

# 1993-2022 : la longue gestation d'une évolution pédagogique

## **Résumé de l'article**

La parution de la nouvelle édition 2023 du livre Systèmes Energétiques<sup>1</sup> fournit l'occasion de réfléchir à l'ensemble de la démarche qui a abouti au paradigme pédagogique qui y est présenté et au rôle majeur joué par la Fondation Unit dans son élaboration.

Après un rappel de la problématique pédagogique de la thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques, nous illustrons sur un exemple simple le changement de paradigme que permet le simulateur Thermoptim.

Nous nous interrogeons ensuite sur le contenu à enseigner, en faisant appel au 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), et nous montrons que, pour présenter les cycles thermodynamiques élémentaires, une scénarisation originale appelée CFER pour Composants, Fonctions et Évolutions de Référence peut être employée.

Le cheminement chronologique de notre démarche est alors exposé, avec dans un premier temps la naissance de Thermocalc sous 4D, la mise en place du Club ALET, le portage de Thermoptim sous Java, l'ajout de l'éditeur de schémas, la création du premier site Web, et la rédaction de première édition du livre parue en 2001. Les échanges avec les professeurs de CPGE qui ont suivi sont évoqués, ainsi que nos premiers pas en FAD avec le module ExPliSite.

La diffusion de Thermoptim a suscité à partir de 2004 un accroissement de la demande ressources numériques pédagogiques qui a induit des besoins importants de mise en ligne, ce qui nous a conduits à développer les modules Diapason, solution à forte productivité basée sur xml, permettant de traduire concrètement une scénarisation.

Le soutien d'UNIT, qui s'est manifesté à partir de 2005 environ, a permis la réalisation d'abord d'un second site Web, puis la création du portail Thermoptim-UNIT qui allait rassembler l'ensemble de ces ressources.

Parallèlement, les fonctionnalités du simulateur évoluaient, avec les extensions de Thermoptim sous forme de classes externes et le couplage au solveur minPack en 2009.

A partir de 2007 sont apparues d'abord une ouverture vers la formation professionnelle, notamment pour la Marine nationale, puis vers 2016 une demande élargie pour un cours sous forme de MOOC.

Pour répondre aux attentes de ces nouvelles populations d'apprenants, il a fallu multiplier les activités proposées ainsi que varier les contenus selon les contextes, ce qui nous a conduits à décliner notre approche pédagogique selon trois modes complémentaires.

La perspective d'ensemble montre que ces évolutions ont vu le jour selon un cheminement multipolaire, itératif et incrémental.

Les difficultés rencontrées sont alors évoquées, quelques enseignements de portée générale pouvant être identifiés, comme notamment bien expliciter les difficultés pédagogiques rencontrées, optimiser le contenu scientifique de l'enseignement pour réduire la charge cognitive des apprenants, diversifier les ressources et activités proposées, et viser la simplicité.

Pour de multiples raisons, il apparaît clairement que de telles évolutions pédagogiques ne peuvent que s'inscrire dans la durée. Le processus de développement des ressources numériques étant long et incrémental, on n'arrive en effet pas du premier coup à mettre au point une solution pédagogiquement pertinente.

---

<sup>1</sup> <https://www.s4e2.com/portail/web/co/SiteLivreSE-2022.html>

L'autonomie de création des enseignants nous semble aussi hautement souhaitable, et aujourd'hui possible. Les cellules multimédia peuvent venir en soutien, mais s'appropriier les outils de réalisation de leurs ressources numériques permet aux enseignants de démultiplier leur créativité.

L'article se termine par un rappel des avancées pédagogiques réalisées, qui constituent une réponse à un besoin souvent exprimé par un grand nombre de personnes qui cherchent à mettre au point des dispositifs énergétiques innovants mais ne possèdent pas les bases en mathématiques et en physique qui leur permettraient de se former à la conversion thermodynamique de la chaleur en suivant les approches classiques.

## **Introduction**

Le développement de notre nouvelle pédagogie 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.

Les trois éditions de nos ouvrages sur les systèmes énergétiques reflètent l'évolution de notre approche.

La première édition, qui date de 2001 et ne comportait que deux tomes, jetait les fondements du recours à l'utilisation du simulateur Thermoptim pour décharger nos élèves des difficultés calculatoires et adopter une approche système dans l'élaboration des modèles des technologies énergétiques.

La seconde édition, publiée en 2009 en trois tomes, élargissait le nombre des systèmes étudiés et complétait la première par des approfondissements conséquents sur les extensions de Thermoptim par des classes externes et par des études de dimensionnement technologique et de fonctionnement en régime non nominal.

La nouvelle édition 2023 de cet ouvrage diffère assez profondément des précédentes. Les développements théoriques ont été fortement réduits et certains chapitres entièrement supprimés. La présentation des variantes des principales technologies énergétiques suit un fil directeur qui n'était pas auparavant souligné : la réduction des irréversibilités qui prennent place dans leurs composants ainsi que globalement.

Chacun de ses trois tomes a ainsi vu son nombre de pages réduit de 25 à 30 % par rapport à la précédente. Précisons que cette nouvelle édition a été précédée d'une version en langue anglaise en un seul tome, publiée par CRC Taylor & Francis en août 2021<sup>2</sup>.

Alors que l'édition 2009 cherchait à être encyclopédique, sans bien sûr y arriver, l'objectif de celle de 2023 est de permettre à des lecteurs dont le niveau scientifique est modeste de s'initier aux systèmes énergétiques thermodynamiques.

L'idée est de privilégier la compréhension des phénomènes sans approfondir la manière dont ils peuvent être calculés, ce souci étant sous-traité au progiciel de simulation.

En opérant de la sorte, on permet au lecteur de se concentrer sur l'essentiel et de raisonner à un niveau conceptuel différent, compatible avec ses propres connaissances scientifiques. L'accès à la discipline devient beaucoup plus facile, ce qui permet de motiver un grand nombre de personnes qui en auraient été sans cela exclues.

Le fil directeur adopté dans la nouvelle édition correspond à une approche pédagogique très différente de celle généralement proposée. Cet article expose les grandes lignes de la démarche qui a conduit à sa mise au point, en soulignant le rôle crucial joué par la Fondation UNIT pour la rendre possible.

## **Problématique pédagogique**

Nous sommes confrontés à un nouveau défi : former des étudiants capables de traiter des problèmes plus complexes malgré un bagage scientifique plus léger qu'il y a quelques décennies, et ceci dans un volume horaire

---

<sup>2</sup> <https://www.routledge.com/Energy-Systems-A-New-Approach-to-Engineering-Thermodynamics/Gicquel/p/book/9781032007748>

réduit. L'utilisation pédagogique des TICE et notamment des simulateurs peut être la solution à ce problème, dans la mesure où elle permet de mettre en œuvre de nouvelles pédagogies. Nous analysons ci-dessous le cheminement suivi pour l'élaboration de celle que nous proposons pour la thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques, aujourd'hui utilisée 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.

