

MOOC Conversion Thermodynamique de la Chaleur



Intérêt du MOOC

Conversion Thermodynamique de la Chaleur est un parcours de deux MOOC qui traitent des systèmes énergétiques permettant soit de convertir de la chaleur en travail mécanique, soit d'extraire de la chaleur à basse température grâce à un apport d'énergie mécanique. Ces technologies sont aussi appelées machines thermiques.

La conversion thermodynamique de la chaleur joue un rôle essentiel dans nos sociétés car elle permet de répondre à des besoins fondamentaux comme le chauffage, la production de froid, l'éclairage, la mobilité, la fourniture d'énergie mécanique...

Parmi les technologies qui y ont recours, on peut citer les :

- Installations de production d'électricité à partir de combustibles fossiles, de réacteurs nucléaires, de capteurs solaires, de géothermie...
- Moteurs automobiles, turboréacteurs
- Systèmes de réfrigération et de climatisation
- Installations de chauffage par pompe à chaleur
- Dispositifs de récupération d'énergie dans des procédés ou à partir d'effluents
- Installations de production simultanée de chaleur et d'électricité (cogénération)
- Systèmes thermodynamiques innovants à faible impact environnemental

Rappelons que plus de 90 % de l'énergie primaire consommée dans le monde provient encore de la combustion des énergies fossiles, et que, si on fait abstraction du train, les transports reposent quasi-uniquement sur les machines thermiques, que la réfrigération continue de se développer pour des raisons sanitaires, de conservation des matières alimentaires et de confort, et que la climatisation est une nécessité dans les grands ensembles résidentiels du monde entier, et plus généralement dans les pays chauds.

Les systèmes énergétiques qui seront étudiés dans ce MOOC ont donc un impact direct sur notre vie quotidienne à tous. Même si certains de ces systèmes existent depuis plusieurs décennies, de nouveaux développements sont aujourd'hui nécessaires pour faire face aux défis du monde actuel, en particulier pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et combattre le changement climatique.

L'ambition de ce MOOC est de rendre l'étude de ces systèmes énergétiques la plus accessible possible, avec une double finalité :

- fournir aux apprenants une vision d'ensemble des différentes technologies de conversion de l'énergie, pour qu'ils puissent en comprendre les principes de conception et les récentes évolutions ;
- faire le lien par la modélisation entre cette réalité technologique et les fondements du génie énergétique.

Il propose pour cela une méthode originale qui permet de dépasser les limites que rencontre l'enseignement de la discipline par les approches classiques.

La pédagogie retenue a été développée au sein de Mines ParisTech et est entièrement originale¹. Faisant appel au simulateur Thermoptim, elle est mise en application dans plus de 120 établissements d'enseignement dans le monde.

Présentation générale

Compte tenu du champ couvert, le MOOC est décomposé en deux parties, Modéliser et Simuler (CTC-MS) et Cycles Classiques et Innovants (CTC-CCI). Dans la suite, nous parlerons indifféremment de deux MOOC, d'un MOOC en deux parties ou d'un parcours de deux MOOC pour le désigner.

Dans le MOOC Modéliser et Simuler les apprenants commenceront par acquérir les bases de la modélisation des systèmes énergétiques simples (centrales à vapeur, turbines à gaz, machines de réfrigération) et sauront en paramétrer les modèles dans le simulateur Thermoptim.

Ils utiliseront ensuite ce savoir dans le MOOC Cycles Classiques et Innovants pour étudier les cycles moteurs et récepteurs classiques et les cycles Innovants à faible impact environnemental :

- Cycles moteurs : moteurs alternatifs à combustion interne à essence, à gaz et diesel, propulsion aéronautique, cycles combinés, installations de cogénération, cycles à énergie solaire, cycles nucléaires à haute température (HTR), énergie thermique des mers, installations de géothermie, cycles à oxycombustion, conversion de la biomasse
- Cycles récepteurs : pompes à chaleur, cycle de Brayton inverse, cryogénie, cycles à éjecteur

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.

Le prérequis pour le MOOC Modéliser et Simuler est le niveau bac pro ou scientifique, et pour le MOOC Cycles Classiques et Innovants soit une connaissance antérieure de Thermoptim, soit avoir suivi avec succès le MOOC Modéliser et Simuler.

