

Journées
de l'ingénieur(e)
2005

**L'exergie : l'autre façon de faire
en analyse énergétique**

Par Richard Berthiaume ing., M.Sc.

18 Juin 2005

Introduction

Dans le contexte des grands débats qui ont eu lieu au cours des derniers mois sur des sujets touchants l'énergie (la centrale thermique du Suroît, la commission parlementaire sur l'énergie, les débats sur l'éthanol-carburant, l'hydrogène, la hausse des prix des formes d'énergie), c'est avec grand plaisir que j'aborderai avec vous l'analyse exergetique et ses applications. Nous jetterons un coup d'œil aux implications de cette méthode pour l'étude des cas suivants : la cogénération et le chauffage électrique.

S'il est un sujet qui touche les ingénieurs c'est bien l'énergétique. Tous auront certainement en mémoire ce fameux cours de thermodynamique où l'on apprenait des formules et des concepts parfois concrets et parfois abstraits. Des ingénieurs se sont rendus compte que ce qu'ils avaient appris au cours de leur formation n'était pas suffisant pour accomplir adéquatement des analyses plus poussées ou plus complexes. Ils ont donc élaboré l'analyse exergetique (l'exergie représente le travail maximum) pour mieux comprendre les systèmes qu'ils étudiaient et pour déterminer s'il était possible de les améliorer. L'augmentation du prix de l'énergie et la rareté des ressources ne sont pas étrangères au désir d'optimiser l'utilisation des ressources. Le mouvement scientifique vers l'analyse exergetique n'est donc aucunement le fruit du hasard.

Présenter les sciences de l'exergie en une vingtaine de minutes relève d'un défi digne du livre des records Guinness. Les applications de l'exergie pour l'exercice de notre profession sont presque infinies ; en effet, dès que nous travaillons la matière, nous transformons l'exergie.

Je prendrai aujourd'hui un chemin fort différent de tous les ouvrages dans le domaine en vous présentant ce qui m'apparaît être l'essentiel de l'analyse exergétique d'une manière un peu philosophique, tout en présentant quelques exemples très concrets. L'énergétique ne pouvant être dissociée des systèmes analysés, je vous parlerai de l'importance de la définition des systèmes en citant le cas de l'éthanol.

D'un univers plat à un univers courbe

Les structures fondamentales de la thermodynamique (dont sont issues l'énergie et l'exergie) ont été élaborées au 19^e siècle. Le principal objet d'étude était les relations entre le travail et la chaleur. En effet, même si je vous présente l'exergie comme quelque chose de nouveau, il n'en est rien ; l'essence de ce concept datant du début du 19^e siècle. L'étude de ces relations est fort complexe ; ainsi depuis les débuts de la thermodynamique, les scientifiques (et la société) ont choisi, utilisé, agencé et mis de côté certains concepts. Abordons d'abord le concept d'énergie tel qu'il est défini et utilisé actuellement.

Retournons quelques instants dans l'ambiance de la fin du 19^e siècle. Il y avait, à cette époque, une grande effervescence scientifique afin de découvrir des lois qui régissaient l'univers. Un scientifique, M. W.-J. Macquorn Rankine a décrit en 1867 ce qui semblait être un courant de pensée très fort à l'époque.

« Un des principaux objets de la physique mathématique est de reconnaître, au moyen de l'expérience et l'observation, quelles sont les quantités ou les fonctions physiques qui se conservent. »

La découverte de ces quantités ou fonctions physiques assuraient la célébrité. Par contre, cette phrase est lourde de sens car on cherchait à comprendre le monde qui nous entoure par la voie de principes de conservation, et cela est très limitatif. Voyons ce que ce courant de pensée a produit en énergétique.

En partant du principe qu'une quantité ou une fonction se conserve, on définit a priori un univers mathématique qui est régi par une constante. Cela donne sur un graphique une droite (figure 1).

