

PLACE DES SIMULATEURS DANS LA CONCEPTION  
D'ENVIRONNEMENTS PEDAGOGIQUES VIRTUELS :  
REFLEXIONS METHODOLOGIQUES ET MISE EN ŒUVRE POUR L'ENERGETIQUE

---

Renaud GICQUEL (1)

(1) Ecole des Mines de Paris  
Rue Claude Daunesse – BP 207  
F-06904 SOPHIA ANTIPOLIS Cedex  
renaud.gicquel@ensmp.fr ; France

---

**Abstract.** We are facing a new challenge : train students able to deal with problems more complex despite of lighter scientific bases, and this should be done in a shorter time span. The pedagogical use of simulators may be the solution if it complies with some rules. On the basis of the experience gained with the ThermoOptim simulator, which is currently being used for teaching applied thermodynamics in more than a hundred higher education institutions, we will try in this paper to analyse the possibilities and risks associated with these tools, and we will provide some methodological milestones consistent with recent educational theories.

**Résumé.** 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 simulateurs peut être la solution à ce problème, dans la mesure où elle respecte un certain nombre de règles. Sur la base de l'expérience acquise avec le simulateur ThermoOptim, aujourd'hui utilisé pour l'enseignement de l'énergétique dans une centaine d'établissements d'enseignement supérieur, nous chercherons dans cette présentation à analyser les opportunités pédagogiques offertes par ces outils ainsi que les précautions à prendre, et nous fournirons quelques jalons méthodologiques basés en particulier sur les théories éducatives récentes et sur la didactique.

**Mots Clés.** Simulateurs, pédagogie, énergétique, TICE, simulators, pedagogy, energy modelling, ICT

## INTRODUCTION

Le contexte de la formation des ingénieurs a beaucoup évolué au cours des dernières années. Même si leurs connaissances scientifiques et techniques et leur capacité à les mobiliser pour résoudre des problèmes concrets sont parmi les spécificités qui continuent à les distinguer le plus des autres cadres supérieurs, ils doivent de plus en plus, comme eux, se préoccuper des dimensions non techniques de leur travail, c'est-à-dire de gestion des hommes, d'économie des projets, de marketing des produits, d'impact environnemental des technologies... Dans ces conditions, le temps dont ils disposent pour s'investir dans la technique et leur motivation pour le faire sont aujourd'hui plus réduits qu'auparavant. De plus, le volume horaire consacré aux matières techniques dans les programmes de formation des ingénieurs diminue lui aussi progressivement, les travaux dirigés et les projets étant souvent les premiers sacrifiés.

Cette évolution du cahier des charges de la formation nous oblige à renouveler les pédagogies que nous mettons en œuvre, mais, fort heureusement, nous disposons aussi de nouveaux atouts du fait de l'existence des environnements virtuels, même si toutes ces évolutions interpellent fortement les enseignants et les conduisent à s'interroger sur leur pédagogie, domaine où ils sont le plus souvent presque totalement autodidactes.

Enseigner, c'est mettre des élèves dans une situation leur permettant d'apprendre, et cela comporte plusieurs dimensions. Il faut savoir en particulier :

- choisir le contenu à enseigner
- choisir les modalités de présentation
- graduer les difficultés et varier les activités
- assurer un suivi des élèves

Dès qu'il creuse un peu les choses, l'enseignant peut ainsi être conduit à penser que son problème s'apparente à celui de la quadrature du cercle. Il doit en effet être :

- compétent dans la discipline (théorie et pratique)
- conscient des difficultés pédagogiques auxquelles il est confronté
- cultivé sur les aspects neurophysiologiques et cognitifs de l'acquisition des connaissances

- familiarisé avec les différentes modalités pédagogiques disponibles
- réaliste quant à ses objectifs

Parmi les outils logiciels dont nous disposons, les simulateurs encapsulent un savoir considérable et modifient profondément les connaissances que les élèves doivent acquérir. Leur utilisation pédagogique conduit un enseignant à se poser d'autres questions plus spécifiques :

- quel équilibre faut-il rechercher entre la théorie et les applications ?
- n'y a-t-il pas un risque que les élèves utilisent le simulateur sans réellement comprendre ce qu'il fait ?
- comment peut-on amener les élèves à se placer au niveau conceptuel approprié ?
- quels savoirs les élèves doivent-ils vraiment acquérir ?

