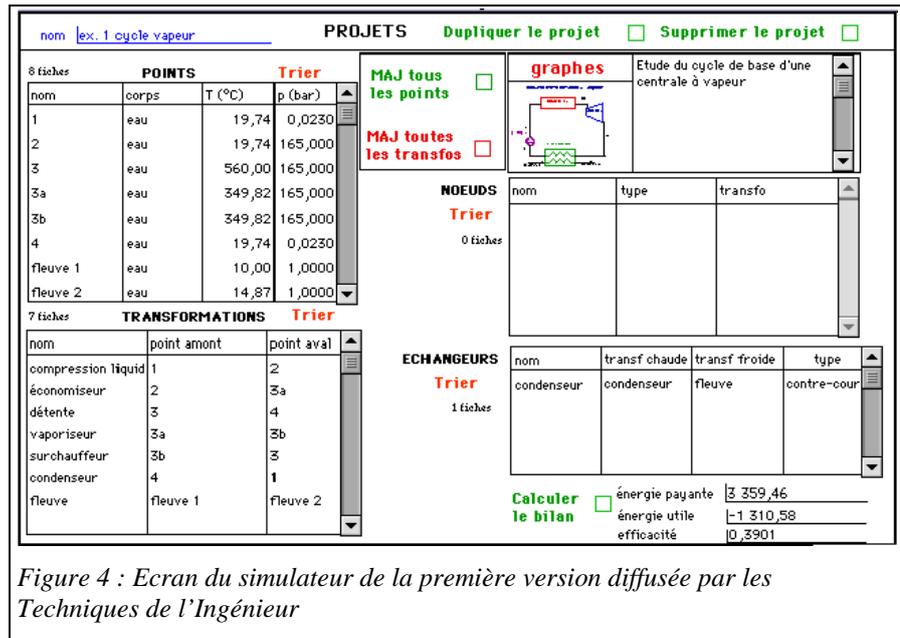


Figure 4 : Ecran du simulateur de la première version diffusée par les Techniques de l'Ingénieur

Alors que l'objectif que je poursuivais initialement était simplement d'améliorer mes propres enseignements, cette version a tout de suite intéressé plusieurs collègues qui ont très vite demandé que des fonctionnalités complémentaires soient ajoutées, ce qui m'a permis de réaliser que ma démarche avait une portée générique, alors que je ne m'y attendais pas particulièrement.

De plus, dès 1998, une version du progiciel a été diffusée par les Techniques de l'Ingénieur à tous ses adhérents (figure 4), augmentant sensiblement son audience et confirmant son intérêt.

Bien documenter les ressources

Lors de cette première diffusion, une de mes craintes était que l'assistance aux utilisateurs (la hot-line) me prenne beaucoup de temps. Afin de limiter les questions, j'ai consacré un soin particulier à la préparation d'une documentation détaillée, en français et en anglais, qui a pris la forme d'un manuel de référence et de plusieurs guides de prise en mains. De fait, les demandes d'explication furent par la suite relativement peu nombreuses.

Club ALET

L'outil commençant à diffuser, une petite communauté d'enseignants utilisateurs s'est progressivement constituée, les échanges faisant ressortir d'une part des besoins en développements complémentaires, et d'autre part un intérêt pour des discussions plus approfondies sur les aspects pédagogiques. Il en est résulté la création fin 1999 du Club ALET (Aides Logicielles pour l'Enseignement de la Thermodynamique), qui s'est réuni en juillet 2000 pour la première fois, et a tenu depuis une dizaine de réunions, la prochaine étant prévue en juillet prochain.

Thermoptim sous Java

L'extension de l'utilisation de Thermoptim eut pour effet de remettre en cause son implémentation sous 4D, qui comportait un certain nombre de limites, notamment sur le plan graphique. En 1998 et 1999, un investissement sous Java, nouveau langage de programmation qui commençait à bien s'étoffer, m'avait permis de développer des diagrammes thermodynamiques interactifs et des petites applets pour les calculs des propriétés des fluides ou pour les combustions. En 2000, convaincu par le potentiel de Java, j'ai traduit tout Thermoptim dans cet environnement, et réalisé une interface graphique permettant de créer des modèles, appelée éditeur de schémas.

Nouvel éditeur de schémas

Le nouvel éditeur de schémas a bien sûr eu un impact direct sur la pédagogie, dès lors qu'il permettait de construire graphiquement les modèles, et réduisait les risques d'erreur de connexion entre composants. La démarche de conception devenait beaucoup plus intuitive.

C'est à partir de 2000 que la diffusion commerciale de la version Java a été confiée au CSTB. Le nombre d'utilisateurs a commencé à croître, et des améliorations diverses ont été apportées au simulateur, notamment en terme de précision de certains calculs.

Premier site Web, publication d'un livre

Le nombre d'exemples traités a considérablement augmenté, la documentation a dû être reprise et complétée pour incorporer les nouvelles fonctionnalités disponibles, et les deux premiers tomes du livre *Systèmes Energétiques* ont été publiés en 2001 [3, 4, 5]. Un premier site Web assez sommaire de présentation de l'outil et de ses possibilités a parallèlement été mis en ligne à cette époque (figure 5), et plus d'une douzaine d'établissements d'enseignement sont devenus utilisateurs de Thermoptim.