Sur ce graphique, on définit en « y » la valeur de la constante, et en « x » une ou plusieurs modifications que peut subir le système. On a ainsi défini « l'univers d'une constante ». La droite horizontale de la figure 1 illustre le point de départ du principe de conservation de l'énergie. Il est difficile de comprendre pourquoi ce fut un si grand succès en énergétique : c'est un univers plat. Dans un tel univers, peu importe les modifications apportées au système (déplacement selon l'axe des « x »), la constante « y » est immuable. La démonstration de cet univers plat ne fut pas aisée. À partir d'un a priori subjectif on réussit à « prouver » cette constante par l'utilisation de l'équivalence-chaleur de chacun des éléments du système ; ainsi, la somme de l'équivalence chaleur de chacun des éléments du système est une constante.

C'est le fameux principe de la conservation de l'énergie qui peut être représenté par la formule suivante que l'on retrouve sous plusieurs formes dans tous les livres traitant de l'énergétique.

$$\hat{E}_{\text{potentielle}} + \hat{E}_{\text{cinétique}} + \hat{E}_{\text{chimique}} + \hat{E}_{\text{thermique}} + \hat{E}_{\text{électrique}} + \text{Etc...} = \text{constante}$$

Cette formule, transposée sur le graphique de la constante, donne un autre point de vue (figure 2).

Supposons qu'un déplacement selon l'axe des « x » représente une modification aux éléments du système, par exemple lorsque l'énergie chimique est convertie en chaleur (énergie thermique), ou que l'énergie potentielle est convertie en énergie cinétique et en chaleur etc. Au cours de ces « déplacements », la somme de l'équivalence chaleur de tous les éléments du système donne bel et bien une constante.

Cette méthode d'analyse donne l'impression que l'on peut transformer l'énergie dans tous les sens et sous toutes les formes. Cette conception de l'énergie dans le cadre de l'univers plat est malheureusement bien ancrée et très utilisée par notre société. Les débats sur l'énergie portent généralement sur une compréhension partielle de cet univers plat (constant). La réalité est beaucoup plus complexe, il y a des sens uniques, des non-retours que l'on ne peut identifier ou déceler dans cet univers.

Les non-retours sont liés à deux formes d'entropie, l'entropie de la chaleur et l'entropie de la matière. La croissance de l'entropie, c'est la tendance naturelle qu'ont la matière et la chaleur à se dissiper (ou se disperser). Matière et chaleur passent naturellement d'une forme plus « concentrée » à une forme plus « diluée ». L'entropie peut être qualifiée de mesure de la dispersion de la matière ou de la chaleur.

Plus la chaleur ou la matière a été dispersée, plus l'entropie est grande. Il est impossible de renverser (ou re-concentrer) cette dispersion sans apport extérieur d'énergie. Ainsi, l'univers énergétique que l'on croyait plat est en fait courbe car on ne peut modifier en tous sens les formes d'énergie. L'exergie exprime cet univers courbe.

L'exergie

En énergétique, une modélisation basée sur l'équivalence-chaleur a été créée pour satisfaire le critère de conservation. En exergie on cherche plutôt à évaluer le travail maximum qui peut être produit. Carnot, au début du 19^e siècle, a jeté les bases d'une théorie permettant d'évaluer le travail maximal qui puisse être tiré d'une source de chaleur. L'exergie est la continuité de cette approche. Ainsi, en analyse exergetique on laisse de côté la notion de conservation et d'équivalence-chaleur pour la notion d'équivalence-travail. On définit un univers qui n'est plus plat mais courbé et qui n'est plus absolu mais relatif. De cette équivalence travail naît le principe de non-conservation.

L'exergie c'est le travail maximum que l'on peut tirer de tout ce qui existe, que ce soit de la matière ou de l'énergie. Il y a de nombreuses formes d'exergie : chimique, mécanique, physique, électrique, etc. Pour donner un aperçu ce qu'est l'exergie, je ne présenterai qu'un seul de ces aspects , soit l'exergie de la chaleur. Nous verrons par la suite les implications de cet aspect dans le cadre d'études en ingénierie, d'une manière très sommaire, avec les deux exemples suivants : la cogénération et le chauffage électrique.

