

CIFQ2011 / Enseignement02

LE COURS DE BASE EN ÉNERGIES RENOUVELABLES À L'ÉTS

Daniel **ROUSSE***, Stéphane **HALLÉ**

École de technologie supérieure, Montréal, Canada

Dans un article compagnon, les initiateurs du programme de deuxième cycle hybride conjoint du réseau de l'Université du Québec en matière d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique présentent le programme, ses objectifs, sa formule et ses résultats (les résultats 2010-2011 seront intégrés). À l'ÉTS, un cours de base obligatoire a été créé pour ce programme afin d'initier les étudiants aux énergies renouvelables. L'objectif du cours est de présenter l'éventail des possibilités technologiques actuelles et à venir en énergie renouvelables et de présenter aussi l'importance de l'efficacité et de la sobriété énergétiques sur l'avenir de notre consommation. Le cours présente aussi dans une large mesure les aspects économiques et sociaux liés aux enjeux énergétiques. Cet article présente les détails de ce cours dans le but de susciter d'éventuelles collaborations avec d'autres groupes d'enseignants-chercheurs qui travaillent sur des thèmes similaires.

1. INTRODUCTION

S'il fut une époque pas si lointaine où l'énergie ne préoccupait que peu ou pas les sociétés, les gouvernements et les peuples, aujourd'hui il s'agit d'un sujet qui occupe les manchettes de l'actualité régulièrement partout dans le monde, quel que soit le pays et sa situation économique et sociale [1].

Nous assistons à cet intérêt en raison de plusieurs facteurs que nous ne pouvons décrire et expliquer dans le cadre de cet article. Quoique ceux-ci puissent être, l'humanité cherche à : (1) réduire sa consommation énergétique ; (2) assurer la sécurité de ses approvisionnements ; (3) développer des technologies et des systèmes plus efficaces ; (4) implanter davantage de technologies faisant appel à des sources d'énergies renouvelables afin de remplacer les carburants fossiles [2].

C'est dans ce contexte que le programme de deuxième cycle universitaire en énergies renouvelables et en efficacité énergétique de l'Université du Québec a vu le jour. Ce programme conjoint s'implante néanmoins de manière différente dans chacune des constituantes de l'Université du Québec. À l'ÉTS, il s'agit d'une concentration disponible pour les étudiants de maîtrise (type professionnel ou recherche, 45 crédits) et de diplôme d'études supérieures spécialisées (DESS, 30 crédits) des départements de génie mécanique et électrique [3].

Le cours « Énergie Renouvelables » (ÉR) a d'abord été conçu comme porte d'entrée de ce programme et constitue le seul cours obligatoire ayant trait à l'énergie quelque soit le programme dans lequel les étudiants s'inscrivent.

2. LE COURS

2.1. Clientèle

En raison du programme de l'ÉTS, le cours ER s'adresse à la fois à une clientèle spécialisée en génie mécanique et en génie électrique. Toutefois, mais aussi à des étudiants ayant des profils d'ingénieurs généraux, en aménagement, en urbanisme et pour certains en informatique et en gestion.

Il est ainsi conçu pour être offert à des étudiants à temps plein ou à temps partiel avec des profils de formation très diversifiés. En ce sens, il peut être inséré dans un programme court de deuxième cycle (9, 12 ou 15 crédits) très aisément. Sa flexibilité permet aussi de le morceler et de le modifier afin de l'adapter à des auditoires de formation continue. En ce sens, le cours répond au triple besoin de former des gens en formation continue, programmes courts ou programmes réguliers de 2^e cycle.

Il est possible d'obtenir plus de détails sur ce cours en téléchargeant le plan de cours, disponible sur demande [4].

2.2. Formule pédagogique

Le cours s'offre selon deux formules : la formule traditionnelle sur une période de un trimestre à raison de trois heures de classe par semaine et la formule formation continue qui est offerte trois fois de semaines sur une période d'un mois ou six semaines.