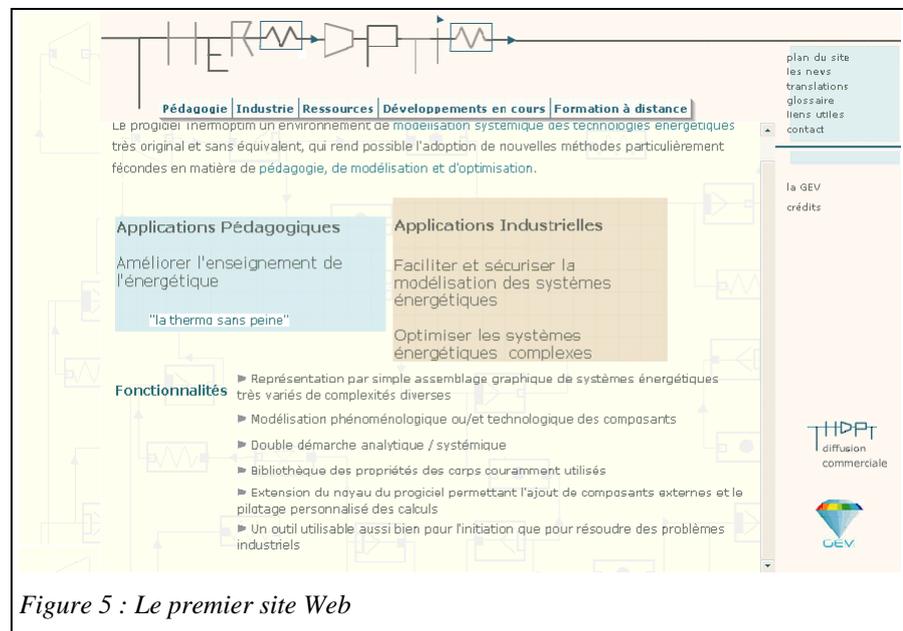


Figure 5 : Le premier site Web

Difficultés pour le non-nominal

En 2002-2003, initialement pour répondre à la demande d'un industriel, quelques tentatives ont été effectuées en vue d'implémenter des fonctionnalités permettant d'étudier le comportement en régime non-nominal de systèmes énergétiques, mais elles se sont heurtées à des difficultés de convergence qui ne pouvaient pas être résolues à l'époque de manière satisfaisante. Comme nous le verrons plus loin, il a fallu attendre 5 ans pour pouvoir progresser sur ce point.

CPGE

A cette époque, j'ai eu la grande surprise de recevoir de multiples témoignages d'intérêt pour Thermoptim de la part de professeurs des classes préparatoires aux grandes écoles. J'en ai été étonné parce que je ne pensais pas du tout qu'une approche non équationnelle de la thermodynamique puisse les intéresser, mais ce qu'ils m'ont dit est qu'ils étaient très heureux de pouvoir montrer à leurs élèves que les mises en équations du programme pouvaient être encapsulées dans un outil logiciel comme Thermoptim : cela permettait de les motiver en leur prouvant que ce qui leur était enseigné débouchait sur de véritables applications.

Depuis, la collaboration avec ces enseignants s'est toujours poursuivie, et onze stages LIESSE ont été organisés, suivis par près de 230 stagiaires. Ces stages ont fourni des occasions de discussions très fructueuses, et de nombreuses suggestions ou demandes de compléments m'ont été faites. C'est ainsi par exemple que j'ai rajouté des diagrammes thermodynamiques en coordonnées (P,v), qui ne présentent aucun intérêt sur le plan industriel, mais permettent aux enseignants de CPGE de faire le lien avec leur programme.

Il est clair que ces échanges et ceux qui ont pris place au sein du Club ALET ont beaucoup contribué à l'adaptation de Thermoptim à des problématiques pédagogiques autres que celles dont j'étais initialement parti, et que cela a facilité sa réappropriation par d'autres enseignants. Les Communautés d'enseignants jouent un rôle décisif pour cela, nous y reviendrons.

Réflexions pédagogiques

Il est très vite apparu que l'introduction d'un outil comme Thermoptim induisait un changement radical dans l'attitude des élèves vis-à-vis de la discipline : j'espérais une amélioration, mais sans imaginer qu'elle serait aussi nette. C'est à partir de 2002 environ que, pour tenter de comprendre l'accueil enthousiaste fait à cet outil à la fois par les élèves et par de nombreux collègues, j'ai ressenti le besoin de développer ma culture sur la pédagogie, qui était très limitée à l'époque. Comme sans doute la plupart des enseignants-chercheurs, je n'avais reçu aucune formation à l'enseignement...

C'est ainsi que j'ai mené quelques explorations dans des domaines scientifiques qui m'étaient jusque-là très largement méconnus : la didactique des sciences et le cognitivisme. Chemin faisant, j'ai trouvé des réponses souvent éclairantes à mes questions et j'ai pensé qu'elles pourraient intéresser d'autres collègues, tant enseignants que concepteurs de multimédias éducatifs.

Ces réflexions, qui ont été publiées en 2004 [1], m'ont permis d'une part de progresser dans ma compréhension de la pédagogie, et d'autre part de faire évoluer les ressources numériques que je développais, pour qu'elles soient plus facilement compréhensibles par les élèves.

Déplacement de la problématique pédagogique

Un point important à signaler est que l'existence du simulateur a induit un déplacement des difficultés pédagogiques que je rencontrais. Le principal point dur initial concernait les calculs de thermodynamique, et l'utilisation de Thermoptim permettait bien de le contourner. Du coup, plus de la moitié du cours était consacrée aux explications relatives à la technologie, quasiment méconnue des élèves au début du cours. Il s'agissait de présenter les différentes technologies de conversion de l'énergie, et de les rendre aussi intelligibles que possibles. Ce type de savoir n'était ni de la théorie, ni du savoir-faire. En approfondissant la réflexion, je me suis rendu compte que le découpage classique entre connaissances procédurales et déclaratives demandait à être affiné, et j'ai proposé un modèle dit RTM(E) dans lequel les connaissances à transmettre sont regroupées en quatre grandes catégories reliées entre elles, appelées la Réalité, la Théorie, les Méthodes (et les Exemples) [1].

Premiers pas en FAD : ExPliSite

C'est à cette époque que j'ai commencé à m'investir dans la mise en ligne de mes ressources numériques, qui apparaissait de plus en plus comme un objectif incontournable à moyen terme. Un financement apporté par le projet Grande Ecole Virtuelle (GEV) du Groupe des Ecoles des Mines (GEM), a permis de commencer la réalisation, par la cellule TICE de l'Ecole des Mines de Paris, d'un premier module de formation à distance, appelé ExPliSite pour Exploration Pédagogique en Ligne avec Simulation de Technologies Energétiques (figure 6).

Il s'agit d'un superbe environnement développé sous Flash proposant un scénario principal, des ressources pédagogiques transversales, un assistant de navigation, et des liaisons avec Thermoptim, avec plusieurs niveaux d'investigation. Trois des exemples de base de l'énergétique y sont traités : la turbine à gaz, la centrale à vapeur et la machine de réfrigération.

Sa mise au point a pris beaucoup de temps, nécessitant un très important effort de scénarisation et la réalisation de nombreux clips sous Flash et leur insertion dans le module complet. C'est un très bel outil, qui continue à être régulièrement utilisé, mais qui souffre d'une forte rigidité qui empêche de le faire évoluer, ce qui est regrettable. Il est en particulier non sonorisé et il serait très difficile de lui ajouter de nouvelles fonctionnalités. Les parcours proposés aux élèves sont figés, du fait d'un parti pris initial assez normatif.