La figure 3 donne une indication de ce qu'est l'exergie de la chaleur. L'énergie de la chaleur est toujours la même (une constante), peu importe la température à laquelle cette chaleur est dégagée (la droite sur le graphique). En équivalent travail, l'exergie de la chaleur varie en fonction de la température à laquelle cette chaleur est dégagée. La fonction exergie est courbe et la fonction énergie est plate.

Les déplacements (transformation de l'énergie) qui semblaient possibles en tous sens dans l'univers plat ne le sont plus dans l'univers courbe. Du point de vue de l'exergie, lorsque l'on effectue des transformations il y a des pertes. Pour revenir à l'état initial, il faut « remonter » la pente de la courbe. Pour ce faire, il faut au minimum une quantité d'exergie équivalente à celle qui a été perdue lors de la « descente ». Cette exergie doit provenir d'une source externe. L'exergie ne se conserve donc pas, elle diminue inexorablement.

Les implications

- L'univers plat de l'analyse énergétique ne permet pas d'évaluer les limites liées à la transformation de l'énergie.
- L'exergie est une méthode qui non seulement fixe de nouvelles balises mais permet également de quantifier la dégradation de la matière et de l'énergie et les sens uniques de la transformation des ressources.
- L'exergie fixe des contraintes considérables pour la recherche de « nouvelles formes » d'énergie.
- Par l'analyse exergetique, une nouvelle perspective devient possible pour analyser et orienter toutes nos activités dans l'optique d'une meilleure utilisation des ressources.

Exemples de cas

L'analyse exergetique permet d'analyser tous les processus de transformation de la matière. J'aborderai ici, de la manière la plus simple possible, deux exemples communs dont on entend parler dans les médias pour expliquer la différence entre une analyse exergetique et une analyse énergétique.

La cogénération

La cogénération consiste à produire deux formes d'énergie (les produits) à partir d'une première forme d'énergie (figure 4). Par exemple, on utilise du gaz naturel (première forme) pour produire de l'électricité (premier produit) et de la vapeur (second produit).

Disons qu'un tiers de l'énergie ou de l'exergie du gaz naturel a été converti en électricité (rendement de 33 %). Si l'on fait une analogie avec la figure 3, pour ce tiers converti en électricité, il n'y a pas de différence entre l'analyse énergétique et l'analyse exergetique. C'est un peu comme si la transformation avait lieu à l'extrême droite du graphique, les deux courbes se rejoignant sous forme de droites parallèles.

En ce qui concerne l'exergie, l'électricité est considérée comme une source pure de travail. Il en va de même pour le gaz naturel (exergie chimique). Du point de vue énergétique, l'équivalent chaleur du gaz naturel et celui de l'électricité sont comparables. Pour les formes d'énergie où l'entropie est très faible (ce sont des formes « concentrées »), il y a peu de différence entre l'énergie et l'exergie. Mais dès qu'il y a « dispersion », les résultats diffèrent considérablement.

Toujours aux fins de notre exemple, supposons que le second tiers a été converti en chaleur sous forme de vapeur et que le troisième tiers a été libéré dans l'environnement sous forme de chaleur.

Le second tiers, la vapeur, n'est pas évalué de la même manière en exergie ou en énergie. En énergie, il possède pleinement « son » tiers de l'énergie du gaz naturel. En exergie par contre, ce tiers est d'autant plus diminué que la vapeur a été produite à une température proche de la température environnante (et à une pression proche de la pression atmosphérique). Si l'on considère uniquement la température de la vapeur, on constate aisément à la figure 3 que l'exergie de la vapeur ne représente qu'une fraction de l'énergie de la vapeur. Il y a eu perte d'exergie et la transformation s'est faite à sens unique. On ne peut « reconvertir » totalement l'énergie de cette vapeur en travail.

Le troisième tiers, la chaleur libérée dans l'environnement, est considéré en énergétique comme dissipé (mais toujours existant). En analyse exergétique, ce troisième tiers dégagé n'a plus d'exergie (car sa température finit par s'équilibrer avec celle de l'environnement). C'est le point où « $y = 0$ » à la figure 3.