Le choix d'un dispositif d'apprentissage de type MOOC pour sensibiliser le public à ces enjeux, vise également à :

¹ <http://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thoht/fr/co/presentation-methode.html>

- placer l'apprenant au cœur de sa formation (il est garant et acteur de sa formation, il peut suivre son état d'avancement, aller à son rythme, définir son parcours de formation) ;
- offrir l'opportunité d'une formation collaborative (échange entre pairs, co-construction des savoirs) ;
- développer la capacité à apprendre en autonomie.

Hors activités d'approfondissement éventuelles, la charge de travail estimée est à 3 h par semaine, pendant quatre semaines pour chacun des deux MOOC.

Le MOOC se décline en 8 modules, dont le contenu est précisé ci-dessous :

CTC-MS, Module 1 : Etude des principales fonctionnalités mises en jeu dans les technologies énergétiques

CTC-MS, Module 2 : Energies mises en jeu dans les transformations

CTC-MS, Module 3 : Propriétés et diagrammes des corps purs

CTC-MS, Module 4 : Explorations dirigées avec le simulateur Thermoptim des modèles des cycles simples

CTC-CCI, Module 1 : Réduction des irréversibilités dans les cycles moteurs, application aux cycles à vapeur

CTC-CCI, Module 2 : Moteurs à combustion interne classiques, biomasse

CTC-CCI, Module 3 : Cycles combinés, cogénération, cycles récepteurs

CTC-CCI, Module 4 : Cycles innovants à faible impact environnemental

Enfin, comme le volume horaire de ce cours ne permet pas d'aborder tous les sujets de ce vaste domaine, de nombreuses pistes d'approfondissement sont proposées pour ceux qui souhaitent compléter leurs connaissances, renvoyant notamment sur les pages pertinentes du portail Thermoptim-UNIT

Le MOOC proposera des espaces d'échange avec des experts afin de fournir aux apprenants un accompagnement pédagogique à chaque étape de leur apprentissage.

Pédagogie du MOOC

Le renouveau de la pédagogie de la thermodynamique appliquée que nous proposons repose sur un déplacement du savoir acquis par les apprenants. La mise en équation des évolutions subies par les fluides est drastiquement réduite, les calculs étant effectués par le simulateur Thermoptim 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 innovants, analysant graphiquement et paramétrant des modèles des diverses technologies énergétiques.

A partir de l'analyse fonctionnelle des composants des technologies énergétiques et des évolutions de référence suivies par les fluides, les apprenants sont amenés à se familiariser avec les diagrammes thermodynamiques qui constituent un des

environnements de travail du simulateur et jouent un rôle fondamental dans l'apprentissage. Dans le cadre de ces MOOC, seul le diagramme $(h, \ln(P))$ dit des frigoristes est utilisé, afin de ne pas alourdir le contenu en faisant appel à l'entropie, qui est un concept difficile à maîtriser et dont on peut très bien se passer. Toutefois, un complément facultatif sur l'entropie est proposé en fin du second MOOC aux apprenants désireux d'acquérir quelques notions à ce sujet.

Le MOOC Modéliser et Simuler se limite à l'étude des cycles simples et introduit également les notions essentielles de thermodynamique de manière contextualisée afin de leur donner du sens et de faciliter ainsi leur compréhension par les apprenants.

L'utilisation du simulateur 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 diagrammes couplés au simulateur.

Une fois les cycles simples bien compris, il devient possible d'étudier les cycles plus complexes, ce qui est effectué dans le MOOC Cycles Classiques et Innovants.

Dans ce second MOOC, les apprenants font le lien entre les caractéristiques technologiques des différents systèmes énergétiques et leurs architectures et voient comment ils peuvent être modélisés avec un progiciel comme Thermoptim.

Ils commencent par réfléchir aux pistes d'amélioration possibles des cycles simples étudiés dans le MOOC Modéliser et Simuler, l'objectif étant d'obtenir les meilleures performances thermodynamiques possibles.

Le fil directeur qui sous-tend ces analyses est la réduction des irréversibilités, une attention particulière étant accordée à celles qui proviennent des écarts de température avec les sources externes et lors des régénérations internes. Par ailleurs, l'intérêt des compressions et détente fractionnées est mis en évidence chaque fois que possible.

Dans ces deux MOOC, l'utilisation du simulateur se fait essentiellement sous forme d'une quarantaine 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 particulier 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.