2.3. Objectifs

En raison de sa clientèle diversifiée et de son rôle en début de programmes de formation très différents, les objectifs du cours sont les suivants :

1. Comprendre les enjeux énergétiques mondiaux et québécois

- Connaître la distribution géopolitique des différentes sources d'énergie ;
- Comprendre tous les impacts liés à l'utilisation des carburants fossiles ;
- Identifier les opportunités d'implantation des énergies nouvelles ;
- Identifier les principales sources d'énergie renouvelable et leurs modes d'exploitation ;
- Expliquer l'histoire de l'énergie, de son utilisation et les enjeux qui découlent de celle-ci.

2. Résoudre des problèmes simples d'implantation de projets en énergie renouvelable.

- Analyser les cycles thermodynamiques de base et les bilans énergétiques mis en œuvre pour la conversion des énergies renouvelables ;
- Effectuer des analyses de performance énergétique et économique de base pour des équipements ou des installations ayant trait aux énergies renouvelables ;

- Formuler correctement un problème:
 - identifier les données pertinentes et les quantités demandées ;
 - exécuter un schéma du problème ;
 - formuler des hypothèses pour résoudre ;
 - effectuer les calculs pertinents;
 - interpréter le résultat.
- Présenter la solution de problèmes ayant des impacts sociaux, économiques et techniques.

3. Connaître les diverses applications en ingénierie où les énergies nouvelles peuvent jouer un rôle important.

- À partir de mises en situation, identifier le ou les projet(s) pertinent(s) ;
- Modéliser la production et les étapes de conversion de différentes technologies d'énergies renouvelables;
- Identifier les moyens possibles pour réduire la consommation, réduire les pertes thermiques, mieux employer l'énergie, recycler l'énergie, stocker l'énergie;
- Identifier les convertisseurs électroniques de puissance constituant l'interface entre la source d'énergie renouvelable et le réseau électrique auquel elle sera connectée.

4. Démontrer un sens de l'analyse des projets énergétiques.

5. Connaître le travail de l'ingénieur en énergie au XXI^e siècle.

La Figure 1, ci-dessous, illustre les liens entre les différents objectifs du cours

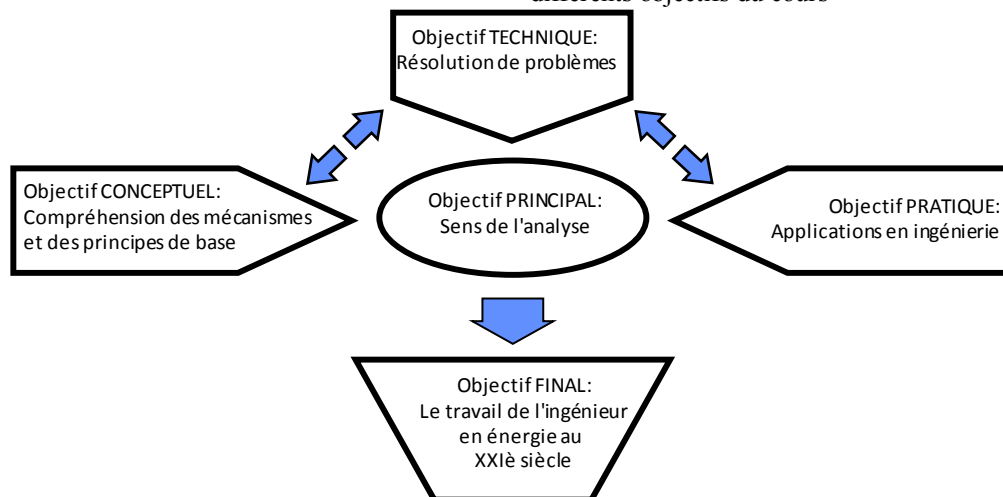


Figure 1. Organisation des objectifs du cours

2.4. Stratégies pédagogiques

La formule pédagogique prévoit une introduction aux aspects économiques et sociaux, mécaniques et électriques des énergies renouvelables. En classe, il y a

naturellement des capsules ou énoncés magistraux que l'on tente de réduire au minimum afin de laisser place à des discussions et à des questions. Les énoncés sont effectués par l'un des trois membres de l'équipe

* auteur correspondant

professorale ou par un invité provenant d'un domaine particulier. Nous procédons aussi à des évaluations formatives en soumettant de courtes études de cas à résoudre en classe ou à terminer à l'extérieur.