L'analyse de l'efficacité de la cogénération exige la plus grande prudence. En effet, l'analyse énergétique du procédé de co-génération laisse entendre que la production de vapeur est bénéfique (une unité de gaz naturel donne un tiers d'électricité plus un tiers de chaleur), même si elle se fait au dépend d'une production moindre d'électricité. L'analyse exergétique quant à elle suscite de sérieuses interrogations sur la pertinence de produire de la vapeur (car cette production entraîne une perte d'exergie) au dépend d'une production moindre d'électricité.

Les deux méthodes d'évaluation de l'efficacité (énergie ou exergie) du même procédé (la cogénération), nous amènent à un constat différent. Il faut donc pousser l'analyse plus loin, notamment en élargissant le cadre d'analyse et en s'interrogeant sur le lien que le procédé de cogénération permet d'effectuer entre les ressources et les besoins finaux.

Le chauffage électrique

Le principe de l'exergie de la chaleur s'applique aussi à l'analyse du chauffage électrique. En énergétique, pour la production de chaleur par une plinthe électrique il n'y a pas de différence entre l'énergie de la chaleur et l'énergie électrique. L'univers plat indique que la conversion est très efficace.

Par contre, en exergie, l'équivalent travail de la chaleur dégagée par la plinthe électrique ne représente qu'une faible fraction de l'équivalent travail de l'électricité consommée pour produire cette chaleur. En effet, à partir de la chaleur de la maison (et du froid de l'extérieur) on ne pourrait produire qu'un travail moindre. Encore une fois, en étudiant l'énergie on conclut à un rendement élevé pour la production de chaleur à l'aide d'une plinthe alors qu'en étudiant l'exergie on conclut à un rendement très faible.

Le rendement est faible car on peut en théorie (et souvent en pratique) utiliser une thermopompe pour « produire » plus de chaleur à partir de l'électricité que par l'emploi d'une plinthe électrique. Dans le cas de la thermopompe, le travail de l'électricité est utilisé pour « pomper » de la chaleur et l'acheminer à l'intérieur de la maison. L'univers courbe de l'exergie indique qu'en rapprochant les formes d'énergie aux conditions environnementales on perd irréversiblement du potentiel travail. Sur la figure 3 on voit que la courbe exergie tend vers zéro lorsque l'on se rapproche de la température environnementale.

Importance de la définition des systèmes

Le travail potentiel se perd lorsque la chaleur ou la matière est dispersée. C'est l'augmentation d'entropie dont j'ai parlé plus tôt. Si ces pertes se produisent au moment de simples conversions, l'effet cumulatif de ces pertes au cours de multiples procédés exécutés en série est plutôt considérable. L'étude de systèmes plus complexes et l'analyse du cycle de vie permettent d'étudier ce phénomène.

Avec la rareté des ressources et leur prix élevé, les ingénieurs feront face, au cours des prochaines décennies, à des défis considérables. Non seulement il faudra produire des technologies et procédés performants, mais en plus il faudra comprendre leur intégration à l'intérieur de procédés de transformation de la matière de plus en plus complexes et longs. L'ingénieur devra s'interroger sur la provenance des matériaux et de l'énergie qu'il utilise, l'utilisation qu'il en fait et les besoins finaux qui seront ainsi comblés.

Les pertes d'exergie impliquent qu'un lien doit être étudié entre les ressources premières et les utilisations finales des produits finis. Cela signifie également que le champ d'analyse doit s'agrandir d'une manière considérable. Le débat sur l'éthanol carburant démontre la nécessité d'agrandir le champ d'analyse. Grâce à une analyse détaillée de tous les systèmes et de leurs interrelations qui entrent dans la production de l'éthanol à partir du maïs, on peut évaluer l'intérêt de ce choix pour la société.