Notre démarche a pour origine les difficultés que nous avons rencontrées lorsque nous avons commencé à enseigner la discipline à partir de 1993.

Comme la très grande majorité des enseignants-chercheurs, nous avons commencé notre carrière dans la recherche, et nos premières expériences d'enseignement se sont limitées à l'animation de travaux dirigés.

Ce n'est qu'assez tard que nous avons eu à reprendre des cours magistraux, pour remplacer au pied levé en 1993 un collègue immobilisé pour raisons de santé. Il s'agissait d'un cours sur les machines thermiques, et nous avons 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 nous avons repris était assuré pour partie par ce collègue et pour partie par un ingénieur de l'industrie automobile. Leur complémentarité permettait de présenter aux élèves les aspects à la fois théoriques et technologiques.

Comme la très grande majorité des enseignants-chercheurs, nous avons commencé pendant deux ans environ par nous couler dans le moule mis en place par nos prédécesseurs en utilisant leur manière d'enseigner, et ce n'est qu'ensuite que nous l'avons remise en question, du fait que 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, c'est-à-dire à la réduction de l'impact environnemental des technologies, à l'amélioration des rendements dans des conditions économiques acceptables, etc.

Le cours passait mal auprès des élèves, et, compte tenu de leur niveau, nous ne pouvions pas les blâmer. En approfondissant la question, nous sommes arrivés à la conclusion que si une chose devait être remise en cause, au-delà de notre inexpérience initiale, c'était essentiellement la pédagogie traditionnelle que nous utilisions.

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.

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.

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 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.

Bien que la thermodynamique appliquée à l'ingénierie puisse être considérée comme une science bien établie (ses fondements ont été établis il y a plus d'un siècle), elle continue d'évoluer de manière significative en raison d'une part des avancées dans le domaine des matériaux ou celles en matière de contrôle-commande, d'autre part des contraintes physiques et géopolitiques sur les ressources, et enfin de l'évolution de la réglementation, qui a conduit au développement d'appareils de plus en plus respectueux de l'environnement. Des évolutions technologiques considérables sont encore attendues dans les décennies à venir. Elles feront appel à de fortes compétences en thermodynamique appliquée, notamment pour le développement de nouveaux cycles intégrés à haut rendement et à faible impact environnemental.

Notre objectif est de former au mieux nos étudiants pour relever ces défis.

## Le simulateur Thermoptim

Pour dépasser les difficultés pédagogiques que nous venons d'évoquer, nous avons été amenés à concevoir un simulateur, étant donné qu'il n'en existait pas à l'époque. La clé de voûte de notre évolution pédagogique est sans aucun doute l'utilisation de ce simulateur, le progiciel Thermoptim, qui permet la modélisation graphique des systèmes énergétiques.

Dans les années 1990-1995, nous avons initialement développé de nombreuses feuilles de calcul pour résoudre les équations présentées aux élèves, mais cette manière de faire a assez rapidement trouvé ses limites, d'une part parce qu'à cette époque ils ne maîtrisaient pas encore bien les tableurs, et aussi parce que, dès lors que le nombre de feuilles de calcul augmentait, nous avions de plus en plus de mal, au-delà de quelques mois après les avoir créées, à nous souvenir du détail des formules saisies dans les différentes cellules.

Il est ainsi progressivement devenu souhaitable de changer d'environnement de travail, ce qui nous a conduit à intégrer ces feuilles de calcul dans un outil unique plus convivial, qui allait rapidement devenir 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 notre sens un grand intérêt, comme compléments des simulateurs.

Le simulateur Thermoptim<sup>3</sup> permet de modéliser de manière graphique et intuitive un très grand nombre de cycles thermodynamiques, des plus simples aux plus complexes. Développé en Java, 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 téléchargeable<sup>4</sup>. Une brève présentation illustrera le changement de paradigme que cet outil permet.

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.

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

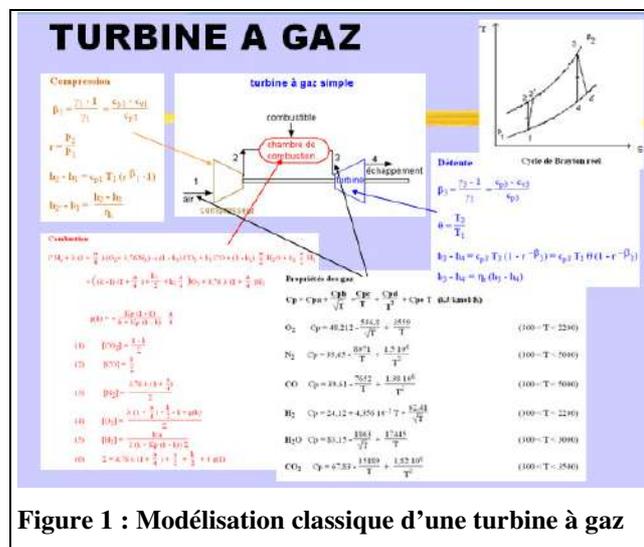


Figure 1 : Modélisation classique d'une turbine à gaz

<sup>3</sup> [http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/presentation-thermoptim\\_1.html](http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/presentation-thermoptim_1.html)

<sup>4</sup> <https://thopt.s4e2.com/jml/fr/thermoptim-fr/download-fr>

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.

En utilisant un outil comme Thermoptim, on divise par 5 ou 6 le temps nécessaire pour modéliser 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.

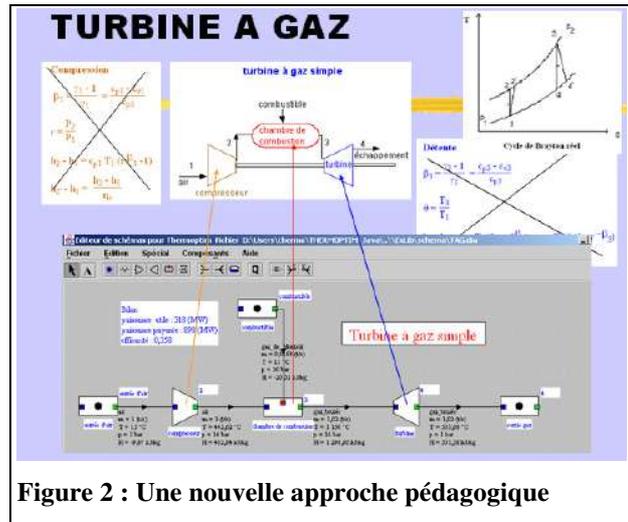


Figure 2 : Une nouvelle approche pédagogique

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.

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.

Comme on le voit, 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.

Il est clair qu'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 nôtres.