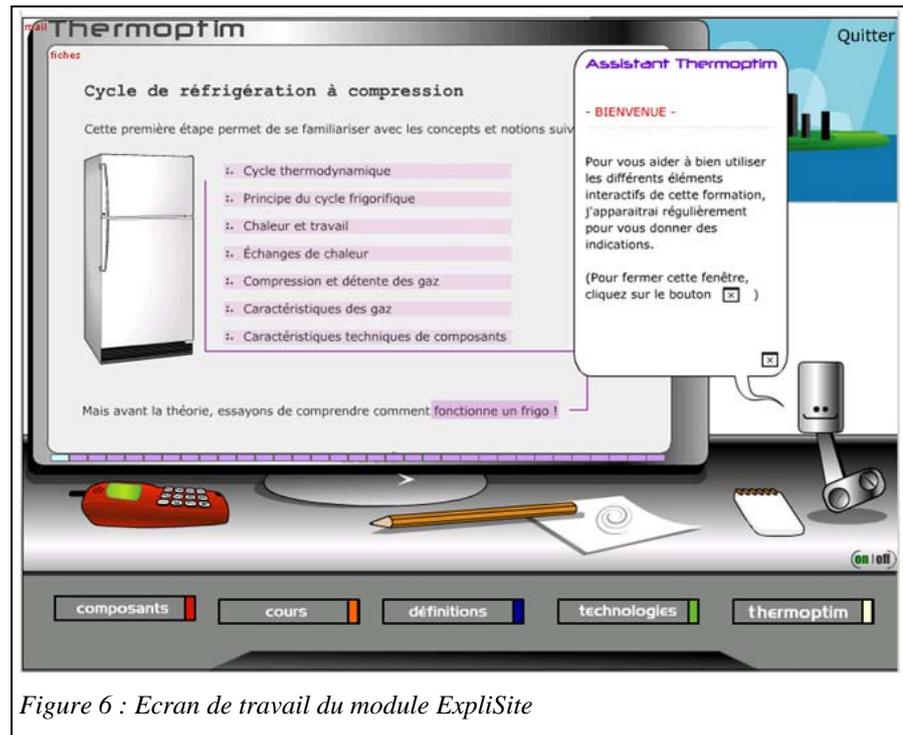


Figure 6 : Ecran de travail du module ExpliSite

Relations enseignants - cellule TICE

Ce travail a eu pour effet indirect de me mettre le pied à l'étrier pour ce genre de réalisation et de roder une première collaboration étroite avec une cellule TICE. Sans que cela remette en cause la qualité de son intervention, cela m'a confirmé dans l'idée qu'il est hautement souhaitable qu'un enseignant soit le plus indépendant possible pour qu'il puisse faire évoluer lui-même ses ressources numériques, et qu'il est de loin préférable que celles-ci soient aussi simples que possible. Mon expérience est que la mise au point des ressources numériques est un processus long et incrémental, que seul l'enseignant peut faire, par itérations, en fonction de leur impact sur la manière d'apprendre des élèves. Il faut donc qu'il puisse facilement les modifier, et qu'il dépende donc le moins possible de spécialistes du multimédia.

J'ai aussi retenu de cette expérience l'importance et la difficulté de la scénarisation.

Accroissement de la demande de formation

Les améliorations rencontrées dans l'assimilation de mes cours d'énergétique par les élèves et la diffusion croissante de Thermoptim dans d'autres établissements d'enseignement se sont traduites par une demande accrue de formations utilisant mes outils. A l'occasion d'une réforme des enseignements de l'Ecole des Mines, il m'a été demandé de dupliquer l'ensemble de mon cours, ce qui induisait un net accroissement de ma charge d'enseignement.

Ces contraintes d'emploi du temps ont réactivé l'intérêt d'une mise en ligne d'une partie significative de mes enseignements. Etant donné que les choix technologiques retenus pour ExpliSite ne constituaient pas une solution généralisable (trop longs, trop rigides et trop coûteux), j'ai cherché quelque chose de plus simple, et surtout ne nécessitant pas un effort de scénarisation trop important.

xml, ou comment traduire concrètement une scénarisation

Il faut aussi dire que, dans les développements que j'avais effectués pour coupler Thermoptim à ExpliSite quelques mois auparavant, j'avais été très intéressé par le potentiel qu'offrait xml pour gérer les enchaînements d'apparition à l'écran de ressources pédagogiques diverses, et j'avais ainsi commencé à développer des outils sous Java d'exploration de scénarios pédagogiques utilisant le simulateur, ce qui m'avait permis d'acquérir une compétence xml.

Pour la mise en ligne de mon cours complet, j'ai testé diverses solutions possibles qui m'avaient été conseillées par mes collègues de cellules TICE du GEM, sans trouver exactement ce que je recherchais. L'intérêt de sonoriser m'apparaissait évident, et était confirmé par tout ce que j'avais lu en matière de pédagogie. L'expérience d'ExpliSite et de mes scénarios d'exploration me poussait à chercher une solution facile à mettre en œuvre et s'appuyant sur ce dont je disposais déjà en matière de scénarisation.

Naissance de Diapason

La révélation s'est faite un jour, quand j'ai pris conscience de ce qui était en fait une évidence : un diaporama contient un scénario pédagogique implicite que l'on peut très facilement exploiter, car :

- l'ordre dans lequel sont placées les diapositives est en principe celui qui sera utilisé lors de la présentation (on peut faire différemment, mais ce n'est pas recommandé) ;
- le message à délivrer lors de la présentation est en principe connu de l'enseignant (il y a sinon un problème) ;
- ce qui intéresse les élèves, c'est davantage le contenu de la diapositive qu'une vidéo de l'enseignant.

Cette constatation, qui semble un truisme, signifie qu'il suffit d'enregistrer dans une bande-son le message qui accompagne une diapositive puis de prévoir un dispositif qui permette d'enchaîner l'apparition des diapositives et des bandes-son associées pour disposer d'un premier module d'enseignement à distance. L'absence de vidéo rend ultérieurement très facile la mise à jour des bandes-son.

C'est précisément le concept des Diaporamas Pédagogiques Animés et Sonorisés Diapason que j'ai mis au point en 2004 sous forme de petite application Flash exécutable dans des navigateurs Web, et qui constitue ce que l'on appelle aujourd'hui un outil de rapid-learning. La scénarisation y est contenue dans un fichier xml qu'une application Java permet de construire intuitivement, sans que l'utilisateur ait à s'investir dans la technique.