Si on délaisse l'analyse énergétique pour utiliser l'exergie, on obtient une plus grande rigueur et une plus grande précision car l'exergie permet de quantifier des pertes. L'univers de la constante, quant à lui, ne permet pas de quantifier grand-chose à moins d'émettre de nombreuses hypothèses. Pour l'éthanol, il est difficile de trouver un sens à ce choix de société qui fait le lien, somme toute, entre des ressources et une utilisation finale.

On voit ici toute l'importance de considérer des méthodes d'analyse globales et rigoureuses car même si les règles de l'art en ingénierie ont été respectées à toutes les étapes de la production de l'éthanol, il est possible que l'ensemble du processus n'ait pas de sens. L'analyse exergetique ouvre ainsi la voie à une évaluation plus rigoureuse et plus précise pour nos choix de société. Que ce soit pour l'éthanol, l'hydrogène, l'énergie éolienne, l'hydroélectricité ou l'énergie thermique, un regard nouveau est possible.

Conclusion

L'exergie est une méthode de choix pour quantifier et comparer des options. Si nous disposions de sources de matériaux et d'énergie infinies cette question ne se poserait même pas, car il y aurait toujours des matériaux et de l'énergie à prix convenable pour toutes les réalisations. Dans un tel contexte, les pertes et les inefficacités seraient de moindre importance.

L'exergie est apparue pour combler le désir d'optimiser les procédés et cette science est en train de s'étendre à l'analyse du cycle de vie (*exergetic life cycle analysis*). L'intégration de ces méthodes d'analyse à notre profession pourrait conférer aux ingénieurs un avantage considérable, car nous pourrions non seulement éviter de poursuivre des travaux et des recherches sur des procédés et méthodes voués à l'échec mais aussi découvrir les méthodes les plus prometteuses.

Nous avons, en tant qu'ingénieurs, un rôle très important à jouer dans l'intégration de tous les travaux d'ingénierie au fonctionnement global de la société. J'entrevois là un des plus grands défis de l'ingénierie au cours des prochaines décennies. De grandes percées ont été réalisées en matière d'exergie et beaucoup reste à faire. Mais si l'on pouvait, au Québec, réduire de plusieurs années le décalage « naturel » qui existe entre les nouveaux développements scientifiques et leur application, cela serait grandement bénéfique ne serait-ce que pour éclairer sous un angle nouveau les débats portant sur notre avenir énergétique.

Les orientations pour l'obtention d'une société énergétiquement viable doivent être données par des professionnels aptes à comprendre les fondements et les enjeux des concepts en énergétique, il appartient donc aux ingénieurs de prendre la place qui leur revient et de mener le débat.

Pour en savoir plus

Sur le web, rechercher en anglais : Exergy

Quelques auteurs dans le domaine : Wall, Szargut (et al.), Rosen,

Cornelissen, Kotas, Bejan, Brodyansky (et al.)