### **Quel contenu enseigner ?**

Très rapidement, il est apparu que l'utilisation de Thermoptim 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 un nombre croissant de collègues, nous avons mené quelques explorations sur la didactique des sciences et le cognitivisme.

Chemin faisant, nous avons trouvé des réponses souvent éclairantes à nos questions et nous avons pensé qu'elles pourraient intéresser d'autres collègues, tant enseignants que concepteurs de multimédias éducatifs.

Ces réflexions, qui ont été publiées en 2004 [1], nous ont permis d'une part de progresser dans notre compréhension de la pédagogie, et d'autre part de faire évoluer les ressources numériques que nous développons, 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. Initialement le principal point dur 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.

Plus généralement, dès lors que nous remettons en cause le contenu de l'enseignement, une des questions qui nous 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. Cette distinction est bien évidemment essentielle, mais elle est trop globale pour notre propos et ne suffit malheureusement pas pour définir concrètement le contenu de l'enseignement.

Faute d'avoir trouvé dans la littérature un modèle qui réponde pleinement à notre attente, nous en avons proposé un 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, nous entendons 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 nous 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 les explications phénoménologiques sur le comportement des fluides qui traversent les machines.

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 : d'une part il n'est pas le même dans une classe préparatoire aux grandes écoles, en IUT, en école d'ingénieurs ou à l'université ou bien encore en formation continue, et d'autre part il varie avec le niveau scientifique des apprenants.

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

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 avons pour le moment à peine abordé 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 sont habituellement proposées. Bien évidemment, si leur formation initiale est d'un niveau modeste, leurs bases en mathématiques et en physique sont encore plus lacunaires. En revanche, du fait de leur pratique professionnelle, ils connaissent généralement mieux les technologies que les étudiants en formation initiale. Pour toutes ces raisons, les pédagogies classiquement utilisées pour ces derniers ne sont pas adaptées à leurs besoins.

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 en ayant 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.

Un tel apprenant ne s'inscrit donc pas du tout dans la logique déductive 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 d'ailleurs généralement pas le plus adapté. De nos jours, les apprenants s'engagent davantage s'ils perçoivent le sens et l'intérêt des cours qui leur sont proposés.

C'est pourquoi nous avons été amenés à modifier profondément le contenu et le séquencement de notre cours sur les systèmes énergétiques en cherchant à réduire au maximum le recours au formalisme mathématique et en ne l'introduisant que contextuellement et lorsque cela est absolument nécessaire.

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 serait 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 appelée CFER pour Composants, Fonctions et Évolutions de Référence, 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 dépit 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).

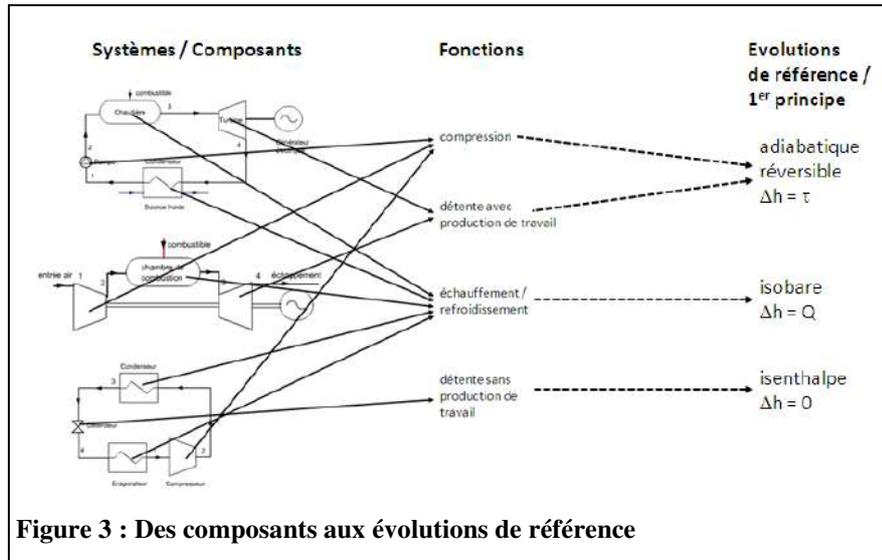


Figure 3 : Des composants aux évolutions de référence

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

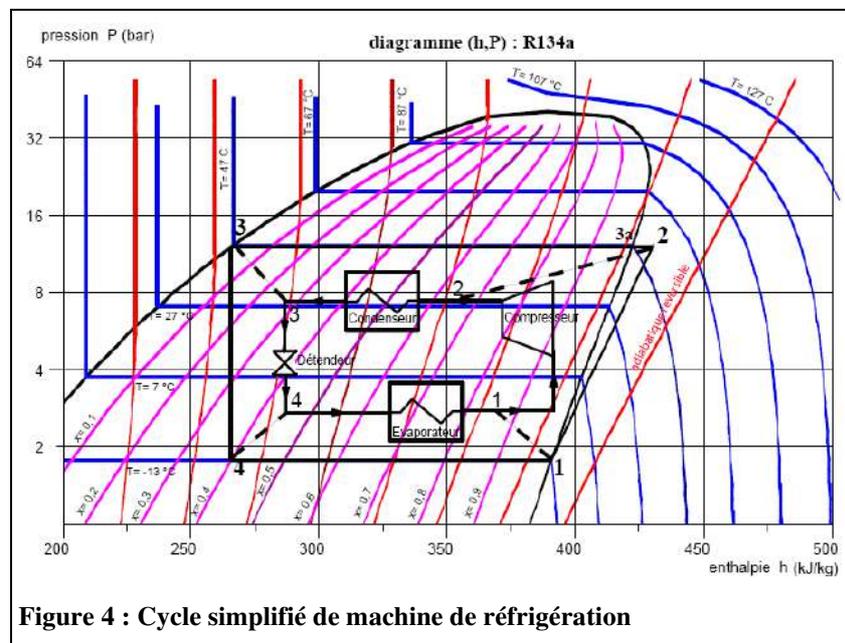


Figure 4 : Cycle simplifié de machine de réfrigération

Les architectures des cycles se construisent en connectant ces composants dans l'éditeur graphique, leur paramétrage s'expliquant très facilement par comparaison aux évolutions de référence. Les cycles peuvent ensuite être visualisés dans les différents types de diagrammes couplés au simulateur.

## Cheminement chronologique

A l'origine de ThermoOptim, dans les années 1990-1995, nous avons développé de nombreuses feuilles de calcul pour résoudre les équations présentées aux élèves, mais cette manière de faire a assez rapidement trouvé ses limites comme nous l'avons dit.

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

### Thermocalc sous 4D

La première version, qui s'appelait ThermoCalc, a été développée avec le logiciel 4<sup>ème</sup> 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 Mac, et d'autre part d'être bien adapté au problème, du fait que la structure sous-jacente à ThermoOptim est précisément celle d'une base de données relationnelle (figure 9).