Une solution à forte productivité

Avec cet outil, j'ai pu mettre en ligne en quelques mois une cinquantaine d'heures de cours et commencer à expérimenter fin 2004 cette nouvelle forme d'enseignement avec mes élèves de 3^{ème} année. L'accueil a été plutôt favorable, même si quelques ajustements se sont avérés souhaitables.

En particulier, il est apparu qu'il fallait donner aux élèves une information détaillée sur leur degré d'avancement dans le cours et sur les difficultés qu'il leur restait à vaincre. Ce type d'information, dite meta-cognitive, est d'ailleurs souvent soulignée comme pédagogiquement importante par les cognitivistes. Il est notamment fondamental à mon sens de bien spécifier les objectifs pédagogiques du cours et de remettre aux élèves une petite fiche les définissant, en distinguant bien ce qui doit être mémorisé, ce qui doit être simplement compris, et le savoir-faire à acquérir. Une telle fiche peut constituer une sorte de contrat passé entre l'enseignant et ses élèves.

La solution Diapason s'est révélée parfaitement adaptée à l'enseignement de la Réalité technologique, qui, comme on l'a vu plus haut, était devenu la principale difficulté pédagogique dès lors que le simulateur résolvait les problèmes calculatoires.

Sonoriser un diaporama est quelque chose de très simple, même si certains enseignants hésitent encore à le faire aujourd'hui. Je pense qu'avec le temps cette opération se banalisera, tout comme se

Communauté UNITE

unit

THERMOPTIM
La thermodynamique sans peine

GEM

Accueil

Actualité

Contacts

Titres communautaires

Correspondants UNITE

Pédagogies possibles

Programme de travail

Ressources produites

CR - Rapports d'avancement

Bouton d'expériences

Forum

Approche THERMOPTIM

Formation pour l'INDUSTRIE

ACCUEIL

Le projet THERMOPTIM rassemble des enseignants-chercheurs désireux d'aborder différemment la thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques grâce aux Nouvelles Technologies Éducatives (NTE). Il ouvre la voie à une nouvelle approche pédagogique qui permet de dépasser les difficultés auxquelles est confronté l'enseignement classique de cette discipline.

THERMOPTIM forme aujourd'hui un ensemble large et cohérent de ressources s'articulant autour d'un logiciel de simulation (THERMOPTIM) et de modules de formation à distance sonorisés (DIAPASON). Leur utilisation conjointe se révèle pédagogiquement très efficace et rencontre un grand succès auprès des élèves de plusieurs dizaines d'établissements d'enseignement.

Notre objectif est d'enrichir ce projet en complétant l'ensemble existant, et en y associant éventuellement d'autres outils développés par les membres de la communauté.

Cette nouvelle approche porte le nom du logiciel qui a initié son développement.

Le projet THERMOPTIM est soutenu par le consortium UNITE.

Le consortium UNITE (Université Numérique, Ingénierie et Technologie) associe tous les acteurs publics et privés de la formation supérieure en Sciences de l'Ingénieur et Technologie désireux de partager des ressources numériques existantes, des outils, des

Vous trouverez sur ce site :

Un espace Communauté UNITE donnant accès aux informations sur la vie de ce projet au sein d'UNITE :

Communauté UNITE

Un espace THERMOPTIM donnant accès aux diverses ressources pédagogiques de THERMOPTIM :

Approche THERMOPTIM

Un espace Formation pour l'INDUSTRIE permettant un accès

Figure 7 : Site Web Thermoptim-UNIT de 2005

s'est progressivement banalisée l'utilisation des logiciels de traitement de texte, des tableurs, ou des outils de conception de diaporamas.

Comme nous l'avons dit, le très grand intérêt pédagogique de cette formule est qu'un élève dispose à tout moment de l'ensemble des explications orales de l'enseignant, qu'il peut travailler à son rythme, lorsqu'il est disponible pour le faire, et qu'en conséquence il apprend mieux qu'en classe, du moins pour le type d'enseignement que j'assume.

Soutien d'UNIT, second site Web

C'est en 2004 – 2005 que les premiers contacts ont été établis avec UNIT, qui se mettait en place à l'époque. Un premier financement a permis de renforcer la communauté d'enseignants et de développer un nouveau site Web, dont la réalisation a été effectuée par l'Ecole des Mines de Nantes (figure 7). Cet outil était une première tentative pour rassembler dans un tout cohérent et bien structuré les diverses ressources numériques disponibles, mais il s'est vite révélé insuffisant compte tenu de l'audience croissante qu'elles avaient auprès des collègues enseignants et des élèves.

Naissance du portail Thermoptim-UNIT

C'est ainsi qu'en 2006 il est apparu souhaitable de développer un portail dédié (figure 8), ce qu'il a été possible de faire grâce à la poursuite du soutien d'UNIT et aux compétences des collègues de l'Ecole des Mines de Paris à Sophia Antipolis.

Le portail dispose d'un puissant **moteur de recherche** qui permet de retrouver

facilement les informations que l'on désire parmi l'ensemble de ce qui est disponible. Une **Foire Aux Questions** et un **glossaire** sont aussi disponibles. Cet environnement permet ainsi d'accéder aux ressources numériques existantes de diverses façons selon les objectifs poursuivis. Les utilisateurs qui le souhaitent peuvent **s'abonner** sur le portail pour être tenus informés par courriel d'un certain nombre d'événements, comme la publication de nouveaux documents ou la mise à jour de pages existantes.

Le portail dispose d'un **système d'internationalisation assez avancé**, qui lui permet d'afficher des documents dans des langues différentes alors que leur URL est la même. Ainsi, une page s'affiche dans la langue pour laquelle le portail est configuré si traduction existe, et dans sa langue de création sinon.

Pour le concepteur, l'un des grands intérêts du portail est qu'il est possible de l'actualiser de manière incrémentale, de n'importe où, dès lors qu'on dispose d'un accès Internet, alors que la mise à jour d'un site est toujours relativement lourde, et demande des droits d'accès au serveur généralement limités à quelques machines connues.