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 ainsi

considérablement, et, si elles surviennent, les apprenants n'ont qu'à réinitialiser le navigateur en rechargeant les fichiers dont ils disposent.

Ultérieurement, si un apprenant est amené à construire par lui-même des modèles avec Thermoptim, il le fera avec beaucoup plus de facilité s'il a procédé à ces explorations dirigées car il se sera familiarisé avec les écrans du progiciel. Il trouvera toutes les explications nécessaires sur la manière de bâtir des modèles soit dans la documentation du progiciel soit dans les cours en ligne proposés dans le portail Thermoptim-UNIT.

Une cinquantaine d'exercices d'auto-évaluation permettent par ailleurs aux apprenants de vérifier par eux-mêmes leur compréhension des notions présentées, au fur et à mesure qu'elles sont introduites².



Déroulement du MOOC Modéliser et Simuler

Nous présentons ci-dessous les grandes lignes du déroulement du MOOC Modéliser et Simuler, en indiquant les savoirs acquis par les apprenants.

Semaine 1 : Etude des principales fonctionnalités mises en jeu dans les technologies énergétiques

La première semaine aborde l'étude des fonctionnalités mises en jeu dans les technologies énergétiques.

A partir de l'analyse de l'architecture des systèmes énergétiques simples (centrales à vapeur, turbines à gaz, machines de réfrigération), on y montre qu'un tout petit nombre de composants sont mis en œuvre : des organes de compression volumétriques et des turbomachines, des échangeurs de chaleur, des chambres de combustion et chaudières, et enfin des détendeurs ou vannes.

En approfondissant les choses, on met en évidence les quatre fonctions élémentaires utilisées : comprimer un fluide, le détendre avec travail, le chauffer ou le refroidir, et enfin le détendre sans travail.

6 vidéos de 35 mn au total sont prévues, et 1 h 15 mn d'activités d'auto-évaluation.

A la fin de la semaine, les apprenants :

- auront étudié les architectures des cycles simples et sauront identifier leurs composants
- sauront ce qu'est un fluide de travail ou fluide thermodynamique

² http://dirensmines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/module_Enseignement_6.html

- auront découvert les principes de fonctionnement de ces composants
- seront capables de décrire les quatre fonctions élémentaires mises en jeu
- et enfin sauront les repérer sur les schémas des systèmes énergétiques étudiés

Semaine 2 : Energies mises en jeu dans les transformations

La deuxième semaine introduit des notions de thermodynamique essentielles pour pouvoir modéliser les systèmes énergétiques.

Après avoir commencé par effectuer une première découverte des performances des compresseurs et des turbines utilisées dans une turbine à gaz, on introduit les notions de système thermodynamique et d'état.

Les échanges d'énergie entre un système thermodynamique et son environnement sont ensuite étudiés, ce qui permet d'énoncer le premier principe de la thermodynamique en système fermé puis ouvert.

On montre alors que les quatre grandes fonctions élémentaires identifiées la semaine précédente correspondent à trois évolutions de référence subies par les fluides qui traversent les machines, déclinant chacune un cas particulier d'application du premier principe.

5 vidéos de 32 mn au total sont prévues, et 1 h 15 mn d'activités d'auto-évaluation.

A la fin de la semaine, les apprenants :

- sauront différencier les systèmes fermés et les systèmes ouverts
- seront capables de distinguer les fonctionnalités et les évolutions de référence
- sauront écrire le premier principe de la thermodynamique et utiliser les fonctions h , Q , τ
- seront capables de décrire les trois évolutions de référence mises en jeu
- et enfin sauront les repérer sur les schémas des systèmes énergétiques étudiés

Semaine 3 : Propriétés et diagrammes des corps purs

La troisième semaine est consacrée à l'étude des propriétés des fluides thermodynamiques.

Après avoir commencé par étudier les propriétés des corps purs, et la manière dont l'état d'un fluide peut être caractérisé, un approfondissement sur la vapeur d'eau est effectué, compte tenu de son importance pratique.

Les modèles des gaz parfaits et idéaux sont brièvement présentés, puis un retour sur la notion d'état est effectué, avec une réflexion sur le choix des variables d'état à considérer.

Les diagrammes thermodynamiques dans lesquels les cycles peuvent être visualisés sont alors étudiés, car ils jouent un rôle fondamental dans l'apprentissage de la discipline.