Revue : Exergy the International Journal

Formation en énergétique (par l'auteur) : www.fsg.ulaval.ca/fcontinue

Pour joindre l'auteur par courriel : gorse@total.net

Figure 1 Univers mathématique défini par une constante

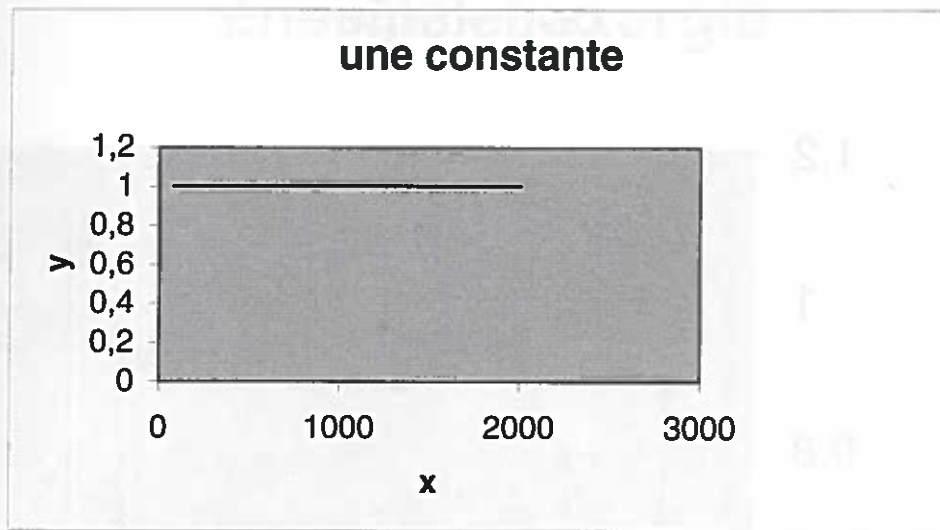


Figure 2 : La constante, un univers plat, le principe de conservation de l'énergie