Compte tenu des thèmes du colloque, nous proposerons ici quelques jalons méthodologiques pouvant être utilisés dans ce contexte, en nous focalisant essentiellement sur la définition du contenu à enseigner et sur la place que les simulateurs peuvent y occuper. Ces résultats sont issus des réflexions que nous menons depuis une dizaine d'années dans le cadre du développement de Thermoptim ([www.thermoptim.com](http://www.thermoptim.com)), simulateur de systèmes énergétiques aujourd'hui utilisé dans une centaine d'établissements d'enseignement supérieur, aussi bien en premier cycle (CPGE et IUT) qu'en second ou troisième cycle (écoles d'ingénieur, universités). Valables pour l'énergétique, ils sont vraisemblablement transposables dans une large mesure au génie des procédés, moyennant quelques précautions.

Pour préciser le contenu à enseigner, nous avons proposé un modèle qui définit une typologie des connaissances scientifiques à transmettre et souligne le rôle fondamental des exemples commentés.

### ARTICULATIONS DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES : LE MODELE RTM(E)

Lorsqu'un enseignant veut définir le contenu de son enseignement, disposer d'une typologie adéquate pour décrire les connaissances à transmettre nous semble essentiel. Pour aborder ce sujet, la didactique met l'accent sur la distinction aujourd'hui classique entre **savoir** et **savoir-faire**. Develay<sup>1</sup> précise 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, bien évidemment essentielle, reste cependant trop globale pour notre propos, et, faute d'avoir trouvé dans la littérature un modèle qui réponde pleinement à notre attente, nous en avons proposé un, appelé **RTM(E)**<sup>2</sup>, 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).

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... L'étude de cette 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). 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.

Pour la thermodynamique appliquée, on peut considérer que la Théorie, aujourd'hui classique, est bien stabilisée. La Réalité, c'est-à-dire la description de la technologie, doit régulièrement être actualisée pour tenir compte des évolutions, mais celles-ci sont relativement lentes. C'est donc essentiellement sur les Méthodes et les Exemples que peuvent porter les innovations pédagogiques.

L'étude de la **Réalité** recouvre celle des faits, de la nature, du terrain, du monde, de la technologie... Le contenu de l'enseignement ne prête ici pas particulièrement à controverse. Il faut présenter d'une part les propriétés de la matière, au moins sur le plan qualitatif, d'autre part les différentes technologies et leurs usages, et enfin la typologie des problèmes posés. Pour cela, les modalités pédagogiques les plus utilisées sont des visites, des exposés, des présentations de diaporamas, des projections de films, des lectures, des démontages/remontages, des travaux pratiques... Signalons aussi que la Réalité représente une partie très importante de l'enseignement,

les connaissances initiales des élèves sur ce sujet étant le plus souvent assez réduites, du moins en formation initiale.

La théorie de la thermodynamique couvre un domaine très large (concepts de base, définitions, hypothèses, équations, modèles des fluides...), et des choix doivent être faits dans ce qui est exposé. En matière de **Théorie**, les élèves ont généralement quelques connaissances initiales, malheureusement souvent fragiles et parcellaires, qu'il faut reprendre, le plus souvent par des présentations magistrales et des travaux dirigés. C'est sans doute à ce niveau que les débats sont aujourd'hui les plus forts, notamment sur la question des équations à présenter, qui sera développée plus loin.

Les **Méthodes** permettent de passer de la théorie aux applications, et notamment à la résolution des problèmes posés dans le cadre des Exemples. Ce passage correspond à l'acte de modélisation et à l'acquisition d'un savoir-faire. En inversant la perspective, on peut dire que la théorie représente des abstractions des différentes méthodes de résolution. La connaissance des Méthodes qu'ont les élèves est la plupart du temps embryonnaire, car découplée des applications. L'enseignement peut ici beaucoup bénéficier de l'étude des Exemples de base résolus et de la pratique d'exercices destinés à rendre les élèves opérationnels. C'est essentiellement à ce niveau que les simulateurs présentent de l'intérêt comme supports pour des pédagogies innovantes.