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

De plus, dès 1998, une version du progiciel a été diffusée par les Techniques de l'Ingénieur à tous ses adhérents (figure 5), augmentant sensiblement son audience et confirmant son intérêt.

### Club ALET

ThermoOptim 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.

The screenshot shows the 'PROJETS' window of the ThermoCalc software. It features several data tables and control elements:

- POINTS Table (8 fiches):**

nom	corps	T (°C)	p (bar)
1	eau	19,74	0,0230
2	eau	19,74	165,000
3	eau	560,00	165,000
3a	eau	349,82	165,000
3b	eau	349,82	165,000
4	eau	19,74	0,0230
fleuve 1	eau	10,00	1,0000
fleuve 2	eau	14,87	1,0000
- TRANSFORMATIONS Table (7 fiches):**

nom	point amont	point aval
compression liquid	1	2
économiseur	2	3a
détente	3	4
vaporiseur	3a	3b
surchauffeur	3b	3
condenseur	4	1
fleuve	fleuve 1	fleuve 2
- NOEUDS Table (0 fiches):**

nom	type	transfo
-----	------	---------
- ECHANGEURS Table (1 fiche):**

nom	transf chaude	transf froide	type
condenseur	condenseur	fleuve	contre-cour
- Calcul de bilan:**
  - énergie payante: 3 359,46
  - énergie utile: -1 310,58
  - efficacité: 0,3901
- Graphes:** A small schematic diagram of a steam cycle is visible in the 'graphes' section.

Figure 5 : Ecran du simulateur de la première version diffusée par les Techniques de l'Ingénieur

Il en est résulté la création fin 1999 du Club ALET (Aides Logicielles pour l'Enseignement de la Thermodynamique)<sup>5</sup>, 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 après 2010, le tour du sujet ayant été fait au moins pour quelques années.

<sup>5</sup> [http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/module\\_Enseignement\\_3.html](http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/module_Enseignement_3.html)

## 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 dans Java, nouveau langage de programmation qui commençait à bien s'étoffer, nous 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, nous avons 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 version Java a été diffusée. 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, première édition du 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 6), et plus d'une douzaine d'établissements d'enseignement sont devenus utilisateurs de Thermoptim.

## 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, nous avons eu la grande surprise de recevoir de multiples témoignages d'intérêt pour Thermoptim de la part de professeurs des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE). Nous en avons été étonnés parce que nous ne pensions pas du tout qu'une approche non équationnelle de la thermodynamique puisse les intéresser, mais ce qu'ils nous ont dit est qu'ils étaient très heureux de pouvoir montrer à leurs élèves que les mises en équations du programme scolaire 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.

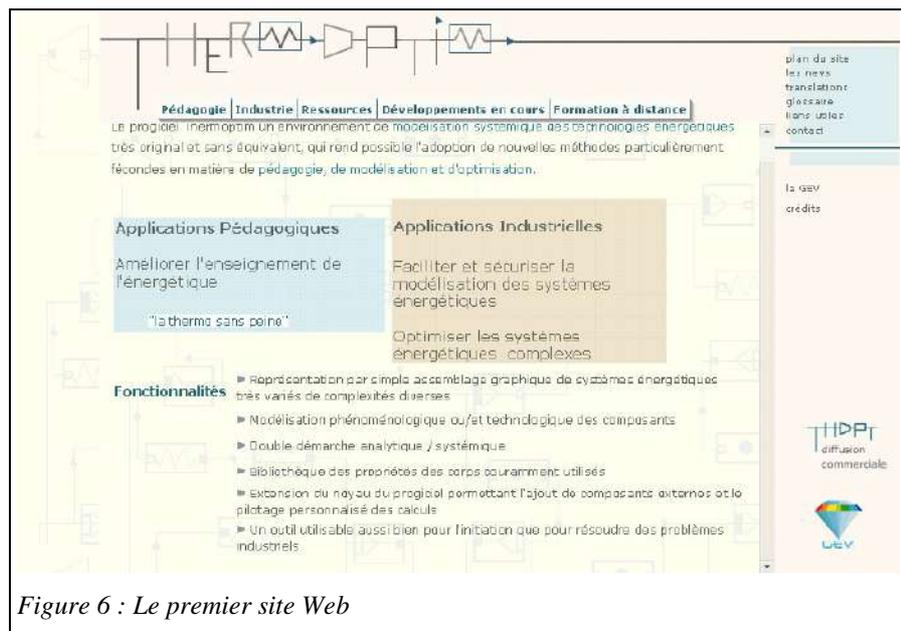


Figure 6 : Le premier site Web

Depuis, la collaboration avec ces enseignants s'est toujours poursuivie, et douze stages LIESSE<sup>6</sup> 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 nous ont été faites. C'est ainsi par exemple que nous avons 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.

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

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 nous étions initialement partis, et que cela a facilité sa réappropriation par d'autres enseignants. Les Communautés d'enseignants jouent un rôle décisif pour cela.

## Premiers pas en FAD : ExPliSite

Vers 2004 nous avons commencé à nous investir dans la mise en ligne de nos 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 Énergétiques (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 a longtemps continué à être utilisé, mais qui souffrait d'une forte rigidité qui empêchait de le faire évoluer, ce qui est regrettable. Il était en particulier non sonorisé et il aurait été très difficile de lui ajouter de nouvelles fonctionnalités. Les parcours proposés aux élèves sont figés, du fait d'un parti pris initial assez normatif.

L'abandon de Flash comme environnement de diffusion

Web a de toute manière limité son évolution.