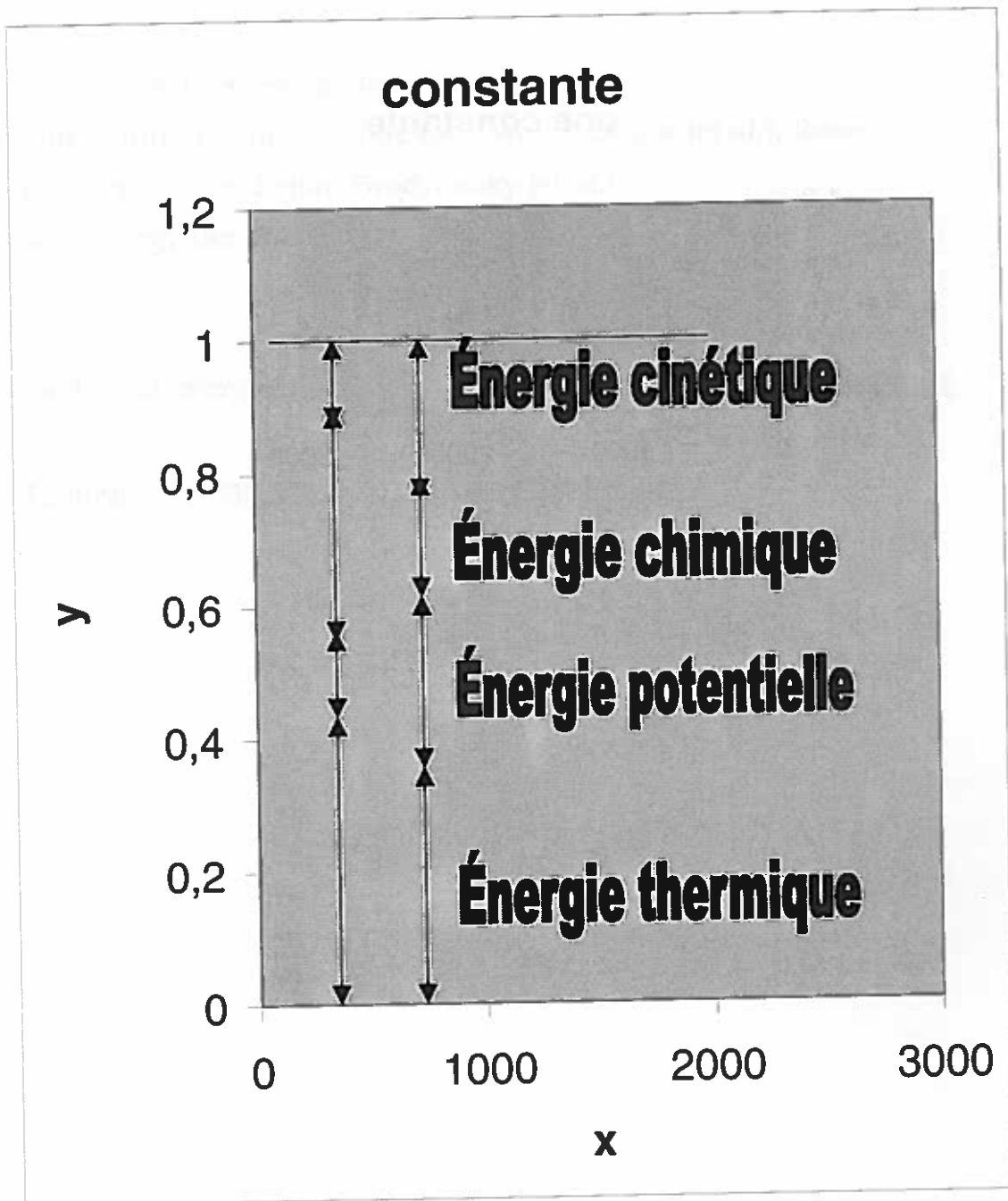


Figure 3 : L'exergie, un univers courbe