C'est autour des **Exemples** que s'explicitent le plus clairement les liens qui existent entre les trois autres 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.

## LES SIMULATEURS

Les simulateurs sont des outils incorporant des Méthodes et facilitant leur mise en œuvre. Sur le plan industriel, ils présentent de nombreux atouts, car ils permettent d'augmenter très sensiblement, tant en terme de temps que de coût, la productivité des ingénieurs qui ont à effectuer des modélisations :

- tout d'abord, leurs environnements de travail facilitent (grâce à des interfaces conviviales) et sécurisent la modélisation en minimisant les risques d'erreur lors de la définition des modèles (automatisation des liens entre composants, génération automatique d'équations, tests de cohérence...);
- ensuite, leur capacité de résolution de problèmes et leur portée excèdent de loin celles qui seraient accessibles à un ingénieur développant seul ses modèles : ils capitalisent des savoirs multiples ;
- la précision des résultats des bons simulateurs est excellente, et leurs modèles sont très réalistes ;
- ils permettent un archivage des projets étudiés, et proposent généralement des bibliothèques de projets résolus qui peuvent être réutilisés moyennant quelques adaptations ;
- ils permettent d'effectuer facilement des études de sensibilité ou des optimisations, et proposent souvent des interfaces d'analyse des résultats obtenus ;
- ils peuvent être utilisés aussi bien en conception que pour le diagnostic d'installations existantes (souvent en vue de pouvoir évaluer les améliorations possibles).

D'une manière générale, l'utilisation pédagogique des simulateurs permet d'enrichir l'apprentissage des élèves :

- ils facilitent l'acquisition du savoir-faire, les élèves étant déchargés des difficultés calculatoires : la discipline ne reste pas un ensemble de concepts abstraits ;
- ils permettent d'effectuer des études de cas réalistes ;
- en facilitant les calculs, ils rendent plus attractive l'étude des exemples ;
- ils permettent de réduire la charge cognitive<sup>2</sup> dans la phase d'acquisition des schèmes ;
- ils placent l'automatisation des tâches<sup>2</sup> à un niveau conceptuel et méthodologique supérieur, les aspects purement calculatoires étant sous-traités à l'ordinateur. Il y a augmentation significative de la capacité de résolution des problèmes ;
- en fournissant un environnement d'apprentissage professionnel, ils peuvent rendre les élèves vraiment opérationnels, ce qui est un facteur majeur de leur motivation, et donc de leur attention ;
- ils permettent des actions collaboratives entre les élèves et entre eux et les enseignants.

C'est pourquoi nombreux sont les enseignants qui sont tentés d'introduire des simulateurs dans leur enseignement, ce qui a pour conséquence immédiate de remettre en cause les équations à enseigner, et débouche de ce fait sur une question très controversée que nous allons maintenant aborder.

## LES EQUATIONS : UNE QUESTION CONTROVERSEE

A notre sens, il est possible de distinguer trois grandes catégories d'équations :

- les équations de la thermodynamique analytique, qui fournissent les relations générales entre les fonctions d'état de la thermodynamique (équations de Maxwell, relation de Mayer, fonctions caractéristiques généralisées...), et permettent de calculer les fonctions de base ( $Q, W, \tau, h, s, P, T$ )
- celles qui permettent de calculer les propriétés des fluides, notamment réels
- les expressions permettant de calculer le travail, la chaleur, les bilans conservatifs et entropiques, les bilans des espèces en cas de réaction chimique

La 1ère catégorie est fondamentale pour les théoriciens et ceux qui doivent estimer les propriétés des fluides, mais rarement utilisée pour les applications à l'énergétique. Les équations correspondantes sont en principe enseignées en 1er cycle, notamment dans certaines filières de CPGE. Que les élèves les aient vues une fois suffit pour notre propos comme nous allons l'établir dans ce qui suit.

La 2ème catégorie concerne essentiellement les physiciens spécialistes des propriétés des fluides. Un énergéticien peut généralement se contenter d'utiliser des logiciels pour obtenir les valeurs dont il a besoin. Il suffit en pratique qu'il connaisse bien sur le plan qualitatif les évolutions subies par les fluides dans les composants, plus quelques expressions valables pour les gaz parfait, ainsi que la loi de mélange des phases.