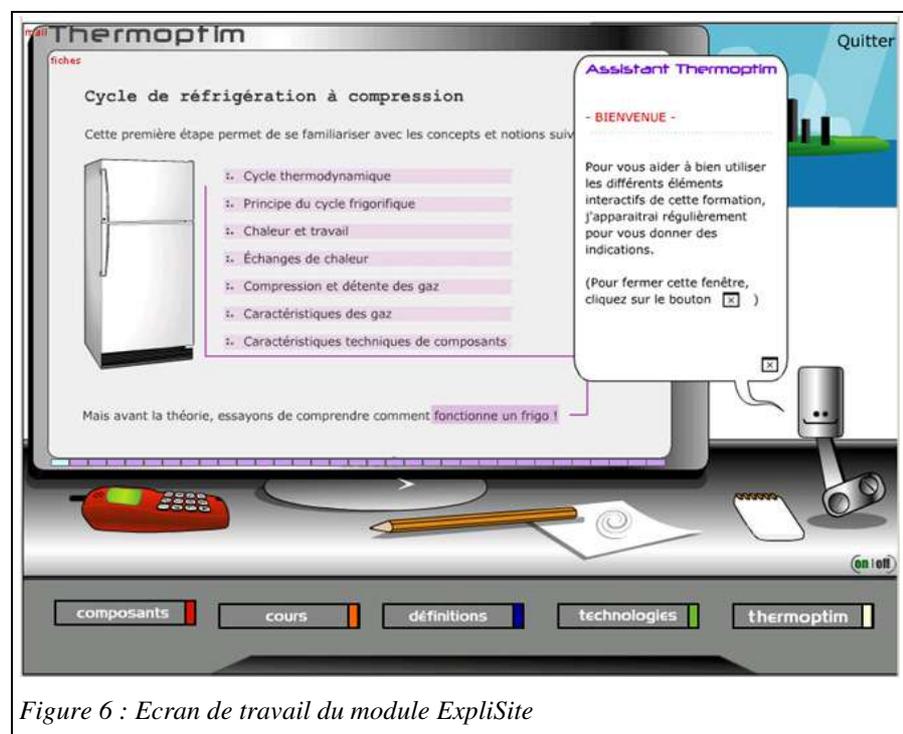


Figure 6 : Ecran de travail du module ExPliSite

<sup>6</sup> <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/stages-liesse.html>

## Relations enseignants - cellule TICE

Ce travail a eu pour effet indirect de nous 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 nous 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.

Notre expérience est que la mise au point des ressources numériques pédagogiques est un processus long et incrémental, qu'il est préférable que l'enseignant les réalise lui-même, par itérations, en fonction de leur impact sur la manière d'apprendre des élèves. Il faut qu'il puisse facilement les modifier, et qu'il dépende donc le moins possible de spécialistes du multimédia.

Nous avons 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 nos 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 nos outils. A l'occasion d'une réforme des enseignements de l'Ecole des Mines, il nous a été demandé de dupliquer l'ensemble de notre cours, ce qui induisait un net accroissement de notre charge d'enseignement.

Ces contraintes d'emploi du temps ont réactivé l'intérêt d'une mise en ligne d'une partie significative de nos cours. Etant donné que les choix technologiques retenus pour ExpliSite ne constituaient pas une solution généralisable (trop longs, trop rigides et trop coûteux), nous avons 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 nous avons effectués pour coupler Thermoptim à ExpliSite quelques mois auparavant, nous avons été très intéressés par le potentiel qu'offrait xml pour gérer les enchaînements d'apparition à l'écran de ressources pédagogiques diverses, et nous avons ainsi commencé à développer en Java des outils d'exploration de scénarios pédagogiques utilisant le simulateur, ce qui nous avait permis d'acquérir une compétence xml.

Pour la mise en ligne de notre cours complet, nous avons testé diverses solutions possibles qui nous avaient été conseillées par nos collègues de cellules TICE du Groupe des Ecoles des Mines, sans trouver exactement ce que nous recherchions. L'intérêt de sonoriser apparaissait évident, et était confirmé par tout ce que nous avons lu en matière de pédagogie. L'expérience d'ExpliSite et de nos scénarios d'exploration nous poussait à chercher une solution facile à mettre en œuvre et s'appuyant sur ce dont nous disposions déjà en matière de scénarisation.

## Naissance de Diapason

La révélation s'est faite un jour, quand nous avons 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 vrai 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 nous avons mis au point en 2004 sous forme d'une 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.

L'abandon de Flash quelques années plus tard nous a conduits à convertir en html 5 les fichiers xml de visualisation de Diapason, la scénarisation restant inchangée.

## Une solution à forte productivité

Avec cet outil, nous avons 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 nos élèves de 3<sup>ème</sup> 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 notre 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. Nous pensons qu'avec le temps cette opération se banalisera, tout comme se s'est progressivement banalisée l'utilisation des logiciels de traitement de texte, des tableurs, ou des outils de conception de diaporamas.



Figure 7 : Site Web Thermoptim-UNIT de 2005

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 nous assurons.

## 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.

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.

Réalisé initialement sous CPS, le portail a quelques années plus tard été porté sous Opale-Scenari, permettant ainsi de bénéficier des avantages d'une chaîne éditoriale.

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 :

- **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...), d'autre part les systèmes complets (turbines à gaz, moteurs alternatifs, centrales à vapeur...), et enfin les filières ;
- **Problèmes globaux**, qui aborde les grands problèmes de l'énergie : énergie au niveau macro-économique (filieres 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) ;



Figure 8 : Ecran d'accueil du portail

- **Enseignement**, qui comporte plusieurs grands volets consacrés à la pédagogie de la thermodynamique appliquée et aux ressources mises en ligne, en particulier l'ensemble des séances Diapason utilisables pour la formation à distance et les divers cours en ligne, dont les MOOC ;
- **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.

Les enseignants ont en outre accès à d'autres rubriques, comme par exemple les 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 sur les composants, les systèmes et les filières ;
- L'ensemble des séances Diapason ;
- Des vidéos (hébergées sur Canal U) ;
- Des supports écrits ;
- Des fiches-guides de TD destinées aux enseignants, pour leur faciliter la préparation des cours ;
- Des guides méthodologiques ;
- Des activités d'auto-évaluation pour que les apprenants puissent vérifier leur compréhension des notions abordées
- Des explorations de modèles réalisés avec Thermoptim
- 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.

Signalons 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 thèse<sup>7</sup> 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.

## Extensions de Thermoptim, couplage à un solveur

Concernant Thermoptim, 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 d'autre part, 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.

Enfin, en 2009, nous avons aussi pu coupler Thermoptim à un puissant solveur, 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 Systèmes 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 Thermoptim [7].

---

<sup>7</sup> [https://www.dropbox.com/s/wqvc4zdqu47acy7/These\\_et\\_annexes\\_publicques\\_Atika\\_MOKHFI.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/wqvc4zdqu47acy7/These_et_annexes_publicques_Atika_MOKHFI.pdf?dl=0)

## Ouverture vers la formation professionnelle

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.

Après 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 qu'on lui fournit, qu'il parcoure 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 ont pris place dans le cadre d'un réseau des enseignants énergie de la Marine Nationale, ouvert à la Marine Marchande, qui s'est réuni plusieurs années de suite.

## Des cours classiques aux MOOC

A partir de 2015, avec l'équipe TICE de Mines ParisTech et grâce au soutien d'UNIT, de PSL puis de l'Institut Mines Telecom, nous avons réalisé deux MOOC : Problèmes Énergétiques Globaux (PEG) et Conversion Thermodynamique de la Chaleur (CTC).

Compte tenu du champ couvert, le MOOC Conversion Thermodynamique de la Chaleur a été décomposé en deux parties, Modéliser et Simuler (CTC-MS) et Cycles Classiques et Innovants (CTC-CCI)<sup>8</sup>.

Ce MOOC s'adresse à un public assez large : professionnels du secteur désireux de mettre à jour leurs savoirs et généraliser leurs connaissances, élèves ingénieurs, étudiants en génie thermique et énergétique ou simple curieux motivés par le sujet.