Dans la formule régulière, des capsules de mise à niveau sont préparées pour les étudiants qui n'ont pas les acquis requis pour construire sur les savoirs nouveaux qui sont introduits en classe. Dans la formule de fins de semaines intensives, les étudiants sont des ingénieurs en exercice qui ont déjà ces acquis voire davantage pour plusieurs d'entre eux.

L'évaluation sommative inclut de courts examens, une présentation, une monographie ou dissertation et des études de cas. Ce travail de recherche est exigé des participants afin d'enrichir le contenu du cours à chaque année.

Le travail demandé à l'extérieur de la classe correspond à deux heures de travail personnel ou en équipe par heure de classe.

2.5. Contenu pédagogique

Chaque activité présentée concerne une période de 90 minutes environ. On présente ici d'abord le contenu du cours, et par la suite le contenu des capsules de mise à niveau.

COURS

- Présentation du plan de cours. Présentation de l'équipe de professeurs. Présentation de ce cours dans l'ensemble de la concentration (liens avec les autres cours)
- Généralités sur l'énergie – Énergie?, Histoire de l'énergie, Cycle énergétique sur la terre, Grandeurs physiques et notions de thermodynamique,
- Le monde et l'énergie – Situation mondiale, Comparaison entre la Tunisie, le Canada, le Québec et le reste du monde.
- Les défis de l'énergie – GES, Sobriété énergétique, Efficacité énergétique, Analyse du cycle de vie, Sécurité
- Les énergies renouvelables et non-renouvelables
- Le stockage d'énergie – Stockage mécanique (gravitationnel, air comprimé, volants d'inertie), stockage électrique (abordé dans la dernière partie du cours) et stockage thermique (sensible, latent, thermochimique). (En développement).
- Énergie du soleil – Le solaire thermique
- Énergie du soleil – Le solaire photovoltaïque
- Thermodynamique – Disponibilité énergétique, Cycles thermodynamique, Efficacité
- Hydrogène (Production et stockage, piles à combustible, impact environnemental)
- Énergie des océans (Conversion de l'énergie thermique, vagues, marées, courants marins, impact environnemental)

- Énergie hydraulique (Disponibilité, installation à hauteur de charge faible et élevée, impact environnemental)
- Énergie géothermique (disponibilité, réservoir à faible, moyenne et haute enthalpie)
- Biomasse (propriétés chimiques et physiques, biogaz, bioéthanol et biodiésel)
- Énergie du vent (principes, disponibilité, types d'éoliennes)
- Principes des circuits électriques; grandeurs énergétiques et qualité d'onde
- Les principes des circuits magnétiques et transformateurs de puissance
- Les convertisseurs rotatifs à base de machines synchrone et asynchrone pour la production de l'énergie électrique
- Les éléments de base des convertisseurs statiques de l'énergie électrique : les circuits électroniques de puissance.
- Les chaînes de conversion reliées à une source d'énergie renouvelable
- Application 1 : Interconnexion d'une source d'énergie éolienne sur le réseau électrique
- Application 2 : Interconnexion d'une source d'énergie solaire sur le réseau électrique
- Interconnexion de deux réseaux. Lien à courant continu.

CAPSULES

- Notions de thermodynamique (définitions, cycles, rendements)
- Transfert thermique (convection, conduction, échangeurs et rayonnement)
- Préparation à l'examen 1
- Aérodynamique (couche limite, trainée, portance)
- Hydraulique (pertes de charge, pompes, débit, puissance)
- Retscreen 1 (donnée par des invités)
- Préparation à l'examen 2
- Génie électrique 1
- Génie électrique 2
- Génie électrique 3
- Retscreen 2 (donnée par des invités)
- Préparation à l'examen 3.

Le contenu technique du cours est donc limité en raison de ce que le profil général des étudiants est insuffisant pour approfondir des notions particulières et que de nombreux sujets doivent être abordés, la question énergétique étant très vaste. Les sujets plus techniques sont abordés en détails dans des cours spécialisés de mécanique et d'électricité.

