

Reconception de l'enseignement de la thermodynamique appliquée avec le dispositif Thermoptim

Nous présentons une nouvelle méthode d'apprentissage originale et extrêmement simplifiée de la thermodynamique appliquée à l'énergétique, basée sur une reconception radicale de la pédagogie s'appuyant sur le simulateur Thermoptim et sur une profonde remise en cause du contenu à enseigner, guidée par des approfondissements méthodologiques relevant de la didactique. Les nombreuses ressources numériques développées sont mises à disposition de la communauté dans le portail Thermoptim-UNIT (www.thermoptim.org).

Introduction

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.

Les ressources développées dans le cadre du projet Thermoptim-UNIT sont aujourd'hui utilisées pour l'enseignement de la thermodynamique appliquée à 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.

Dans cette présentation, je vous ferai part d'un retour d'expérience sur le renouveau pédagogique correspondant, et je montrerai que, contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'introduction des technologies dans l'enseignement ne porte pas seulement sur la forme mais amène aussi souvent à reconsidérer le fond, c'est-à-dire le contenu même de l'enseignement.

Limites des approches classiques

Comme la très grande majorité des enseignants-chercheurs, j'ai commencé ma carrière dans la recherche, et mes premières expériences d'enseignement se sont limitées à l'animation de travaux dirigés.

Ce n'est qu'assez tard que j'ai eu à reprendre des cours magistraux, pour remplacer au pied levé un collègue immobilisé pour raisons de santé. Il s'agissait d'un cours sur les machines thermiques, et j'avais à assurer la partie du cours relative aux moteurs à combustion interne, à savoir essentiellement les turbines à gaz et les moteurs alternatifs du type essence et diesel.

L'enseignement que j'ai repris était assuré pour partie par mon collègue et pour partie par un ingénieur de l'industrie automobile. Leur complémentarité permettait de présenter aux élèves à la fois les aspects théoriques et la réalité industrielle.

Comme la très grande majorité des enseignants-chercheurs, j'ai commencé pendant deux ans environ par me couler dans le moule mis en place par mes collègues en utilisant leur approche pédagogique, et ce n'est qu'ensuite que je l'ai remise en question, lorsque je me suis trouvé en situation d'échec sur le plan pédagogique.

Le cours passait mal auprès des élèves, et, compte tenu de leur niveau, je ne pouvais pas les blâmer. En approfondissant la question, je suis arrivé à la conclusion que si une chose devait être remise en cause, c'était essentiellement la pédagogie traditionnelle que j'utilisais.

Il est bien connu que la thermodynamique est une matière difficile à enseigner. Le problème est identifié de longue date, et de nombreux efforts ont été faits pour y remédier, mais jusqu'à récemment on manquait encore de solutions, et ceci malgré les efforts déployés par les enseignants et les évolutions des programmes.

La liaison théorie / applications, essentielle pour la compréhension de toute discipline, est beaucoup moins simple et intuitive en thermodynamique qu'elle ne l'est dans d'autres champs de la physique.

Dans la démarche classique de l'enseignement des sciences expérimentales, comme par exemple en électricité ou en mécanique, la théorie et les applications à des réalisations simples sont présentées à peu près en même temps aux élèves, avec si possible quelques travaux pratiques.

La pertinence des modèles simples ($U = R I$, équilibre des forces) est alors facilement vérifiée et le lien entre théorie et technologie semble immédiat ; c'est ainsi que l'on parle des "lois" de la physique élémentaire, alors qu'il s'agit bien de modèles directement intelligibles qui peuvent expliquer le fonctionnement de nombreuses technologies très utiles et connues de tous (lampe électrique, résistance chauffante, machines simples comme le treuil, le palan, le plan incliné, le pendule...).

Pour les systèmes énergétiques, il est malheureusement presque toujours impossible de trouver des modèles à la fois simples et précis. En caricaturant à peine, on pourrait dire que les approches classiques de la discipline sont confrontées à un dilemme, les modèles auxquels elles conduisent étant soit irréalistes, soit incalculables.

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.

L'exemple type est celui des études des moteurs à combustion interne, qui à ma connaissance sont in fine considérés comme traversés par de l'air supposé être un gaz 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 n'a jamais pollué et ne polluera jamais !