Le reste de la semaine est consacré à la représentation graphique dans le diagramme $(h, \ln(P))$ des cycles des systèmes énergétiques simples (centrales à vapeur, turbines à gaz, machines de réfrigération).

6 vidéos de 30 mn au total sont prévues, et 1 h 30 mn d'activités d'auto-évaluation.

A la fin de la semaine, les apprenants :

- sauront identifier les différents états des corps purs
- seront capables d'expliquer les énergies mises en jeu lors des phénomènes de vaporisation et de condensation
- seront capables d'utiliser la représentation d'une loi de pression saturante pour connaître la température à laquelle un corps change de phase en fonction de sa pression
- sauront décrire les modèles des gaz parfaits et idéaux
- sauront repérer dans le diagramme $(h, \ln(P))$ les différentes zones et les allures des différentes évolutions de référence
- et enfin sauront représenter dans le diagramme $(h, \ln(P))$ les cycles des systèmes énergétiques simples

Semaine 4 : Exploration des modèles des cycles simples

La quatrième semaine est consacrée à l'exploration dirigée de modèles des cycles simples réalisés avec le simulateur Thermoptim.

Après avoir commencé par étudier les fonctionnalités de ce simulateur (vidéo introductive de 13 mn), les apprenants travaillent à l'aide du navigateur couplé au progiciel (vidéo introductive de 4 mn) qui leur permet de mettre en pratique les connaissances acquises au cours des trois semaines précédentes en les appliquant aux cycles des systèmes énergétiques simples (30 mn d'exploration pour chacun).

Chaque scénario comporte trois grandes parties :

- 1) Découverte du modèle, paramétrage initial, lien avec ce qui a été vu précédemment
- 2) Tracé dans le diagramme $(h, \ln(P))$
- 3) Reparamétrages du modèle

A la fin de la semaine et du MOOC, les apprenants seront capables de :

- utiliser le vocabulaire et les concepts de base de la thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques
- expliquer les propriétés thermodynamiques des fluides (sur le plan qualitatif)
- repérer leur correspondance dans les différentes zones du diagramme $(h, \ln(P))$
- identifier les allures des isovaleurs et des évolutions de référence dans ce diagramme
- définir le premier principe de la thermodynamique
- utiliser les fonctions h, Q, τ
- établir des bilans énergétiques simples
- analyser l'architecture des exemples simples et en paramétrer les composants
- construire des cycles de ces exemples dans le diagramme $(h, \ln(P))$



Déroulement du MOOC Cycles Classiques et Innovants

Nous présentons ci-dessous les grandes lignes du déroulement du MOOC Cycles Classiques et Innovants, en indiquant les savoirs acquis par les apprenants.

Semaine 1 : Réduction des irréversibilités dans les cycles moteurs, application aux cycles à vapeur

La première semaine commence par quelques réflexions sur les critères d'optimisation des cycles moteurs, afin de montrer d'une part l'importance de réduire les irréversibilités, notamment par différence de température, et d'autre part les avantages du fractionnement des compressions et détente (vidéo de 7 mn).

Ces réflexions sont ensuite appliquées aux systèmes énergétiques simples, en commençant par les centrales à vapeur (5 vidéos de 27 mn au total).

Quelques compléments sont apportés sur la représentation dans ThermoOptim des nœuds et des échangeurs de chaleur, fonctionnalités jusque-là non utilisées (vidéo de 9 mn), et les apprenants qui ne le connaissent pas encore découvrent le navigateur ThermoOptim dans lequel sont réalisées les explorations dirigées de modèles (vidéo de 6 mn).

Les explorations dirigées de modèles (1 h au total) portent sur les cycles suivants :

- Cycle à vapeur à réchauffe
- Cycle à vapeur à réchauffe et prélèvement
- Sécheur-surchauffeur de centrale nucléaire REP
- Cycle Organique de Rankine

A la fin de la semaine, les apprenants :

- sauront calculer le rendement de Carnot d'un cycle moteur
- auront compris en quoi les cycles réels diffèrent du cycle de Carnot
- sauront que le travail de compression ou de détente adiabatique est proportionnel à la température absolue du fluide de travail entrant dans la machine
- connaîtront les principales variantes des cycles à vapeur

Semaine 2 : Moteurs à combustion interne classiques, biomasse

Au cours de la deuxième semaine, les apprenants poursuivent l'application des réflexions de la semaine précédente aux moteurs à combustion interne classiques : turbines à gaz et moteurs alternatifs à essence, à gaz et diesel, ainsi qu'aux installations de combustion de la biomasse (7 vidéos de 32 mn au total).