Figure 8 : écran d'accueil du portail

L'ensemble des utilisateurs non identifiés a accès à une palette de ressources complémentaires permettant de définir de multiples scénarios d'usage, et structurées en quelques grandes rubriques :

- **Bases de thermodynamique**, qui présente comme son nom l'indique les fondements de la discipline ;
- **Guides méthodologiques**, qui regroupe diverses recommandations méthodologiques destinées à faciliter le calcul des systèmes énergétiques, des plus simples aux complexes. 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 ;
- **Technologies**, qui regroupe des fiches thématiques synthétiques présentant les principales technologies énergétiques, en distinguant d'une part les composants (compresseurs, turbines, chambres de combustion...) et d'autre part les systèmes complets (turbines à gaz, moteurs alternatifs, centrales à vapeur...) ;
- **Problèmes globaux**, qui aborde les grands problèmes de l'énergie : énergie au niveau macro-économique (filères énergétiques, comptabilité économique et énergétique), et les aspects géopolitiques (situation énergétique mondiale, problèmes énergétiques des pays en développement, réserves et ressources, marchés de l'énergie) ;
- **Enseignement**, qui comporte deux grands volets, le premier consacré à la pédagogie de la thermodynamique appliquée que nous préconisons et aux communautés d'enseignants qui participent au développement des ressources, et le second qui regroupe toutes les ressources mises en ligne, en particulier l'ensemble des séances Diapason utilisables pour la formation à distance ;
- **Logiciels**, qui est consacrée d'une part au progiciel Thermoptim, et d'autre part aux outils permettant de concevoir et de déployer des séances Diapason. Ces deux sous-rubriques comportent chacune une présentation des outils, de la documentation, et des ressources diverses.

Une cinquantaine d'utilisateurs qui doivent s'identifier ont en outre accès à d'autres rubriques spécifiques, comme par exemple les sites des communautés d'enseignants, ou bien un espace contenant des documents réservés aux enseignants (corrigés des fiches-guides de TD et des exercices). Pour disposer de cet accès, il suffit d'en faire la demande sur le portail et de pouvoir justifier de sa qualité d'enseignant.

Les principales ressources disponibles sont les suivantes :

- des fiches thématiques synthétiques ;
- l'ensemble des séances Diapason ;
- des supports écrits ;
- des fiches-guides de TD ;
- des guides méthodologiques ;
- des modèles de corps et composants permettant d'étendre le noyau de Thermoptim ;
- des notes relatives à la pédagogie de la thermodynamique appliquée.

Ces ressources peuvent être combinées pour former simplement des parties de cours ou des cours complets. A titre d'exemple, plusieurs **modules d'auto-formation** en ligne sont proposés sur des thématiques variées. Ces cursus sont généralement basés sur une progression en trois étapes :

- 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 œuvre et à l'apprentissage de Thermoptim ;
- 2) **la consolidation des notions vues lors de la première étape**, avec quelques compléments théoriques comme par exemple 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 deux premières étapes sont en quelque sorte standard : elles permettent à un apprenant d'acquérir, dans le cadre d'un parcours très balisé, les bases de la discipline. Elles sont essentiellement constituées de séances Diapason qui le guident pas à pas dans les premières leçons. Au fur et à mesure que sa culture du domaine et sa compréhension de la discipline se développent, l'apprenant gagne en autonomie et peut utiliser des ressources numériques complémentaires de Thermoptim et des modules Diapason, comme les fiches thématiques de composants et systèmes et les fiches-guides de TD ainsi que de nombreux exercices. Au cours de la troisième étape, il peut ainsi personnaliser son cursus en fonction de ses centres d'intérêt et de ses aspirations, et accéder aux guides méthodologiques lui expliquant comment aborder des sujets plus difficiles.

Pour un environnement spécialisé dans la thermodynamique appliquée, ce site est très visité (plus de 6000 visiteurs différents par mois), avec une bande-passante de plus de 400 Mo par jour (figure 9).

Extension de ThermoOptim

Concernant ThermoOptim, les années 2002 à 2006 ont vu le développement d'un mécanisme d'extension, dit des classes externes, destiné à permettre aux utilisateurs de personnaliser l'outil en créant leurs

propres modules. Les classes externes ont ainsi rendu possible d'une part la mise au point de composants représentant des technologies énergétiques novatrices, notamment à faible impact environnemental, et à partir de 2008, l'étude en régime non-nominal des systèmes couplés, problématique particulièrement difficile et importante, sur laquelle rappelons-le nous avons buté en 2002-2003.

Couplage à un solveur

Enfin, en 2009, nous avons aussi pu coupler ThermoOptim à un solveur puissant, minPack, qui permet d'une part de résoudre des systèmes d'équations non linéaires complexes, et d'autre part de réaliser des optimisations non linéaires, ce qui élargit encore davantage la portée du progiciel. Un troisième tome du livre *Systemes Energétiques* a été publié [5], et les deux premiers mis à jour [3, 4], tandis qu'un article des *Techniques de l'Ingénieur* dressait une synthèse de ThermoOptim [7].

Ouverture vers la formation professionnelle continue ou initiale

Au cours des années, ThermoOptim et son portail sont ainsi devenus les vecteurs d'approches pédagogiques radicalement nouvelles de la thermodynamique appliquée dans les universités, les classes préparatoires et les grandes écoles.

Depuis 2007, des partenariats ont été noués avec Electrabel et la Marine Nationale pour l'utilisation de ces ressources numériques dans le contexte de la formation professionnelle des opérateurs, notamment de centrales et chaufferies nucléaires. Même si les problématiques sont très différentes de celle de la formation académique, des principes pédagogiques analogues peuvent être retenus, avec notamment le souci de limiter la charge cognitive des élèves en limitant le recours à des équations qu'ils ne mettront jamais en œuvre par eux-mêmes dans leur métier, et le souci de faire comprendre des phénomènes scientifiques et techniques complexes avec un bagage mathématique réduit.

Pour de tels élèves, ThermoOptim peut constituer un banc d'essais virtuel, un outil de découverte et initiation de l'intérêt pratique de la thermodynamique qui s'adresse principalement à des débutants confrontés pour la première fois à la discipline. L'idée est ici que l'élève soit placé face à une technologie énergétique et qu'il ait la possibilité de l'explorer pour la comprendre. L'écran synoptique de ThermoOptim et les diagrammes interactifs sont pour cela des outils particulièrement indiqués : l'élève charge un projet existant représentant une machine réelle et l'étudie pour en comprendre le fonctionnement, en analysant dans un premier temps son schéma, c'est-à-dire les éléments qui le composent et leurs interconnexions, ainsi que sa représentation dans les diagrammes thermodynamiques, puis en procédant à des études de sensibilité sur ses paramètres.