Le message subliminal qu'on leur adresse est le suivant : cet enseignement est à la fois très rébarbatif et totalement inapplicable : il ne vous servira à rien dans votre vie professionnelle.

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. Ils en savent moins que leurs grands anciens, ce qui est un comble.

C'est à ce moment-là que j'ai compris qu'avec cette approche je ne pourrais jamais atteindre les objectifs implicites que je poursuivais, c'est-à-dire rendre mes élèves capables, à l'issue du cours, de s'attaquer aux défis actuels de l'énergétique, comme la réduction de l'impact environnemental des technologies, l'amélioration des rendements dans des conditions économiques acceptables, etc.

Si vous êtes intéressé par le cheminement que j'ai suivi pour modifier cette pédagogie, vous trouverez dans les documents mis à votre disposition des explications détaillées sur ce sujet¹².

Le simulateur Thermoptim

Pour dépasser cette difficulté pédagogique majeure, j'ai été amené à concevoir un simulateur, étant donné qu'il n'en existait pas à l'époque.

Dans les années 1990-1995, j'avais initialement développé de nombreuses feuilles de calcul pour résoudre les équations que je présentais à mes élèves, mais cette manière de faire a assez rapidement trouvé ses limites, d'une part parce qu'ils 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.

C'est l'une des principales limites des tableurs : leur potentiel est considérable, mais la lisibilité du code est très réduite, et sa maintenance difficile. Ils conservent cependant à mon sens un grand intérêt, comme compléments des simulateurs.

Le simulateur Thermoptim³ permet de modéliser de manière graphique et intuitive un très grand nombre de cycles thermodynamiques, des plus simples aux plus complexes. Il est utilisé aussi bien pour des besoins de formation que dans les laboratoires de recherche ou les bureaux d'étude industriels. Une version de démonstration très utilisée pour l'enseignement est téléchargeable⁴.

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

¹ <http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/projet-thermoptim-unit.html>

² <http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/projet-thopt-unit-outils.html>

³ http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/presentation-thermoptim_1.html

⁴ <http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/liens-vers-sites.html>

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.

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.

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 le simulateur.

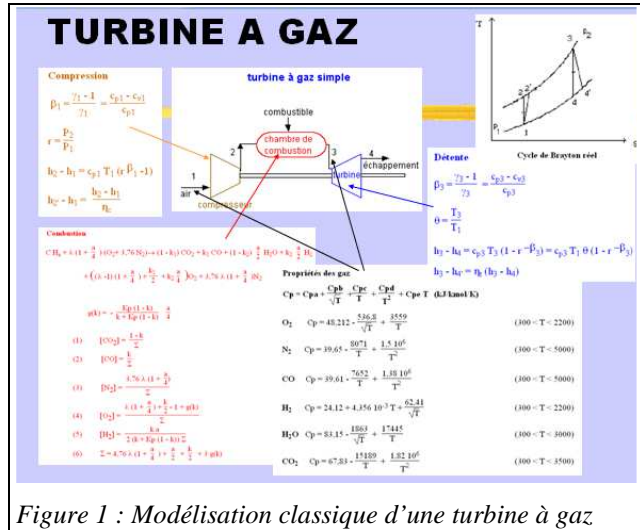


Figure 1 : Modélisation classique d'une turbine à gaz

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.

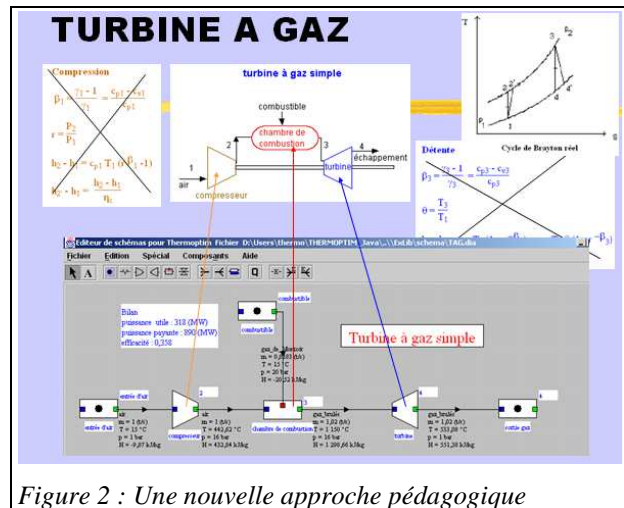


Figure 2 : Une nouvelle approche pédagogique

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. Ils sont de plus pleinement opérationnels lorsqu'ils sont en stage dans les entreprises.