Réaliser un MOOC conduit à adopter une démarche qualité parfaitement transparente pour la préparation des enseignements, et est donc un gage d'excellence pour nos élèves et les apprenants externes qui s'inscrivent à nos sessions.

---

<sup>8</sup> [http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/res/PresentationMOOC\\_CTC.pdf](http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/res/PresentationMOOC_CTC.pdf)

Le format MOOC nécessite de totalement expliciter le contenu d'un cours. Sachant que ce contenu est destiné à être publié, l'enseignant est conduit à accorder, tant au fond qu'à la forme, la même exigence de qualité qu'il a coutume de le faire pour ses publications de recherche, alors qu'auparavant il ne laissait que peu de traces de son enseignement : au mieux un polycopié, et quelquefois une simple copie de ses diapositives.

Comme il s'adresse à un public très large, de niveau de connaissances très hétérogène, l'enseignant soigne particulièrement la progressivité de ses explications, ce qui améliore son cours.

Les élèves peuvent se référer à tout moment au contenu en étant certains qu'ils ont accès à l'ensemble de ce que l'enseignant a mis à leur disposition. Nous espérons que la démarche qualité induite par la création de MOOC se généralisera dans nos formations pour le plus grand bénéfice de nos élèves.

Il est clair qu'il y a une forte demande de la part des apprenants pour des formations scénarisées dans le moindre détail, avec des vidéos de qualité pour la partie cours, et de nombreuses activités d'auto-évaluation et divers exercices pour les apprenants.

Dans le questionnaire final du MOOC Conversion Thermodynamique de la Chaleur, nous avons demandé aux apprenants de donner leur avis sur la méthode pédagogique utilisée. Les réponses sont intéressantes.

61 % déclarent adhérer parfaitement à cette nouvelle approche qui rend l'apprentissage de la thermodynamique bien plus accessible et efficace, et 30 % disent qu'il leur a fallu un peu de temps pour s'adapter à cette nouvelle approche mais qu'ils en perçoivent les avantages.

Commencer par éviter d'utiliser l'entropie dans ce MOOC est pour 52 % un avantage car c'est une notion difficile à bien comprendre par les débutants, et pour 26 % un inconvénient car c'est un concept fondamental de la thermodynamique.

Limiter le plus possible les mises en équation au profit de l'utilisation d'un simulateur semble pour 74 % un atout car cela permet de se concentrer sur l'essentiel, la compréhension des phénomènes, et pour 20 % regrettable, car il leur paraît fondamental que les apprenants maîtrisent les équations de la thermodynamique.

La démarche d'amélioration des performances des cycles qui a été présentée est considérée par 67 % comme essentielle, même si elle n'est que qualitative, tandis que 33 % répondent qu'elle est essentielle, mais qu'il est regrettable que les approches entropiques quantitatives n'aient pas été présentées.

La notion d'évolution de référence est beaucoup plus consensuelle : 69 % trouvent qu'elle est très utile, car elle permet de faire le lien entre les fonctionnalités des composants et leur représentation dans les diagrammes thermodynamiques, les 31 % restants la trouvant simplement utile.

De la même manière, représenter les cycles moteurs dans le diagramme  $(h, \ln(P))$  des frigoristes<sup>9</sup> est selon 96 % un atout pour que les débutants comprennent les phénomènes.

Les explorations dirigées de modèles réalisés avec Thermoptim sont considérées comme indispensables par 52 %, utiles par 35 % et modérément utiles par 11 %. 83 % sont très satisfaits ou plutôt satisfaits par leur qualité.

## Multiplier les activités des élèves

Il ne suffit pas d'écouter des cours, si bien faits soient-ils, pour apprendre. Il faut aussi que les apprenants mettent en pratique le savoir qui leur est présenté. C'est pourquoi il est essentiel de leur proposer diverses activités concrètes.

De nombreuses **activités d'auto-évaluation** ont ainsi été développées lors de la préparation de nos MOOC. Leur but principal est de permettre aux apprenants de vérifier qu'ils ont bien compris les différentes notions qui leur sont présentées. Les notes ne sont ni enregistrées ni transmises à quiconque. Elles leur donnent simplement une indication de la qualité de leurs réponses.

---

<sup>9</sup> Notez que cette manière de faire n'est pas du tout habituelle, ceux-ci étant généralement représentés dans le diagramme entropique ou dans celui de Mollier

Ces activités sont de cinq types :

- Le placement sur image leur permet de vérifier s'ils savent se repérer sur un schéma ou un diagramme. Ils opèrent par simple glisser-déposer ;
- Le texte à trous avec image contextuelle demande un peu plus de concentration de leur part, mais se révèle très fécond pour s'assurer que des notions nouvelles ou difficiles sont bien comprises ;
- L'exercice de catégorisation complète bien les deux activités précédentes : des éléments doivent être rangés par catégories, ce qui apprend à bien les distinguer ;
- L'exercice d'association constitue une version plus limitée du précédent, car la relation entre éléments et catégories doit être bijective ;
- Enfin, les questions à choix unique (QCU) et questions à choix multiple (QCM) leur permettent de tester leur savoir de manière assez large, mais ils ne constituent pas des outils très conviviaux.

Un outil comme Thermoptim permet de compléter un enseignement classique de la thermodynamique par une grande diversité d'autres activités pédagogiques, qui peuvent être regroupées en deux principales catégories : celles de découverte et initiation, notamment par **exploration de modèles prédéfinis**<sup>10</sup>, et celles de **construction de modèles**, qui concernent des élèves cherchant à apprendre à modéliser par eux-mêmes des systèmes énergétiques.

De 1998 à 2016, la principale utilisation qui a été faite de cet outil dans l'enseignement supérieur correspond à la seconde catégorie. Elle permet aux apprenants d'aller au fond des choses et d'apprendre à construire par eux-mêmes différents cycles thermodynamiques, et leur confère ainsi une très grande autonomie, facteur de motivation, notamment lorsqu'ils sont en stage en entreprise.

Elle suppose toutefois que leurs premiers pas dans l'utilisation du progiciel fassent l'objet de séances de travaux dirigés nécessitant un encadrement effectué par des enseignants maîtrisant bien l'outil, certaines manipulations demandant un peu de pratique.

Lorsqu'il a été suggéré de réaliser un MOOC mettant en œuvre la nouvelle démarche pédagogique, il est tout de suite apparu qu'il était hors de question d'effectuer un tel suivi à distance compte tenu du nombre d'apprenants prévisible et de la multiplicité des configurations informatiques envisageables. Nous avons donc décidé que l'ensemble des activités pratiques se feraient par exploration de modèles prédéfinis relevant de la première catégorie.