2.6. Évaluation

Les rôles des évaluations sommative et formative sont différents : la première sanctionne et porte un

* auteur correspondant

jugement à terme sans rétroaction possible sur les connaissances ou les compétences d'un individu ; la seconde concerne le jugement en cours d'apprentissage et permet les rétroactions donc des corrections. L'évaluation formative est donc préférable le plus souvent avant la sanction. Toutefois, pratiquement il est difficile d'assister chaque étudiant individuellement et c'est pourquoi, du travail d'équipe est exigé dans le cours afin que les étudiants se chargent de s'entre évaluer mutuellement.

Évaluation formative

Il s'agit des activités de contrôle et de régulation de la compréhension, orientées vers l'atteinte des objectifs du cours et vers la réussite des activités d'évaluation sommative, qui consistent en :

- des questions orales adressées à l'auditoire et commentées par l'enseignant (en classe);
- des discussions en classe;
- des lectures individuelles où chacun peut améliorer sa compréhension du sujet;
- des travaux de groupe qui nécessitent des discussions et des décisions
- des séminaires où chacun peut s'exprimer et corriger sa perception d'un enjeu particulier.

Évaluation sommative

Dans le cours ÉR, il peut y avoir jusqu'à 40 étudiants inscrits. Pour un tel nombre d'étudiants, il devient difficile de procéder à des évaluations sommatives individuelles et l'examen demeure un outil d'évaluation nécessaire. L'examen oral individuel est employé pour des groupes de 10 personnes et moins. Une équipe d'étudiants (4-5) prépare une recherche sur un sujet déterminé en début de session. Ce sujet est présenté devant la classe vers la fin du cours. Chaque participant est appelé à noter toutes les présentations orales. Les professeurs évaluent les présentations de même que la qualité des discussions qui suivent les présentations. La pondération de cette présentation est de 10%. Chaque équipe remet aussi à l'équipe professorale une copie papier (recto-verso) et une version électronique (respectant le format demandé) de la monographie qu'ils ont rédigée sur le sujet de recherche qu'ils ont abordé.

2.7. En bref

Titre	Énergie renouvelables
Niveau	2 ^e cycle universitaire
Prérequis	Diplôme en génie
Nombre de crédits	3
Heures de classe	39* ou 36**
Nombre de mise à niveau	18* ou 0**
Nombre d'enseignants	2 mec, 1 élec
Examens	3* ou 2**
Présentation évaluée	1
Dissertation évaluée	1
Études de cas	2**

* Formule régulières sur 13 semaines.

** Formule formation continue sur 3 fins de semaines.

3. LA DOCUMENTATION

Il est puéril de tenter d'effectuer une revue exhaustive de tout ce qui peut-être pertinent dans un tel cours. Mentionnons que la bibliographie du cours est mise à jour avec régularité en particulier pour les documents servant à documenter les études de cas.

3.1. Documentation obligatoire

Il n'y a pas de manuel de cours obligatoire, pas de livre que les étudiants doivent impérativement acheter. Toutefois, la documentation déposée sur le site du cours l'est. Les principaux sont :

- IEA, World Energy Outlook (Résumé), 22 p., 2009
- BP, Statistical review, 48 p., 2009
- IEA, World Key Statistics, 82 p., 2009
- IEA, Towards a more energy efficient future, 32 p., 2009
- NIC, Global trends 2025: A transformed world, Chapter 3 and 4, 120 p., 2008

Ces documents sont mis à jour au fur et à mesure de leur parution. Ils sont amplement utilisés.

3.2. Documentation proposée

Les livres et monographies suivants sont suggérés aux participants :