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.

Fondements de la nouvelle méthode

Je vais me contenter maintenant de présenter les fondements de la nouvelle méthode qui est aujourd'hui utilisée par de nombreux collègues qui étaient confrontés aux mêmes difficultés que moi, souvent dans des contextes éducatifs différents.

Concevoir un simulateur n'est cependant qu'une première étape, car son existence induit un déplacement de la problématique pédagogique : les calculs étant effectués par le simulateur, l'enseignement de la mise en équation des évolutions théoriques subies par les fluides ne se justifie plus. Il peut être drastiquement réduit.

Il importe en revanche que les apprenants consacrent 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.

Le renouveau pédagogique repose ainsi sur un **déplacement du savoir** présenté aux élèves : l'existence du simulateur conduit à profondément remettre en cause le contenu du cours.

Comme vous vous en doutez, une telle remise en cause n'a pas été immédiatement acceptée par tous les collègues enseignant la discipline, même si elle a depuis convaincu nombre de ceux qui connaissaient des difficultés analogues aux miennes.

Comme vous le voyez, l'utilisation des technologies éducatives ne conduit pas seulement à changer la forme des enseignements, mais elle peut aussi conduire à modifier le fond, c'est-à-dire le contenu enseigné.

Quel contenu enseigner ?

Très rapidement, il est apparu que l'utilisation de ThermoOptim 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. Pour tenter de comprendre l'accueil enthousiaste fait à cet outil à la fois par les élèves et par un nombre croissant de collègues, j'ai mené quelques explorations sur 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.

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 ThermoOptim 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.

Plus généralement, dès lors que je remettais en cause le contenu de mon enseignement, une des questions qui m'interpellait le plus était de savoir comment choisir ce contenu. Il s'agissait de répondre à la question : « que faut-il enseigner ? ».

Pour aborder ce sujet, la didactique met l'accent sur la distinction aujourd'hui classique entre savoir et savoir-faire. On sait que les connaissances déclaratives sont de l'ordre du discours, du savoir, alors que les connaissances procédurales sont de l'ordre de l'action, du savoir-faire [2]. Cette distinction est bien évidemment essentielle, mais elle est trop globale pour notre propos.

Par ailleurs, les didacticiens ont montré que le savoir tel qu'il est enseigné diffère du savoir dit savant, c'est-à-dire tel qu'il existe pour le monde de la recherche. Ils insistent sur la nécessaire transposition didactique des savoirs savants, qui doit être faite compte tenu notamment des pratiques sociales de référence qui précisent le contexte dans lequel s'inscrit l'enseignement.

Ces concepts constituent bien la toile de fond sur laquelle s'inscrit notre réflexion, mais ils ne suffisent malheureusement pas pour définir concrètement le contenu de l'enseignement.

Faute d'avoir trouvé dans la littérature un modèle qui réponde pleinement à mon attente, j'en ai proposé un que j'ai appelé **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].

Par Réalité, j'entends le monde réel, tel qu'il existe concrètement, c'est-à-dire la nature et la technologie, les faits observés, la matière, le terrain, etc. Il faut guider les élèves dans leur découverte du monde.

L'étude de la Réalité par l'observation, l'analyse et l'expérimentation, permet de développer ou d'affiner la Théorie, c'est-à-dire un schéma explicatif mettant en évidence les ressemblances entre les différentes observations de la Réalité, et les expliquant de manière à la fois cohérente et aussi simple et générique que possible.

La Théorie d'une part constitue ainsi une grille de lecture de la Réalité, et d'autre part sert de guide pour l'élaboration de Méthodes (et/ou d'outils opérationnels) de résolution de problèmes, faisant si nécessaire appel à des concepts spécifiques.

Cette typologie me paraît structurer de manière très féconde les connaissances relatives à une discipline scientifique, surtout si elle est complétée par les principaux Exemples d'application, qui illustrent très concrètement comment résoudre (grâce aux Méthodes et dans le cadre d'une Théorie) une classe de problèmes relative à un aspect particulier (de la Réalité).