A ce stade, il n'est pas nécessaire que l'élève sache comment construire par lui-même un modèle : ses connaissances en thermodynamique sont embryonnaires, et ce qui compte, c'est qu'il puisse explorer le modèle

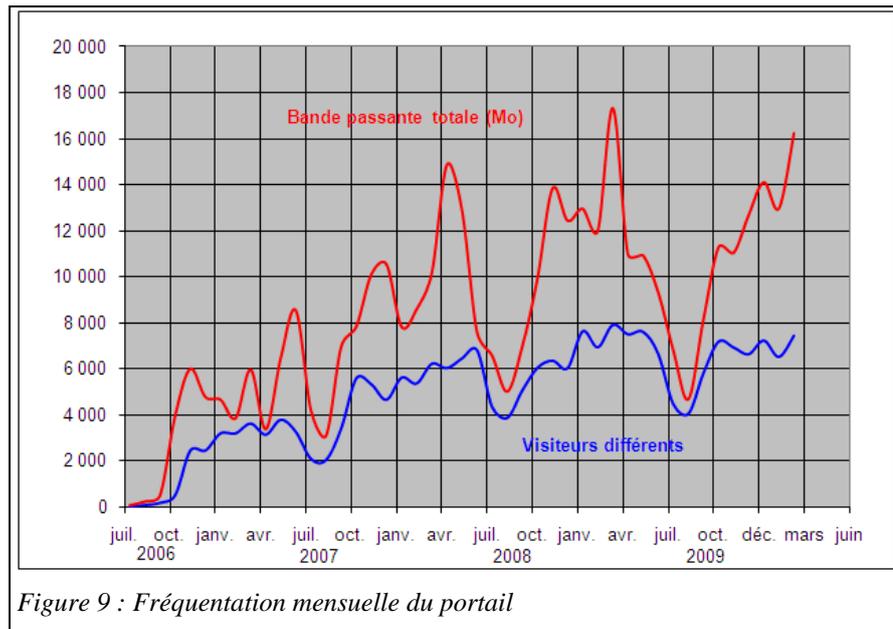


Figure 9 : Fréquentation mensuelle du portail

qu'on lui fournit, qu'il parcourt les différents écrans (affichables par simple double-clic sur les éléments graphiques qu'il a sous les yeux). Ce faisant, il acquiert progressivement le vocabulaire de base et voit comment les différentes notions introduites en cours sont mises en œuvre en pratique. Sur le plan pédagogique, l'exploration des modèles qui sont à sa disposition lui permet de mieux faire le lien entre les bases théoriques présentées en cours et la réalité technologique, et de voir comment les connaissances abstraites peuvent être mises en pratique, ce qui renforce notablement sa motivation et sa compréhension.

Dans ce contexte, de nombreux échanges pédagogiques prennent place dans le cadre d'un réseau des enseignants énergie de la Marine Nationale, ouvert à la Marine Marchande, qui se réunit chaque année une fois en présentiel et deux ou trois fois en téléconférence.

Les développements actuels ont donc pour objet de compléter les ressources disponibles qui jusqu'à récemment concernaient essentiellement les 1^{er} et 2^{ème} cycles, en direction d'une part du 3^{ème}, avec le dimensionnement technologique et les études en régime non-nominal, et d'autre part de la formation professionnelle.

Internationalisation

Thermoptim est aujourd'hui disponible en huit langues, mais sa documentation seulement en français et en anglais. Quant au portail, seules quelques pages ont pu être traduites. L'important effort qu'il reste à effectuer pour son internationalisation ne se justifiera que s'il existe une demande clairement identifiée, et si possible une communauté d'enseignants étrangers motivés pour effectuer les transpositions à leur contexte pédagogique.

Perspective d'ensemble

Un cheminement multipolaire, itératif et incrémental

Comme on peut le voir, le cheminement suivi a été loin d'être direct : il a fait l'objet de nombreuses reconnaissances et explorations, certaines fécondes, d'autres non. La démarche a été itérative, avec alternance de nombreuses activités complémentaires :

- travail en classe avec les élèves avec observation des difficultés qu'ils rencontraient et de leurs réactions devant les évolutions pédagogiques et technologiques ;
- discussions avec des collègues enseignants utilisateurs, pour écouter leurs suggestions et bénéficier de leur retour d'expérience ;
- développement et amélioration des TICE (simulateur, visualisateur et concepteur Diapason, portail) ;
- discussions avec les collègues informaticiens, qu'ils appartiennent ou non aux cellules TICE, pour leur présenter les réalisations, leur soumettre les problèmes rencontrés, et leur demander conseil ;
- réflexions pédagogiques avec recherche de références théoriques et retour vers les outils pour les faire évoluer à la lumière de ces apports ;
- rédaction afin d'explicitier le plus clairement possible les conclusions obtenues, avec pour débouchés la documentation des outils, le portail, quelques publications, et les trois tomes du livre sur les systèmes énergétiques ;
- prise de recul par rapport aux autres phases, en vue d'effectuer des synthèses sur les résultats obtenus, de faire le point sur l'avancement des actions, et préparer les phases ultérieures.

Difficultés rencontrées

Après avoir effectué un développement significatif, une des difficultés majeures dans mon cheminement a sans doute été de savoir comment fixer les futures étapes, ou, pour employer un langage de marin, de faire le point et de tracer la nouvelle route. Cette difficulté était liée à celle de l'évaluation de l'impact pédagogique des nouveaux développements. Au début, ma charge d'enseignement était relativement faible, et la périodicité des cours était réduite, de telle sorte qu'il pouvait se dérouler de longs mois sans que je puisse tester en situation mes nouvelles idées. Il était donc difficile de dresser un bilan des évolutions pédagogiques effectuées, et encore plus d'arriver à prendre suffisamment de recul pour se fixer de nouveaux objectifs. Ultérieurement, les enseignements se multipliant, les temps de retour se sont réduits.

Un des exercices les plus fatigants, et même quelquefois frustrants a été de devoir convaincre de l'intérêt de ces innovations pédagogiques. Mais il faut aussi reconnaître d'une part que c'est un exercice nécessaire si l'on

souhaite disposer d'un soutien externe, notamment financier, et d'autre part que c'est aussi un très bon moyen pour expliciter ses intuitions, même si c'est quelquefois difficile. Les échanges avec les collègues enseignants, et notamment les présentations pendant les séminaires de travail ou les stages de formation aux outils, obligent eux aussi à formuler le plus clairement possible ce que l'on ressent un peu confusément au début. C'est difficile, mais nécessaire...