La 3ème catégorie est fondamentale pour les applications. Elle recouvre :

- les expressions du premier principe pour les systèmes ouverts et fermés
- les équations permettant de calculer les différents composants
- l'établissement des bilans conservatifs (massiques, énergétiques, de composition des espèces)

### **N'enseigner que des équations réellement utiles...**

Dès lors que les évaluations quantitatives peuvent être effectuées par des logiciels, les équations des deux premières catégories n'ont plus nécessairement besoin d'être enseignées, du moins pas dans un premier temps ni à tous les élèves. En revanche, il importe que l'établissement des bilans conservatifs soit parfaitement maîtrisée, ce qui suppose une bonne connaissance des équations du troisième type. Non seulement les élèves doivent mémoriser le premier principe et le sens de tous les termes qui y apparaissent, mais ils doivent de surcroît bien comprendre les évolutions subies par les fluides, ainsi que les justifications des hypothèses faites sur le fonctionnement des composants et leur traduction mathématique (par exemple, isobaricité dans un échangeur, adiabaticité dans un compresseur...). Il ne s'agit pas de proscrire les équations, mais de choisir de ne les introduire qu'au moment opportun, quand les conditions sont réunies pour que les élèves les mettent en application de manière effective et pertinente.

Dans la méthode classique de présentation de la discipline, on commence par mettre en exergue les équations des deux premiers types en passant beaucoup de temps à les présenter, pour finir par conclure qu'en pratique on ne pourra les utiliser qu'exceptionnellement compte tenu d'une part de leur complexité et d'autre part des restrictions sur leur domaine de validité. Cette manière de faire nous semble être une grave erreur sur le plan pédagogique car la charge cognitive associée à cette partie du cours est très lourde, et le temps que les élèves doivent passer pour réellement maîtriser ce formalisme est disproportionné avec l'usage qu'ils en feront : l'efficacité pédagogique de ces équations est de fait très réduite.

Il nous semble de beaucoup préférable de tout de suite montrer aux élèves qu'existent des environnements de travail qui leur permettent d'obtenir des résultats très précis sans aucune difficulté calculatoire, tout en leur indiquant d'une part que les équations incorporées dans ces environnements sont des généralisations de celles qui peuvent être obtenues analytiquement pour des gaz parfaits, et d'autre part que ceux qui le souhaitent auront tout loisir de les étudier dans un deuxième temps, préférablement quand ils disposeront d'une culture de base suffisante dans le domaine.

### **mais bien faire comprendre les principes de calcul des composants**

A ce stade, il convient sans doute de lever une ambiguïté. S'il nous paraît inutile que les élèves apprennent certaines équations, nous pensons en revanche essentiel qu'ils comprennent parfaitement le principe de calcul des composants qui interviennent dans les modèles qu'ils paramètrent.

Considérons par exemple l'enchaînement des opérations permettant de calculer la compression d'un gaz ou d'une vapeur dans un compresseur centrifuge ou volumétrique non refroidi. Nous savons que la transformation peut presque toujours être considérée comme adiabatique, les échanges de chaleur avec l'extérieur de la machine étant négligeables. Connaissant le rendement isentropique  $\eta$  du compresseur, les conditions d'aspiration  $P_a$ ,  $T_a$  et la pression de refoulement  $P_r$ , le déroulement des calculs est le suivant :

1. on commence par calculer l'entropie du fluide à l'aspiration  $s(P_a, T_a)$  ;
2. on cherche la température  $T_s$  correspondant à la compression adiabatique réversible, c'est-à-dire isentropique, qui est donnée par l'équation  $s(P_r, T_s) = s(P_a, T_a)$ , qu'il faut inverser en  $T_s$  ;
3. on calcule alors l'écart d'enthalpie entre le refoulement isentropique et l'aspiration, donné par la relation  $\Delta h_s = h(P_r, T_s) - h(P_a, T_a)$  ;
4. on en déduit l'enthalpie de fin de compression réelle fournie par  $h_r = h(P_a, T_a) + \Delta h_s/\eta$  ;
5. on cherche enfin, par inversion de l'équation  $h(P_r, T_r) = h_r$ , la température de refoulement  $T_r$ .