C'est en effet autour des Exemples que s'explicitent le plus clairement les liens qui existent entre les trois pôles de référence (Réalité, Théorie, Méthodes). D'où leur importance fondamentale lors de l'apprentissage de la discipline. Il est en particulier indispensable que ces exemples soient réalistes et qu'ils montrent par quelles méthodes les théories sont mises en application.

Pour l'enseignement de la thermodynamique appliquée à l'énergétique, la Réalité comprend bien entendu les différentes technologies de conversion de l'énergie, mais aussi la compréhension phénoménologique du comportement des fluides qu'elles mettent en œuvre.

Très clairement, le simulateur fait partie des Méthodes.

Quant aux Exemples de base, ils sont bien connus : les centrales à vapeur, les turbines à gaz, les moteurs alternatifs à combustion interne et les machines de réfrigération.

C'est surtout pour la Théorie que les choses sont le moins évidentes. Le contenu à enseigner dépend profondément du contexte éducatif : il n'est pas le même dans une classe préparatoire aux grandes écoles, en IUT, en école d'ingénieurs ou à l'université.

Dans tous les cas, la pondération entre ces quatre catégories dépend des objectifs pédagogiques visés.

Réalité, Théorie, Méthodes et Exemples constituent une part essentielle de ce que KUHN, dans la postface de la seconde édition française de *La structure des révolutions scientifiques* ([3], p. 215), appelle la matrice disciplinaire, qui représente ce qu'un groupe de scientifiques a en commun (au lieu de Réalité, il parle de nature, au lieu de Théorie, de généralisations symboliques, mais le sens est bien le même, et il insiste fortement d'une part sur l'objectif de la « science normale » qui est de résoudre des énigmes, ce qui nécessite la mise au point de Méthodes, et d'autre part sur le rôle-clé joué par les Exemples).

Le modèle RTM(E) permet à notre sens de distinguer correctement les différentes catégories de connaissances qui structurent une discipline relevant de la physique. Pour les mathématiques, la Réalité est sans doute moins directement perceptible.

L'apprentissage d'une discipline scientifique suppose ainsi l'acquisition à la fois de connaissances déclaratives pour la Réalité et la Théorie, et de connaissances procédurales pour les Méthodes, qui correspondent essentiellement à du savoir-faire.

Comment scénariser le cours

Une fois le contenu choisi, un point que nous n'avons pas encore évoqué est lui aussi de première importance. Il s'agit de la scénarisation du cours, c'est-à-dire de la manière d'introduire les différentes notions, de les séquencer pour que les élèves puissent les apprendre du mieux possible.

Le problème est particulièrement aigu pour les apprenants en formation continue, ou plus largement en formation professionnelle, qui diffèrent en effet profondément des étudiants inscrits en formation initiale dans le système universitaire. Même si certains sont diplômés de l'enseignement supérieur, ils ont quitté les amphis depuis parfois de longues années et, faute de les mettre en pratique, ont oublié de nombreuses notions qui sont des prérequis implicites des présentations des cycles thermodynamiques élémentaires qui leur sont habituellement proposées aujourd'hui. Bien évidemment, si leur formation initiale est d'un niveau modeste, leurs bases en mathématiques et en physique sont encore plus lacunaires. Il en résulte que les pédagogies utilisées pour les étudiants en formation initiale ne leur sont pas adaptées.

Ce constat, qui ne s'applique bien sûr pas seulement à l'enseignement de la thermodynamique appliquée, concerne aussi bon nombre d'apprenants suivant des MOOC à contenu scientifique. Il est de portée beaucoup plus large et implique la nécessité de mettre au point des ressources numériques spécifiques si l'on veut s'adresser à des apprenants hors du système de formation initiale classique.

Les étudiants en formation initiale sont habitués depuis la sixième à apprendre selon un découpage disciplinaire de leur emploi du temps, qui est la règle sans qu'aucune explication particulière ne soit donnée sur la logique d'ensemble (mathématiques de 8 h à 10 h, anglais ensuite...).

Un apprenant en formation professionnelle demande que l'on s'attache davantage à lui montrer la finalité des enseignements suivis, surtout s'ils sont théoriques. Son souci est d'acquérir une ou des compétences, et le lien à l'emploi doit lui être clairement expliqué. Il n'arrive pas à s'impliquer dans la formation tant qu'on ne lui explique pas à quoi sert ce qui lui est présenté. En utilisant des pédagogies actives et notamment le recours à des exercices concrets modélisés avec le simulateur Thermoptim, l'apprenant est mieux à même de comprendre comment les enseignements théoriques sont mis en application.