Bien expliciter les difficultés pédagogiques rencontrées

Que la démarche ait été itérative signifie qu'il aurait été impossible de spécifier à l'avance des cahiers des charges du simulateur ou des autres outils, même dans leurs grandes lignes : c'est chemin faisant, en concrétisant des intuitions et en les confrontant au verdict des élèves, que leur élaboration a été possible. J'insiste là dessus, car il me semble très difficile pour des concepteurs de nouvelles ressources numériques de spécifier a priori de manière précise à quoi ressembleront in fine leurs produits. Il faut les encourager à avancer pas à pas, en suivant leurs intuitions, et ne pas les stériliser s'ils ont du mal à bien expliciter ce qu'ils perçoivent un peu confusément au début.

Sans doute faudrait-il insister davantage sur l'explicitation détaillée des difficultés pédagogiques rencontrées plutôt que sur la présentation des solutions technologiques envisagées. C'est en précisant bien les objectifs pédagogiques que l'on se fixe et en identifiant les difficultés auxquelles on est confronté que l'on définit le travail à réaliser.

Le fil directeur doit toujours être la résolution de difficultés pédagogiques avérées, en les prenant une par une, à la méthode des Horace et des Curiace, chaque évolution pédagogique déplaçant la problématique et demandant de nouveaux ajustements et de nouvelles formulations paradigmatiques. La technologie n'est qu'un moyen au service d'une fin : faire en sorte que les élèves puissent mieux apprendre, ce qui suppose que l'enseignement qu'on leur propose ait un sens et qu'ils puissent progresser par eux-mêmes, les TICE n'étant que des outils, même s'ils sont très importants. Il faut partir de la pratique pédagogique et des problèmes que l'on rencontre, et chercher des solutions, et non pas partir d'une technologie et chercher un terrain d'application possible.

Il peut paraître paradoxal que la grande majorité des enseignants du supérieur ne reçoivent aucune formation à la pédagogie, mais c'est un fait bien établi : les enseignants-chercheurs sont avant tout des chercheurs très largement autodidactes en matière de pédagogie. Avec le recul, il me paraît fondamental de prendre le temps de se former sur ce plan, ne serait-ce qu'en développant sa culture personnelle grâce à des lectures. C'est pour cette raison qu'une page du portail dédiée à ce sujet rassemble des références qui pourraient être utiles à des collègues.

Optimiser le contenu scientifique de l'enseignement

Il est fondamental de bien définir le contenu de l'enseignement, à la fois dans son articulation (quels types de savoirs et quel dosage) et dans son extension, notamment en terme de contenu scientifique : quelles équations faut-il enseigner ? car les TICE induisent un déplacement du savoir à acquérir, dès lors que les ordinateurs incorporent un savoir de plus en plus important, et deviennent donc de véritables prothèses mentales qu'il importe d'utiliser au mieux.

Il faut pour cela mettre en place un processus d'ingénierie pédagogique et ne pas hésiter à remettre en cause les approches traditionnelles, héritées d'un passé où les capacités de calcul étaient beaucoup plus limitées et où des présentations axées sur une logique disciplinaire étaient considérées comme normales, pour se préparer à une logique de formation beaucoup plus fonctionnelle et utilitaire, où ce n'est souvent que lorsque l'on a besoin de développer une compétence que l'on est prêt à aller chercher les savoirs nécessaires, et ceci de manière contextuelle, dans des approches similaires à celles qui sont mises en œuvre dans les apprentissages par projets ou par problèmes.

Diversifier les ressources proposées

Plus généralement, il y a un grand intérêt à proposer aux élèves une palette assez diversifiée d'approches et de ressources numériques, car cela permet à chacun d'entre eux d'utiliser celles qui lui conviennent le mieux, sachant que ce qu'on appelle quelquefois les styles d'apprentissage peuvent être très variés. A titre d'exemple, même si la plupart de mes élèves préfèrent apprendre avec les séances Diapason, certains y sont complètement réfractaires et me disent qu'ils aiment mieux travailler directement avec mes livres...

Viser la simplicité

Pour ces réalisations, nous avons mis davantage l'accent sur les fonctionnalités que sur l'esthétique, et ce choix serait maintenu s'il fallait redéfinir ce qui a été créé. Nous ne nous sommes jamais non plus imposés de charte graphique trop stricte, même si nous avons cherché à être cohérents et homogènes. Il me semble qu'il faut dans la mesure du possible éviter de contraindre le processus de création de ressources par un carcan normatif trop étroit.

S'inscrire dans la durée

Vous remarquerez aussi que ce projet s'est inscrit dans la durée, sur une période d'une vingtaine d'années. Ce n'est en effet que dans la durée que peuvent être résolues certaines difficultés, car, entre le moment où elles sont identifiées et celui où des solutions réellement satisfaisantes sont trouvées, il peut parfois se passer beaucoup de temps, soit du fait de la nécessité d'une longue maturation ou de plusieurs reformulations, soit parce que les outils ne sont pas encore disponibles. Ce n'est qu'après une succession d'essais, de correctifs, d'explicitations d'intuitions, de remises en cause, que l'on aboutit à quelque chose de satisfaisant, au moins temporairement. Cent fois sur le métier, remettez votre ouvrage...

Fondement de la motivation

Le développement de cet environnement pédagogique a été rendu possible grâce au soutien moral et financier de l'Ecole des Mines de Paris, du Groupe des Ecoles des Mines et enfin d'UNIT, que nous ne remercierons jamais assez pour leur appui. Il a aussi beaucoup bénéficié des conseils de nombreux collègues dont il est impossible de citer ici tous les noms². Mais, plus que tout, c'est le changement radical d'attitude des élèves qui a servi d'encouragement à ce travail. Passer d'une situation d'échec pédagogique à une autre où les élèves arrivent à véritablement maîtriser cet enseignement, c'est cela qui a été le fondement de ma motivation.