Ces cinq opérations constituent ce que nous appelons une "**séquence de règles de calcul**" (SRC), qui constitue sans ambiguïté une Méthode au sens du modèle RTM(E). Il importe à ce stade de souligner que cette séquence de règles doit être exprimée de manière générale, indépendante des hypothèses relatives aux propriétés des fluides. Nous insistons sur ce point parce que très souvent un amalgame est fait à ce niveau, et des équations de validité limitée sont présentées comme une règle générale. Combien de collègues avons-nous entendu se plaindre de ce que la deuxième règle ci-dessus, qui permet de déterminer l'évolution isentropique, est trop souvent considérée par les élèves comme équivalente à  $Pv^\gamma = \text{Cste}$ , valable uniquement pour les gaz parfaits...

Autant il est fondamental que les étudiants comprennent bien (et mémorisent) cette séquence de règles de calcul et leurs justifications physiques, autant il est à notre avis sans importance qu'ils sachent par eux-mêmes calculer avec toute la précision requise les fonctions d'état enthalpie et entropie de la vapeur considérée, et a fortiori qu'ils écrivent les algorithmes permettant d'inverser ces fonctions pour trouver les températures  $T_s$  et  $T_r$ . Ces calculs, qui leur prendraient beaucoup de temps, peuvent aussi bien sinon mieux être effectués par des logiciels existants.

## LES MODULES DIAPASON

Les réflexions didactiques accompagnant le développement de Thermoptim ont fait apparaître l'intérêt de compléter le simulateur par d'autres outils relevant des TICE afin notamment de présenter aux élèves la réalité technologique, qu'ils méconnaissent très largement au début de leur apprentissage. Ainsi, depuis septembre 2004, Thermoptim est complété par les **modules de formation à distance sonorisés Diapason**. Ces modules permettent aux étudiants de travailler par eux-mêmes, à leur rythme, seuls ou en groupe, et d'avoir accès en ligne à tout moment aux explications orales données par l'enseignant en complément des supports écrits dont ils disposent, ainsi qu'à des exercices utilisant le simulateur qui leur donnent la possibilité de se familiariser avec les différents cycles et leurs méthodes d'analyse. Une présentation en ligne des modules Diapason est disponible à l'adresse suivante :

<http://www-cep.ensmp.fr/cours/Diapason/seances/PresDiapason/seance.html>

Les modules Diapason sont structurés en étapes, séances, parcours et cursus. Leur spécificité est d'associer une bande son à un écran, permettant aux élèves d'obtenir des explications orales contextuelles. Des hyperliens permettent d'accéder à des documents divers comme des tableurs ou des pdf. Ces modules, qui permettent de faire aussi bien des présentations théoriques, méthodologiques que technologiques, utilisent comme visualisateur un environnement d'exécution Flash supporté par la quasi-totalité des navigateurs Web récents, qui permet de synchroniser des ressources multimédia variées, comme des images, des bandes-son, des documents pdf, des animations swf, des tableurs, des liens hypertexte...

Leur intérêt principal est leur excellente efficacité pédagogique. Lors de l'utilisation de ces modules, les élèves sont plus actifs qu'en salle de cours, en ce sens qu'ils règlent eux-mêmes leur rythme d'écoute, mais surtout ils choisissent eux-mêmes les moments où ils étudient, et sont donc disponibles lorsqu'ils le font ; ils apprennent mieux, d'autant plus qu'ils ont tout loisir de revenir en arrière ou de compléter les informations qui leur sont présentées en recourant aux documents écrits.

Les bandes-son ayant une durée moyenne de moins d'une minute, leur attention peut être soutenue lorsqu'ils étudient une étape, et ils ne passent à la suivante qu'après un temps de repos. En cas de doute ou s'ils ont été absents, ils peuvent s'y référer sans aucune difficulté.

Thermoptim et les modules Diapason constituent l'ossature logicielle de la nouvelle pédagogie de la thermodynamique appliquée que nous proposons. Le simulateur permet de modéliser les différents systèmes énergétiques à enseigner, tandis que les modules sonorisés fournissent aux élèves l'ensemble des explications dont ils ont besoin.