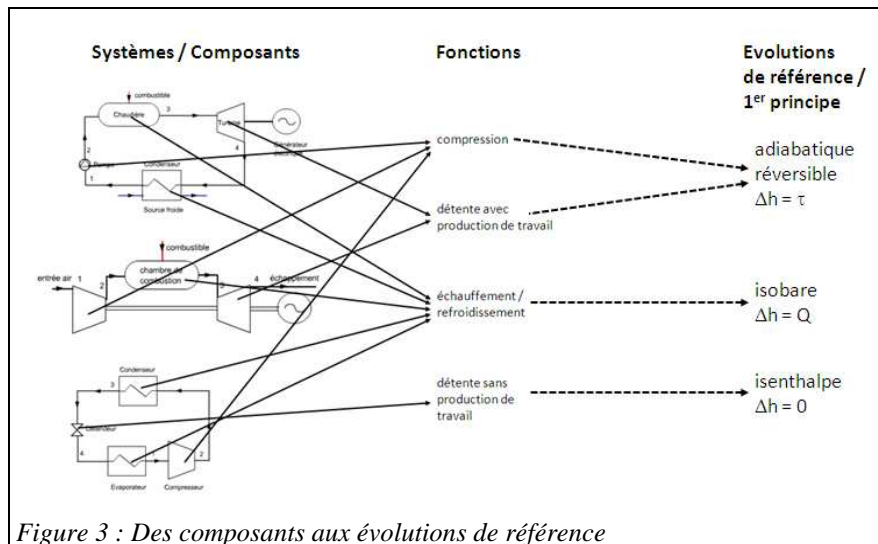
Il ne s'inscrit donc pas du tout dans la logique cartésienne qui consiste à commencer par présenter les rappels de mathématiques et de physique avant de dérouler la théorie, pour finir par la pratique, et qui constitue le scénario global d'une présentation des applications d'une discipline en formation initiale dans l'enseignement supérieur. Même pour les étudiants en formation initiale, ce mode de présentation n'est généralement pas le plus adapté. De nos jours, les apprenants ne se motivent que s'ils perçoivent bien le sens et l'intérêt des cours qui leur sont proposés.

C'est pourquoi nous avons été conduits à profondément modifier la scénarisation du cours sur les systèmes énergétiques en cherchant à réduire le plus possible le recours au formalisme mathématique et en ne l'introduisant que lorsqu'il est nécessaire contextuellement.

Cette nouvelle démarche pédagogique, que l'on peut appeler Optimisation du Contenu Scientifique des Enseignements (OCSE) a été mise en œuvre avec succès dans la formation des opérateurs de la Marine Nationale, notamment ceux de l'EAMEA (Ecole des Applications Militaires de l'Energie Atomique).

Elle part du constat que le contenu scientifique de certains enseignements peut être allégé, l'idée étant notamment que les équations qui ne sont pas utilisées dans la pratique professionnelle peuvent disparaître, sauf justification particulière. Elles seront de toute manière très vite oubliées, et le temps passé à les présenter aux élèves est généralement disproportionné par rapport à leur intérêt réel, et est beaucoup mieux mis à profit pour leur faire comprendre qualitativement les phénomènes physiques mis en jeu.

Concrètement, pour présenter les cycles thermodynamiques élémentaires, il est possible d'adopter une scénarisation originale où l'on commence par décrire les architectures des différentes machines (les Exemples) et les nombreuses solutions technologiques mises en œuvre (la Réalité). On montre alors qu'en



dépité de leur diversité, leurs composants n'assurent que **quatre grandes fonctions**, elles-mêmes correspondant à trois évolutions de référence subies par les fluides qui traversent les machines (figure 3), déclinant chacune un cas particulier d'application du premier principe de la thermodynamique (Théorie).

Cette analyse, au départ fonctionnelle, débouche sur la **notion essentielle d'évolutions de référence**, modèles de comportement des fluides dans les machines, et amène tout naturellement à se pencher sur leurs propriétés, ce qui relève à la fois de la Réalité (étude de la matière), et de la Théorie pour leur représentation, laquelle aboutit aux **diagrammes thermodynamiques** dans lesquels les cycles peuvent être visualisés (Méthodes), et qui constituent un des environnements de travail du simulateur et jouent un rôle fondamental dans l'apprentissage (figure 4).