Echanger avec les communautés d'enseignants

Les interactions avec les communautés d'enseignants ont elles aussi joué un rôle fondamental. Il faut les aider à s'appropriier les ressources existantes, les encourager à apporter leur contribution, répondre dans les meilleurs délais à leurs sollicitations, être réactif... Il est souhaitable d'organiser des sessions de formation et des séminaires d'échanges pédagogiques du type de ceux qui ont pris place dans le cadre du Club ALET ou lors des stages LIESSE, de leur procurer une assistance dans leurs propres démarches de réflexion pédagogique, car, alors qu'un enseignant est généralement inséré dans de nombreux réseaux de recherche qui lui donnent l'occasion d'échanger avec ses pairs, il reste très seul face à ses élèves et ne peut que rarement discuter pédagogie avec ses collègues.

Conclusion : avancées pédagogiques réalisées

Les principales avancées pédagogiques ont été indiquées dans les pages précédentes. Nous nous contenterons ici de résumer les éléments principaux de notre reconception de l'enseignement de la thermodynamique appliquée :

- tout d'abord, une très forte réduction de la charge cognitive imposée aux élèves, d'une part au niveau global, du fait de la suppression de nombreux développements équationnels qui deviennent inutiles dès lors qu'ils disposent d'un simulateur, et d'autre part au niveau des différents supports de cours et des écrans de Thermoptim, qui ont été conçus en tenant compte des recommandations de Sweller ;
- ensuite, une structuration des schèmes très poussée par rapport aux présentations classiques, le simulateur étant basé sur une structure de base de données relationnelle très spécifique, reliant les différentes notions abordées de manière facile à comprendre et à retenir (figure 10), directement reflétée dans les écrans du progiciel. On notera que cette figure correspond à une carte conceptuelle au sens de J. Novak [6] ;
- la fourniture aux élèves d'informations meta-cognitives leur permettant de bien suivre leur progression, depuis la fiche d'objectifs pédagogiques jusqu'au découpage des modules de formation en trois étapes distinctes ;
- une multiplication des ressources numériques mises à disposition des élèves, afin qu'ils puissent utiliser celles qui correspondent le mieux à leurs styles d'apprentissage ;

² <http://www.thermoptim.org/sections/divers/credits>

- un apprentissage constructiviste les rendant actifs et leur permettant de décider par eux-mêmes de leur rythme de progression, avec de nombreuses activités de construction de modèles lors des séances de travaux dirigés ou de projet ;
- le maintien, tout au long de la réalisation du projet, d'un fil directeur principal correspondant à l'identification des difficultés pédagogiques rencontrées et à leur résolution.

Il est indéniable que la technologie induit un changement du contenu à enseigner et que la disponibilité des TICE permet de renouveler profondément les approches pédagogiques. Nous avons cherché à tirer parti de ce potentiel pour dépasser les limites des approches classiques de la discipline.

Cet environnement pédagogique peut être utilisé **aussi bien en formation initiale qu'en formation continue** par des ingénieurs en activité désireux d'actualiser leurs connaissances sur les systèmes énergétiques classiques ou innovants, notamment à faible impact environnemental.

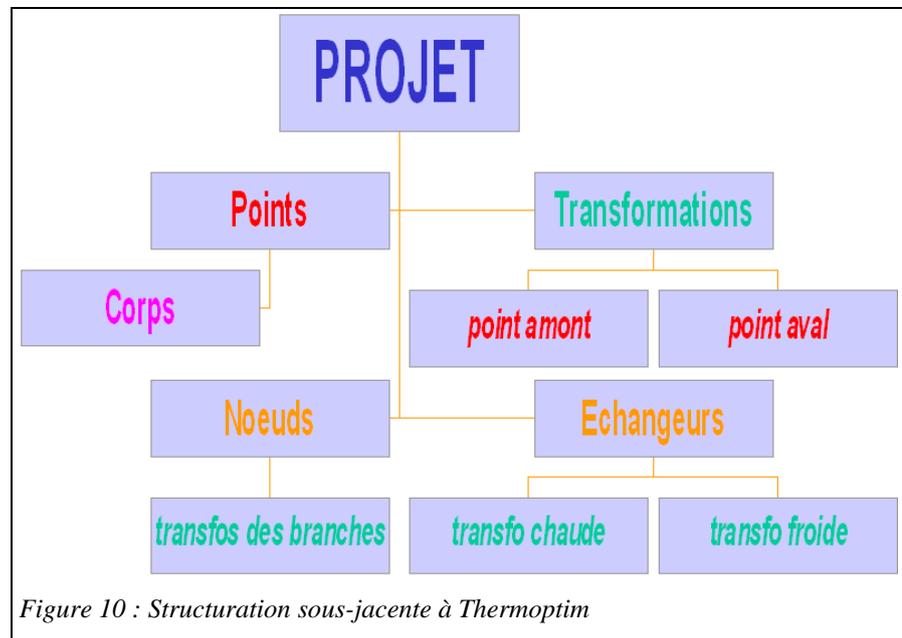


Figure 10 : Structuration sous-jacente à Thermoptim

Thermoptim dispose en outre de fonctionnalités avancées que nous n'avons pas pu présenter ici et qui en font un puissant progiciel de modélisation de systèmes énergétiques innovants : optimisation systémique basée sur la méthode du pincement, génération de structures productives pour automatiser l'établissement des bilans exergétiques, outils de dimensionnement technologique et d'analyse du fonctionnement en régime non-nominal [7]...

Références

- [1] GICQUEL, R. Utilisation pédagogique des simulateurs : Volet 1 : éclairages de la didactique, Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie, n° 868, novembre 2004, Volet 2 : application à l'enseignement de la thermodynamique, Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique-Chimie, n° 869, décembre 2004.
- [2] SWELLER, J. Cognitive technology: Some procedures for facilitating learning and problem solving in mathematics and science. *Journal of Educational Psychology*, 81 (4), 457-466, 1989
- [3] GICQUEL R., Systèmes Energétiques, Tome 1 : méthodologie d'analyse, bases de thermodynamique, Thermoptim, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2ème édition, janvier 2009.
- [4] GICQUEL R., Systèmes Energétiques, Tome 2 : applications, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2ème édition, janvier 2009.
- [5] GICQUEL R., Systèmes Energétiques, Tome 3 : cycles et modélisations avancés, systèmes innovants à faible impact environnemental, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, janvier 2009.
- [6] NOVAK, J. D., GOWIN, D. B. *Learning how to learn*. Cambridge : Cambridge University Press, 1984.
- [7] GICQUEL, R. Le progiciel Thermoptim, une boîte à outils pour l'énergétique, *Techniques de l'Ingénieur, Génie Energétique*, BE 8047, 2009.