Dans le MOOC Conversion Thermodynamique de la Chaleur, l'utilisation du simulateur se fait ainsi essentiellement sous forme d'une vingtaine d'explorations dirigées de modèles existants. Pour réduire les difficultés liées à l'utilisation du progiciel, les apprenants ne bâtissent pas par eux-mêmes les modèles, mais explorent et paramètrent des modèles déjà construits.

Le scénario est présenté dans un navigateur Java spécifique<sup>11</sup> capable d'émuler Thermoptim, qui propose différentes activités aux apprenants, comme de retrouver des valeurs dans les écrans du simulateur, le reparamétrer pour effectuer des analyses de sensibilité... Des explications contextuelles leur sont données progressivement.

Les explorations dirigées sont définies dans un fichier html 5, qui permet d'ouvrir et de fermer des fichiers Thermoptim correspondant aux modèles étudiés, d'en tracer les cycles dans les diagrammes thermodynamiques, et de proposer des petits quiz aux apprenants pour qu'ils puissent vérifier leur bonne compréhension des méthodes abordées.

On s'assure ainsi qu'ils ne perdent pas de temps sur des erreurs de manipulation qui ne présentent pas d'intérêt pédagogique, ce qui est essentiel si on veut que leur travail puisse être réalisé dans le temps imparti. Les risques d'erreur diminuent considérablement, et, si elles surviennent, les apprenants n'ont qu'à réinitialiser le navigateur en rechargeant les fichiers dont ils disposent.

Lors du confinement de 2020, nous avons complété les premières explorations dirigées de modèles par une nouvelle série permettant aux apprenants de se familiariser avec les fonctionnalités avancées de Thermoptim<sup>12</sup>.

<sup>10</sup> <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/explor-scenar.html>

<sup>11</sup> <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/avig-thopt.html>

<sup>12</sup> <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/ed20.html>

La nouvelle édition 2023 du livre *Systèmes Energétiques* s'appuie sur une quarantaine de telles explorations dirigées.

## Des contenus variables selon le contexte

Nous avons déjà indiqué que le contenu à enseigner diffère en fonction du contexte, tout d'abord selon le niveau scientifique des apprenants et leurs styles d'apprentissage, ainsi que selon les préférences pédagogiques des enseignants.

Les apprenants qui sont habitués aux approches déductives classiques et qui sont en second cycle universitaire peuvent préférer une présentation avec quelques rappels théoriques suivis d'explications sur les technologies et les cycles, tandis que ceux en formation professionnelle ne disposant pas d'un bagage conséquent en mathématiques et en physique sont généralement plus motivés par l'approche inductive et la présentation CFER.

Le choix entre exploration et construction de modèles conditionne aussi la pédagogie, comme nous l'avons vu. Si l'on distingue ces deux types d'utilisation de Thermoptim et trois niveaux scientifiques (typiquement bac pro, licence et master), on peut considérer six principaux modes pédagogiques, mais en pratique trois suffisent, d'autant plus que rien n'empêche de les panacher.

C'est pourquoi, pour les cours en ligne sur les systèmes énergétiques que nous proposons dans le portail Thermoptim-Unit, nous déclinons notre approche pédagogique selon les trois modes ci-dessous.

Le **premier mode** est la présentation allégée, utilisée dans nos deux MOOC CTC (Conversion Thermodynamique de la Chaleur). Le premier, Modéliser et Simuler, suit l'approche CFER pour les cycles de base, tandis que le second, Cycles Classiques et Innovants, élargit les analyses à de nombreux cycles. Dans les deux cas, le travail pratique avec Thermoptim prend la forme d'explorations dirigées.

Comme nous l'avons déjà indiqué, nous avons également cherché à alléger au maximum le bagage mathématique utilisé dans ces MOOC, ce qui nous a conduit à éviter d'utiliser le concept d'entropie dont la compréhension peut poser des difficultés. Les seules activités qui l'utilisent sont facultatives et ont été incluses afin que ceux qui souhaitent aussi étudier ce sujet puissent le faire.

Le **second mode**, que l'on peut qualifier de progressif, s'adresse à des apprenants en licence ou à des professionnels en activité, qui ne sont pas particulièrement motivés par les aspects théoriques tout en étant capables de les suivre s'il le faut. Il commence par la présentation allégée que l'on complète en introduisant une démarche d'amélioration des cycles s'appuyant sur la comparaison avec le cycle de Carnot dans le diagramme entropique et les bilans exergétiques. Les exercices pratiques utilisent les explorations dirigées de modèles ainsi que quelques séances Diapason. Le cours 2022 sur les Systèmes Energétiques correspond à ce mode.

Le **troisième mode** est destiné à des élèves en master ou école d'ingénieurs familiers des développements théoriques. Il se distingue des précédents par trois points :

- Tout d'abord, ces élèves sont habitués à une présentation "cartésienne" et disciplinaire de leurs enseignements, et rien ne s'oppose à ce que l'on commence par leur présenter toute la théorie avant de passer aux applications ;
- Ensuite, comme pour eux l'utilisation de l'entropie ne pose aucun problème, on peut très rapidement introduire les diagrammes entropiques (T,s) et ceux de Mollier (h, s) ainsi que l'exergie et les bilans exergétiques ;
- Enfin, l'utilisation de Thermoptim se fait à la fois sous forme d'exploration et de construction de modèles.

La démarche d'amélioration des cycles s'appuyant sur les bilans exergétiques et la comparaison avec le cycle de Carnot peuvent aussi constituer dans le troisième mode le fil directeur d'analyse des variantes des cycles simples. Les exercices pratiques utilisent soit les explorations dirigées, y compris celles faisant appel aux fonctionnalités avancées de Thermoptim, soit les séances Diapason où les apprenants construisent par eux-mêmes leurs modèles.

## **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, Diapason, navigateur pour les explorations de modèles, 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 le cheminement a sans doute été de savoir quelles étapes se fixer pour la suite, 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, notre 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 nous puissions tester en situation les 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 explicitier 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...

C'est pour cela que le soutien financier apporté de manière durable par UNIT a été si important. L'élaboration d'une nouvelle pédagogie dans une discipline comme la thermodynamique appliquée est un processus de longue haleine qui demande de nombreuses itérations, les solutions envisageables dépendant de réalisations technologiques relativement longues à imaginer puis à mettre en œuvre, notamment dans un contexte général où l'évaluation des enseignants-chercheurs est effectuée sur la base de leurs publications en recherche et non pas de leurs investissements pédagogiques, ce qui limite le temps qu'ils peuvent y consacrer.

### Bien explicitier les difficultés pédagogiques rencontrées

Que la démarche ait été itérative signifie qu'il aurait été impossible de spécifier à l'avance les 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. Nous insistons là-dessus, car il nous semble impossible que des concepteurs de nouvelles ressources numériques puissent 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'identification détaillée des difficultés pédagogiques rencontrées plutôt que sur la présentation des solutions technologiques envisagées. C'est seulement après avoir bien précisé les objectifs pédagogiques que l'on se fixe et en mettant en évidence les difficultés auxquelles on est confronté que l'on peut définir le travail à réaliser.