L'étude des échanges d'énergie intervenant dans les composants des machines amène par ailleurs à introduire un minimum de notions de thermodynamique (Théorie) en le faisant de manière contextuelle et en justifiant leur nécessité. Cette approche présente l'avantage qu'elle évite de faire appel à la notion d'entropie, toujours difficile à comprendre par les apprenants.

L'utilisation du simulateur (Méthodes) trouve naturellement sa place dans ce contexte, dès lors que les composants qu'il met en œuvre correspondent précisément aux fonctions qui ont été identifiées précédemment. Les architectures des cycles se construisent en connectant ces composants dans l'éditeur graphique, leur paramétrage s'expliquant très facilement par comparaison aux

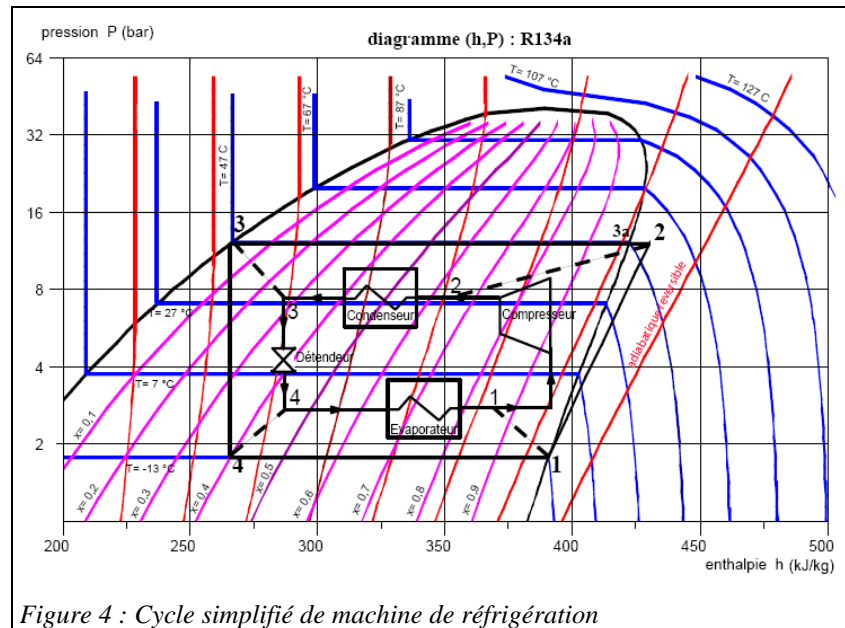


Figure 4 : Cycle simplifié de machine de réfrigération

évolutions de référence. Les cycles peuvent ensuite être visualisés dans les différents types de diagrammes couplés au simulateur.

Une note détaillée explique comment cette approche peut être mise en pratique⁵.

Communauté d'enseignants

Thermoptim 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)⁶, qui s'est réuni pour la première fois en juillet 2000, et a ensuite tenu une dizaine de réunions jusqu'en 2010.

Ce Club rassemblait deux catégories d'enseignants : des spécialistes des fluides, de la communauté de Génie des Procédés, et des énergéticiens, essentiellement intéressés par les machines et les cycles. Il a été le lieu d'échanges passionnants entre collègues, mais ne s'est plus réuni depuis 2010, le tour du sujet ayant été fait au moins pour quelques années. Il sera sans doute réactivé prochainement.

Par ailleurs, onze stages LIESSE⁷ ont été organisés, suivis par près de 230 professeurs des classes préparatoires aux grandes écoles. Il s'agit de stages de formation destinés aux profs de prépa et organisés par les établissements de la Conférence des Grandes Ecoles. Un nouveau stage est prévu le 22 juin prochain.

⁵ <http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/explor/ScenarisationPedaThopt.pdf>

⁶ http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/module_Enseignement_3.html

⁷ <http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/stages-liesse.html>

Ces échanges avec les collègues m’ont permis d’approfondir mes réflexions et de disposer de retours d’expérience sur l’utilisation de Thermoptim dans des contextes différents de ceux que je connaissais. Des développements complémentaires m’ont été demandés, contribuant ainsi à enrichir ses fonctionnalités et sa bibliothèque de modèles.