- Boyle, G., Renewable Energy, 2nd ed., Oxford, 2004
- Da Rosa, A. V., Fundamental of Renewable Energy Processes, Elsevier Academic Press, 2005.
- El-Bassam, N., Integrated Renewable Energy for Rural Communities, Elsevier Academic Press, 2004
- Heier, S., Grid integration of Wind Energy Conversion Systems, second edition, Jhon Wiley and sons, ltd, publication, 2006.
- Freris, L., Infield, D., Renewable energy in Power Systems, John Wiley and sons, ltd, publication, 2008.
- Klass, D., Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals, Elsevier Academic Press, 1998
- Kunstler, J. H., La fin du pétrole : Le vrai défi du XXI^e siècle, Plon, 2005
- Lund, H., Renewable Energy Systems, Elsevier Academic Press, 2005.
- Masters, G.M., Renewable and Efficient Electric Power Systems, Wiley Interscience, 2004.
- Prag, P., Renewable Energy in the Countryside, Elsevier Academic Press, 2007
- Salameh, Z., Renewable Energy System Design, Elsevier Academic Press, 2010
- Sorenson, B., Renewable Energy Conversion, Transmission, and Storage, Elsevier Academic Press, 2008
- Sorenson, B., Renewable Energy, 3rd ed., Elsevier Academic Press, 2004

- Sorensen, B., Da Rosa, A., Markqvart, T., Gupta, H., Silveira, Renewable Energy e-book collection, Elsevier Academic Press, 2008 (CD de 3810 pages)
- Tester, J.W., Drake, E.M., Driscoll, M.J., Golay, M. W., Peters, W.A., Sustainable Energy – Choosing Among Options, MIT Press, 2005

3.3. *Revue scientifique pertinentes*

- Renewable & Sustainable Energy Reviews, Journal
- Energy, Journal
- Energy and Buildings, Journal
- Renewable Energy, Journal
- Applied Energy, Journal
- Biomass & Bioenergy, Journal
- Bioresource Technology, Journal
- Geothermics, Journal
- Refocus, Journal
- Solar Energy, Journal
- Solar Energy Materials and Solar Cells, Journal
- Energy Conversion and Management, Journal
- Renewable Energy Focus, Journal

3.4. *Sites web*

- Agence Internationale de l'Énergie, World energy Outlook, <http://www.worldenergyoutlook.org/>
- Agence Internationale de l'Énergie, (2007 et +), Key world energy statistics. http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2007.pdf (téléchargé 2009-11-22)
- CTEC (2008), Center des Technologies de l'Énergie de Canmet, <http://cetc-varenes.nrcan.gc.ca> (consulté le 2008-04-07)
- Conseil de la science et de la technologie (2008), Stratégie d'innovation et de développement en efficacité énergétique et nouvelles technologies de l'énergie (à paraître).
- Conseil de la fédération, (2007), Une vision partagée de l'énergie au Canada.
- Éconologie, <http://www.econologie.com/la-consommation-mondiale-d-energie-articles-3282.html> (consulté 2007-11-12)
- Gouvernement du Québec, (2006), Loi sur le développement durable, Lois du Québec 2006, Chapitre 3.
- Ministère de l'industrie, France, <http://www.industrie.gouv.fr/energie/comprendre/qr-generalites.htm> (consulté 2007-11-24)
- Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, MDEIE, (2006), Un Québec innovant et prospère, Stratégie québécoise de la recherche et de l'innovation, <http://www.mdeie.gouv.qc.ca/index.php?id=2109> (consulté 2007-11-26)
- Ministère des ressources naturelles et de la faune (2006), L'énergie pour construire le Québec de demain, La stratégie énergétique du Québec 2006-

2015, <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/energie/strategie/strategie-energetique-2006-2015.pdf> (téléchargé 2008-01-08)

- Ministère des ressources naturelles et de la faune, <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation-energie.jsp> (consulté 2007-11-24)
- Ministère des Transports, MTQ, (2006), Le transport des personnes au Québec : Pour offrir de meilleurs choix aux citoyens, Politique québécoise du transport collectif
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, MDDEP, (2006), Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir, Plan d'action 2006-2012.
- Office de l'efficacité énergétique, (2006), État de l'efficacité énergétique au Canada, Ressources naturelles Canada.
- <http://oe.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/eee06/pdf/eee06.pdf> (téléchargé le 2007-12-20)
- Office national de l'énergie, (2006), Aperçu de la situation énergétique au Canada. <http://www.neb.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfimt/nrgyrprt/nrgyvrw/cndnrgyvrw2006/cndnrgyvrw2006-fra.pdf> (téléchargé le 2007-12-18)
- Planète énergies, <http://www.planete-energies.com> (consulté 2007-11-24)