Quelques compléments sur la modélisation de la combustion dans Thermoptim sont pour cela nécessaires, ainsi que sur l'extension du noyau du progiciel par des classes externes (vidéo de 7 mn).

Les vidéos présentent les cycles de turbines à gaz et leurs variantes, y compris les turboréacteurs et turbopropulseurs.

Les explorations dirigées de modèles (1 h 15 mn au total) portent sur les cycles suivants :

- Cycle de turbine à gaz à régénération
- Cycle de turbine à gaz à refroidissement intermédiaire
- Turboréacteurs
- Moteur alternatif à gaz

A la fin de la semaine, les apprenants :

- sauront calculer une combustion dans Thermoptim, en système aussi bien ouvert que fermé
- connaîtront les principales variantes des cycles de turbines à gaz
- auront étudié des cycles simplifiés des moteurs alternatifs à combustion interne
- sauront identifier l'origine des irréversibilités et les axes d'amélioration des cycles moteurs

Semaine 3 : Cycles combinés, cogénération, cycles récepteurs

Au cours de la troisième semaine, les apprenants commencent par poursuivre l'application des réflexions des semaines précédentes aux systèmes énergétiques hybrides très performants que constituent les cycles combinés (1 vidéo de 10 mn) et les installations de cogénération (3 vidéos de 16 mn au total).

Dans un second temps, ils transposent ces réflexions aux cycles récepteurs, dont l'optimisation fait aussi appel à la réduction des irréversibilités (7 vidéos de 23 mn au total).

Les vidéos présentent de nombreux cycles.

Les explorations dirigées de modèles (1 h au total) portent sur les cycles suivants :

- Cycle combiné à 1 niveau de pression
- Cogénération à moteur alternatif à gaz
- Cycle de réfrigération à injection totale
- Cycle de réfrigération à éjecteur sans compresseur

A la fin de la semaine, les apprenants :

- sauront paramétrer un cycle combiné à 1 niveau de pression
- connaîtront les principales variantes des installations de cogénération
- auront étudié différentes variantes de cycles de réfrigération et de cryogénie
- sauront identifier l'origine des irréversibilités et les axes d'amélioration des cycles récepteurs

Semaine 4 : Cycles innovants à faible impact environnemental

Au cours de la quatrième semaine, les apprenants travaillent sur des modèles de cycles innovants à faible impact environnemental : cycles à énergie solaire (3 vidéos de 9 mn au total), cycles nucléaires à haute température (HTR) (1 vidéo de 6 mn), énergie thermique des mers (1 vidéo de 4 mn), installations de géothermie (3 vidéos de 12 mn au total), cycles à oxycombustion (1 vidéo de 5 mn).

Les explorations dirigées de modèles (1 h 15 mn au total) portent sur les cycles suivants :

- Cycle à micro-turbine pour capteur solaire parabolique
- Centrale géothermique à vaporisation par flash
- Cycles nucléaires à gaz à haute température
- Cycle à oxycombustion du type oxy-fuel

A la fin de la semaine et du MOOC, les apprenants devraient être en mesure de :

- décrire la typologie et les principes de calcul des composants simples (y compris leurs caractéristiques technologiques)
- identifier, pour chacun d'entre eux, l'origine des irréversibilités et les axes d'amélioration
- expliquer les principales raisons qui ont conduit au choix des architectures des cycles étudiés
- analyser l'influence des principaux paramètres constructifs sur les performances des systèmes énergétiques étudiés

Ils devraient donc maîtriser les savoir-faire suivants :

- pouvoir paramétrer un modèle relativement simple dans Thermoptim et en calculer les performances
- savoir tracer son cycle dans le diagramme $(h, \ln(P))$ et vérifier sa cohérence
- savoir paramétrer un échangeur de chaleur
- savoir calculer une combustion

Enfin, des compléments facultatifs sur l'entropie sont proposés aux apprenants désireux de se familiariser avec cette notion (5 vidéos de 18 mn au total, et trois explorations dirigées portant sur le tracé des cycles simples dans le diagramme entropique).