Après 2007, des partenariats ont été noués avec Electrabel et surtout la Marine Nationale pour l’utilisation du simulateur 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, Thermoptim 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.

Signalons enfin qu’une **thèse en Sciences de l’Éducation** a été soutenue le 3 février 2016 par Madame Atika MOKHFI, pour obtenir le doctorat d’Aix-Marseille Université. Son titre est : Étude d’un dispositif d’enseignement à distance en libre accès sur le web : une approche didactique du travail enseignant dans le supérieur. Le cas du dispositif Thermoptim-UNIT à l’école MINES ParisTech.

Cette thèse⁸ s’appuie notamment sur des **enquêtes menées auprès d’enseignants et d’étudiants** de la discipline utilisant le dispositif Thermoptim, menées par questionnaires et entretiens, dont les témoignages valident le bien-fondé de la démarche.

Le portail Thermoptim-UNIT

Au cours des années, de nombreuses ressources numériques relatives à la mise en œuvre de cette nouvelle pédagogie et à l’utilisation de Thermoptim ont été développées et il est apparu nécessaire de les rassembler dans ce qui fut initialement un site Web. Cet outil s’est vite révélé insuffisant compte tenu de l’audience croissante qu’elles avaient auprès des collègues enseignants et des élèves. C’est ainsi qu’en 2006 il est apparu souhaitable de développer le portail Thermoptim-UNIT, financé grâce au soutien d’UNIT (figure 5).



Figure 5 : écran d’accueil du portail

⁸ https://www.dropbox.com/s/wqvc4zdqu47acy7/These_et_annexes_publicques_Atika_MOKHFI.pdf?dl=0

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.

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

Cet environnement permet ainsi d'accéder aux ressources numériques existantes de diverses façons selon les objectifs poursuivis.

Le portail Thermoptim-UNIT constitue le principal moyen de diffusion et de communication de notre démarche pédagogique auprès des collègues enseignants. Parmi ses rubriques, un volet est consacré à la pédagogie de la thermodynamique appliquée que nous préconisons et aux communautés d'enseignants qui participent au développement des ressources.

Et maintenant ?

Au cours des années, Thermoptim 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.

Comme le prouve cette expérience, il est indéniable que la technologie peut induire un bouleversement du contenu à enseigner et que la disponibilité des TICE peut permettre de renouveler profondément les approches pédagogiques.

J'ai cherché à tirer parti de ce potentiel pour dépasser les limites des approches classiques de la discipline que j'enseignais, mais je suis loin d'être le seul à l'avoir fait.

Des démarches analogues ont été mises en œuvre en électronique, en génie électrique, en mécanique des fluides avec les codes de calcul du type CFD, en génie des procédés avec les progiciels de flow-sheeting, et même en mathématiques avec des outils comme Mathematica ou en automatique avec MatLab.

Il s'agit d'une tendance lourde, qui s'explique parfaitement dès lors que ces simulateurs encapsulent un savoir très élaboré qu'il est inutile que tous les apprenants acquièrent.

Il n'en reste pas moins que de nombreuses questions restent posées, notamment dans une perspective à long terme :

- l'existence du simulateur "simplifie" le contenu et rend moins utiles certains savoirs, permettant d'aller beaucoup plus loin en matière de résolution de problèmes, ce qui est un facteur majeur de la motivation des apprenants, notamment lorsqu'ils sont en stage dans les entreprises ;
- l'utilisation de ces outils en dehors de l'université demande malgré tout à être encadrée avec soin, car il y a un risque important que les savoirs sous-jacents au simulateur ne soient pas maîtrisés et que leur usage conduise à des conclusions erronées. Il s'agit d'un problème récurrent, qui rejoint celui de la connaissance des ordres de grandeur. Il est fondamental d'enseigner aux apprenants à bien comprendre le fonctionnement phénoménologique des objets sur lesquels ils travaillent, pour qu'ils soient capables d'avoir un regard critique sur les résultats de simulation.
- enfin, si nous nous projetons dans l'avenir, se pose la question suivante : comment pourrions-nous conserver ou recréer ces savoirs s'ils ne sont plus enseignés ?

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] DEVELAY M. De l'apprentissage à l'enseignement. ESF, 1992.
- [3] KUHN T.S. La structure des révolutions scientifiques. Flammarion, 1972