4. LA SUITE DES CHOSES

Les raisons qui nous poussent à présenter ce cours à la communauté du CIFQ sont nombreuses mais parmi les principales notons les suivantes :

1. Nous désirons parfaire ce cours. L'intérêt pour le sujet, contrairement à celui qui est né du choc du pétrole des années 1970, est là pour rester. Donc, ce cours ne disparaîtra pas des cursus universitaires et mérite un développement et une consolidation.
2. Nous désirons inclure le volet économique et social de l'énergie dans une large proportion puisque c'est le seul cours des cursus qui introduit ces notions que les ingénieurs n'abordent généralement pas.
3. Nous voulons enrichir notre cours de l'expérience de nos collègues d'autres universités québécoises ou francophones. Nous ne pouvons prétendre à l'exhaustivité et la discussion, le partage, et la mise en commun des connaissances et pratiques ne peut qu'améliorer la formule.
4. Nous voulons contribuer à proposer des modules de formation qui pourraient devenir des éléments d'une formation multi-établissements dont les frontières dépasseraient le cadre de l'Université du Québec.

* auteur correspondant

5. Nous aimerions commencer par un projet concret le développement du troisième volet (Formation) des activités du Réseau International Francophone d'Énergétique [5].
6. Nous sommes à la recherche d'un financement qui nous permettrait d'embaucher un coordonnateur du développement de cette filière.

5. CONCLUSION

Cet article présente les éléments du cours « Énergies renouvelables » de l'École de technologie supérieure. Il s'agit d'un cours offert à une clientèle très diversifiée puisqu'il est à la fois obligatoire dans la concentration énergies renouvelables et efficacité énergétique des programmes de maîtrise et de DESS de génie mécanique et de génie électrique mais aussi offert aux étudiants qui font des programmes courts en énergie et qui ont des acquis très variés.

Le cours comporte à la fois des contenus techniques et socio-économiques liés à l'énergie. Il comporte les objectifs suivants : (1) comprendre les enjeux énergétiques mondiaux et québécois ; (2) résoudre des problèmes simples d'implantation de projets en énergie renouvelable ; (3) connaître les diverses applications en ingénierie où les énergies nouvelles peuvent jouer un rôle important ; (4) démontrer un sens de l'analyse des projets énergétiques ; (5) connaître le travail de l'ingénieur en énergie au XXI^e siècle.

On y aborde les thèmes de l'heure en énergie et la documentation proposée pour réaliser les études de cas

est mise à jour à chaque occurrence du cours pour nous assurer de la pertinence des sujets discutés. Les étudiants contribuent à maintenir le cours au niveau souhaité.

Le cours fait intervenir plusieurs spécialistes externes qui viennent témoigner de la pratique dans leur spécialité.

Nous espérons former une communauté intéressée à développer des contenus communs qui pourraient être partagés dans une série de cours de même nature puisque le maintien à jour de l'information est une tâche très exigeante.

En 2011-2012 nous recherchons des partenaires pour obtenir une subvention permettant le développement de modules de formation dans le cadre du Réseau International Francophone d'Énergétique.

6. RÉFÉRENCES

- [1] IEA, World Energy Outlook, French Résumé, *IEA*, 22 p., 2009
- [2] DUTIL, Y., ROUSSE, D.R., BEN SALAH, N., LASSUE, S., A Review on Phase Change Materials: Mathematical Modeling and Simulations, *RSER*, 15(1), xxx-xxx, (2011)
- [3] ROUSSE, D., MASSON, C., HALLÉ, S., ILINCA, A., PERRON, J., LAFRANCE, G., La maîtrise en énergies renouvelables et en efficacité énergétique à l'Université du Québec, *Comptes rendus Xe CIFQ*, Chicoutimi, Juin 2011.
- [4] AL-HADDAD, K. HALLÉ, S., ROUSSE, D., ENR-810 : Énergies renouvelables, *Plan de cours*, École de technologie supérieure, 2010.
- [5] ROUSSE et al. (38 co-auteurs), Le Réseau International Francophone d'Énergétique, *Comptes rendus IXe CIFQ*, pp.479-484, Lille, Mai 2009.

* auteur correspondant