Un point que nous n'avons pas évoqué mais qui nous semble fondamental est qu'il est à notre avis de loin préférable que les enseignants développent leur maîtrise des outils de création de TICE plutôt que de « sous-traiter » leur réalisation à des cellules multimédia. Les outils de production sont en effet aujourd'hui assez faciles d'accès, et ce n'est que s'il peut modifier lui-même les ressources qu'il a créées qu'un enseignant les fera évoluer. Le processus de développement des ressources numériques étant long et incrémental, on n'arrive pas du premier coup à mettre au point une solution pédagogiquement pertinente. L'autonomie de création nous semble hautement souhaitable, et aujourd'hui possible. Les cellules multimédia peuvent venir en soutien, mais il vaut mieux que les enseignants s'approprient les outils.

C'est un point important, car nous entendons souvent dire que, pour qu'ils puissent se consacrer davantage à l'élaboration pédagogique, il faut que les enseignants soient libérés des contraintes de production, que les cellules TICE doivent prendre en charge, sur la base de spécifications détaillées.

Un dernier point est qu'il nous semble de loin préférable de mettre l'accent sur les fonctionnalités plutôt que sur l'esthétique. Il ne faut pas passer trop de temps à préparer des écrans très sophistiqués, mais plutôt se concentrer sur la simplicité et la pertinence pédagogique. On gagne ainsi à la fois en productivité et en efficacité pédagogique.

Le fil directeur doit toujours être la résolution de difficultés pédagogiques avérées, en les prenant une par une, selon la méthode des Horace et des Curiaque, 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 nous paraît fondamental qu'ils prennent le temps de se former sur ce plan, ne serait-ce qu'en développant leur 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<sup>13</sup>.

## 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.

<sup>13</sup> [https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thoip/fr/co/module\\_Enseignement\\_1.html](https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thoip/fr/co/module_Enseignement_1.html)

## 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 nos élèves préfèrent apprendre avec les séances Diapason, certains y sont complètement réfractaires et nous disent qu'ils aiment mieux travailler directement avec les 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 nous 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 trentaine 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. Il a aussi beaucoup bénéficié des conseils de nombreux collègues dont il est impossible de citer ici tous les noms<sup>14</sup>. 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 principal fondement de notre 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'approprier 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.

## **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 [2] ;

<sup>14</sup> <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/credits.html>

- 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 9), directement reflétée dans les écrans du progiciel ;
- 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 diversification des ressources numériques mises à disposition des élèves, afin que chacun puisse utiliser celles qui correspondent le mieux à son style d'apprentissage ;
- Un apprentissage constructiviste les rendant actifs et leur permettant de décider par eux-mêmes de leur rythme de progression, avec de nombreuses activités d'auto-évaluation ainsi que d'exploration ou de construction de modèles lors de séances de travaux dirigés ou de projet ;
- Le maintien, tout au long de la réalisation des ressources numériques, d'un fil directeur principal correspondant à l'identification des difficultés pédagogiques rencontrées et à leur résolution.

Thermoptim dispose en outre de fonctionnalités avancées que nous n'avons pas présentées 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 [6].

### **Une réponse à un besoin souvent exprimé**

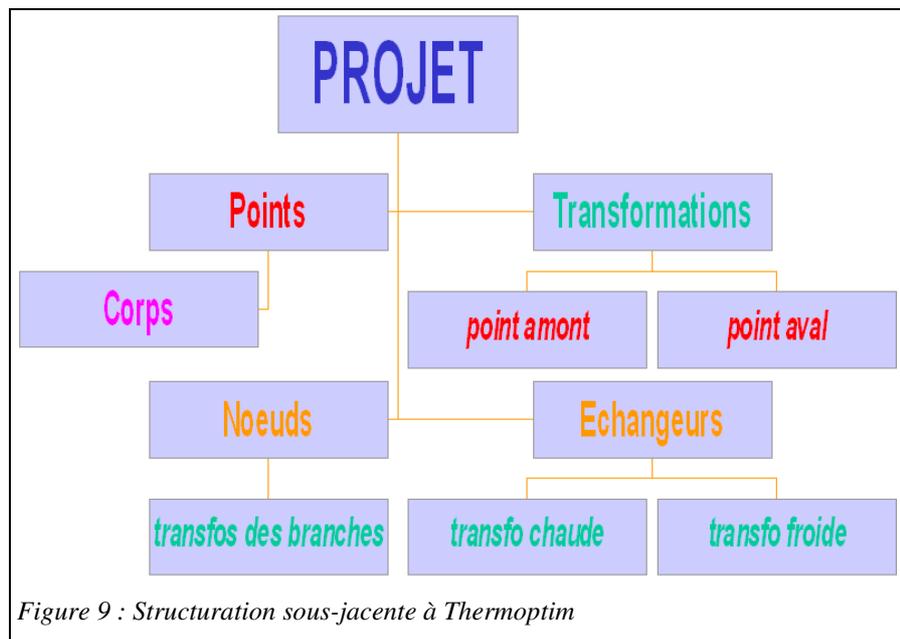


Figure 9 : Structuration sous-jacente à Thermoptim

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, les grandes écoles, les entreprises et même le grand public via les MOOC.

C'est ce nouveau paradigme que nous avons utilisé dans l'édition 2023 de notre livre *Systèmes Énergétiques*, dont l'objectif est comme nous l'avons dit de permettre à des lecteurs dont le niveau scientifique est modeste de s'initier aux systèmes énergétiques thermodynamiques.

Nous avons vu que la thermodynamique appliquée à l'ingénierie continue d'évoluer de manière significative et que des changements technologiques considérables sont encore attendus dans les décennies à venir.

Comme en témoignent les demandes qui nous sont régulièrement adressées, il existe un grand nombre de personnes qui cherchent à mettre au point de tels dispositifs énergétiques innovants mais ne possèdent pas les bases en mathématiques et en physique qui leur permettraient de se former à la conversion thermodynamique de la chaleur en suivant les approches classiques.

Ces personnes, souvent extrêmement motivées par les enjeux climatiques actuels, s'investissent quelquefois sans réserve pour concevoir des dispositifs techniques qu'ils pensent pouvoir être des solutions aux défis du secteur énergétique. En leur proposant des pédagogies adaptées à leurs besoins, nous espérons leur faciliter la tâche et les aider à aboutir dans leur quête.

## **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 a faible impact environnemental, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, janvier 2009.
- [6] GICQUEL, R. Le progiciel Thermoptim, une boîte à outils pour l'énergétique, Techniques de l'Ingénieur, Génie Energétique, BE 8047, 2009.