Nous avons ainsi mis en ligne un ensemble d'environ 900 écrans sonorisés à 85 % (10 h de bande-son), structurés en une cinquantaine de séances, librement accessibles à partir de l'adresse suivante : [http://www.cep.ensmp.fr/cours/SE/auto\\_FAD/accueil.html](http://www.cep.ensmp.fr/cours/SE/auto_FAD/accueil.html).

Les retours d'expérience dont nous disposons sont très encourageants et montrent que cette nouvelle approche rencontre un très grand succès auprès des élèves. Il est bien entendu que la plus grande souplesse dans l'emploi du temps comporte aussi certains risques, notamment de manque d'assiduité. Il faut donc mettre en place un suivi rigoureux des élèves, et ne pas hésiter à les relancer régulièrement par courriel pour leur rappeler d'avancer dans leur travail. Le mécanisme d'évaluation qui nous paraît aujourd'hui le meilleur comporte un petit oral et un travail personnel sur projet, généralement réalisé en binôme.

Nous pensons que l'apprentissage est un processus itératif qui se prête bien à une pédagogie progressive, allant du simple (mais toujours réaliste, c'est fondamental) au compliqué. Pour des raisons à la fois cognitives et psychologiques, il vaut mieux, en particulier pour la thermodynamique appliquée, commencer par montrer aux élèves comment le savoir qu'on leur présente peut être mis en application concrètement, en limitant au maximum les difficultés conceptuelles. Rappelons qu'ils doivent avant tout se familiariser avec une Réalité nouvelle, qu'ils ne connaissent quasiment pas, et que cet apprentissage se traduit déjà par une charge cognitive élevée.

Au début, il nous semble préférable de leur montrer qu'existent des environnements comme Thermoptim avec lesquels ils peuvent "faire de la thermo sans peine" et obtenir des résultats très précis sans écrire une seule équation. Une fois que leurs réticences initiales sont vaincues et qu'ils ont assimilé le vocabulaire et les concepts de base, il devient possible de franchir une nouvelle étape et d'introduire davantage d'équations. L'expérience accumulée depuis neuf ans confirme que, une fois qu'ils ont réalisé qu'existent aujourd'hui des Méthodes très performantes pour passer à l'application, des apprenants initialement très réticents vis à vis de la Théorie demandent souvent des approfondissements : dès que sont tombés les blocages psychologiques mis en place par des présentations de la discipline trop axiomatiques et très peu applicables, les élèves deviennent beaucoup plus réceptifs vis à vis des équations, sans doute parce qu'ils ne craignent plus de se retrouver incapables de les mettre en pratique. Nombreux sont ceux qui souhaitent en savoir plus et bien comprendre à la fois les SRC sous-jacentes et les équations correspondantes.

## CONCLUSION

Les simulateurs scientifiques peuvent jouer un rôle majeur sur le plan pédagogique, dans la mesure où ils sont bien utilisés, ce qui demande généralement une profonde reconception de l'enseignement. Il faut cependant être conscient que la difficulté calculatoire est loin d'être la seule dans nos enseignements, ce que le modèle RTM(E) permet de bien comprendre. Des environnements comme les modules Diapason permettent de mettre à disposition des élèves de nombreuses informations complémentaires sous une forme très facile à utiliser. Réduisant très sensiblement la charge cognitive de cet enseignement, leur efficacité pédagogique est excellente, même pour des disciplines traditionnellement difficiles à enseigner.

Dans cet article, nous avons cherché à répondre à certaines des questions qui se posent lorsque l'on désire renouveler la pédagogie d'une discipline scientifique difficile comme la thermodynamique appliquée, en nous limitant aux points essentiels concernant la simulation, du fait des contraintes de temps et d'espace qui nous étaient imposées. Les lecteurs intéressés par des compléments sur ces sujets trouveront de plus amples informations sur le site de la Communauté des enseignants du projet Thermoptim-UNIT : <http://www.cep.ensmp.fr/cours/UNIT/CommunauteUnit.htm>.

## REFERENCES

1 DEVELAY, M. De l'apprentissage à l'enseignement, ESF, 1992

2 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