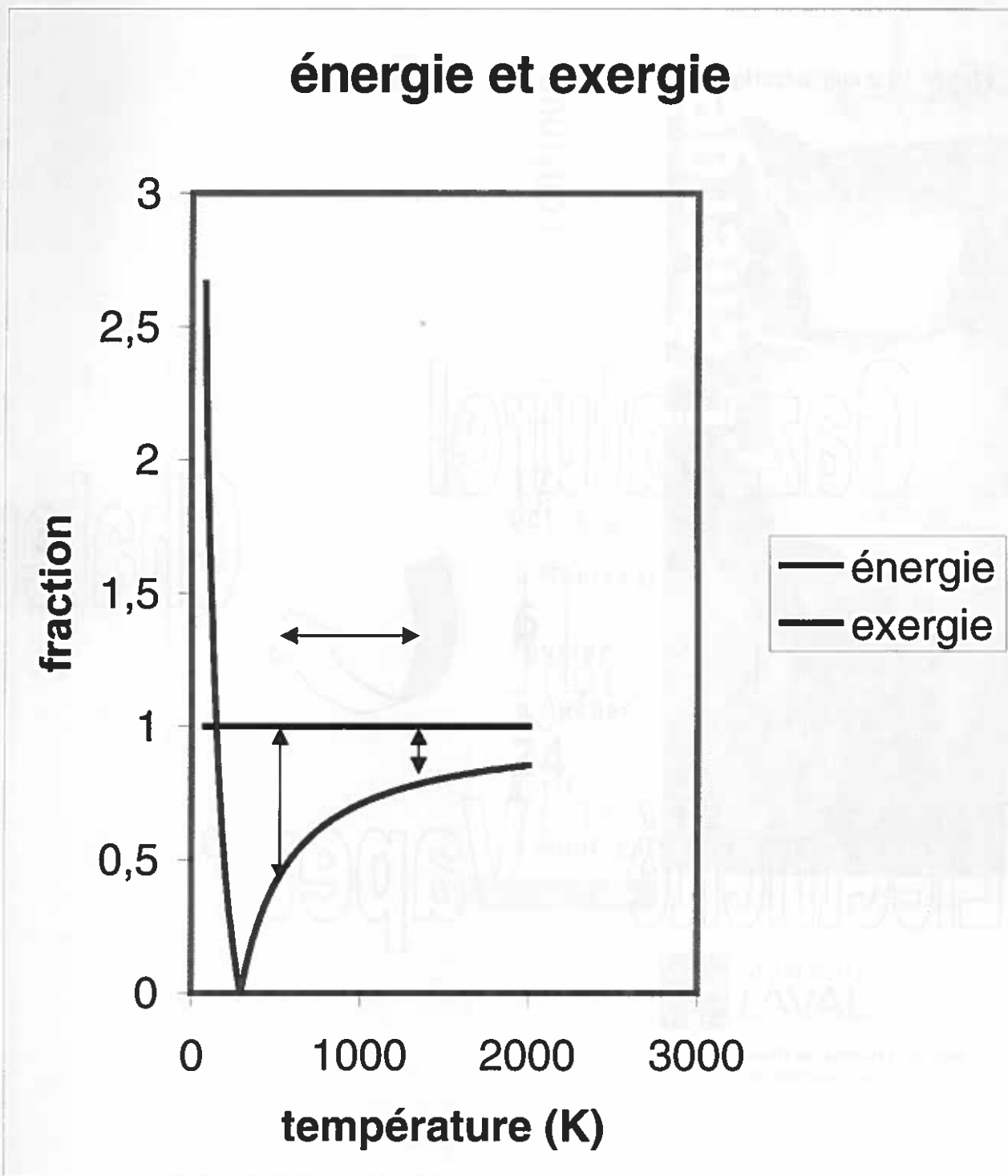
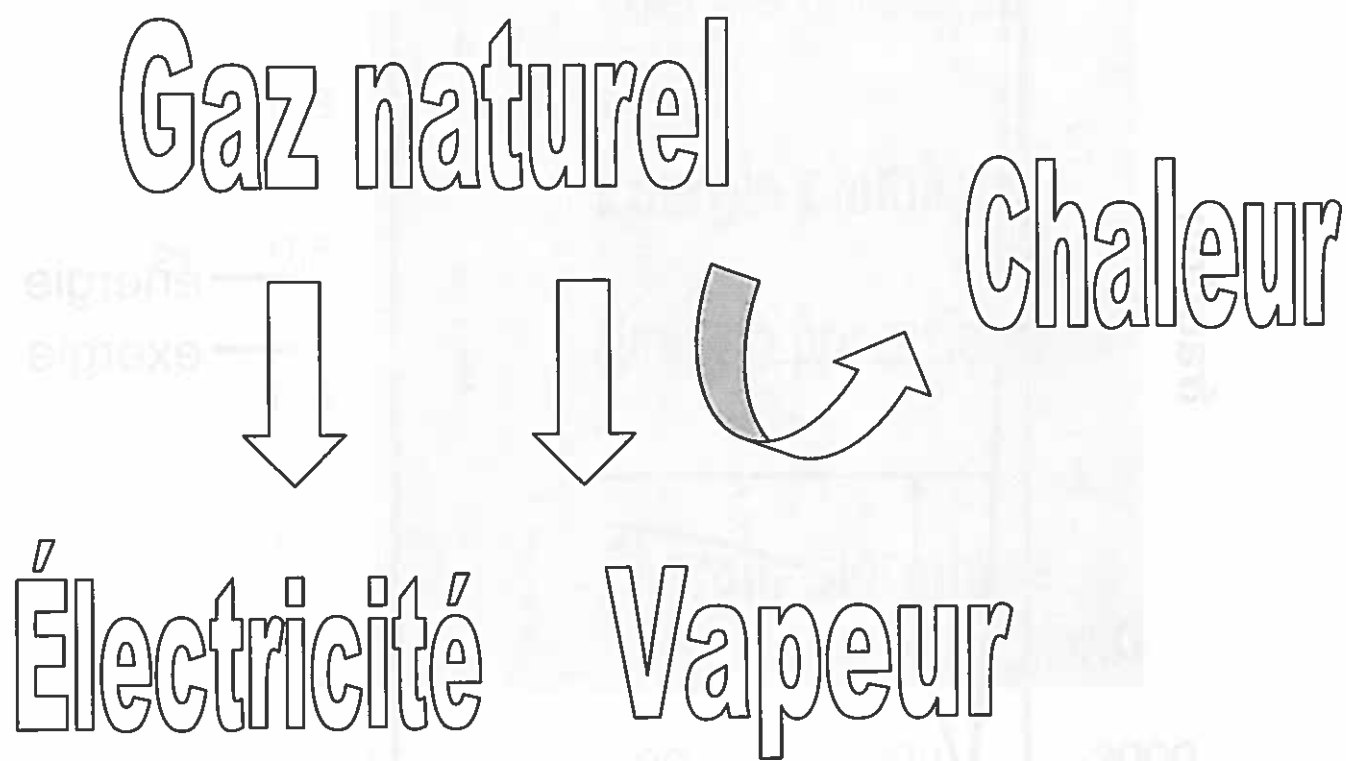


Figure 4 La cogénération



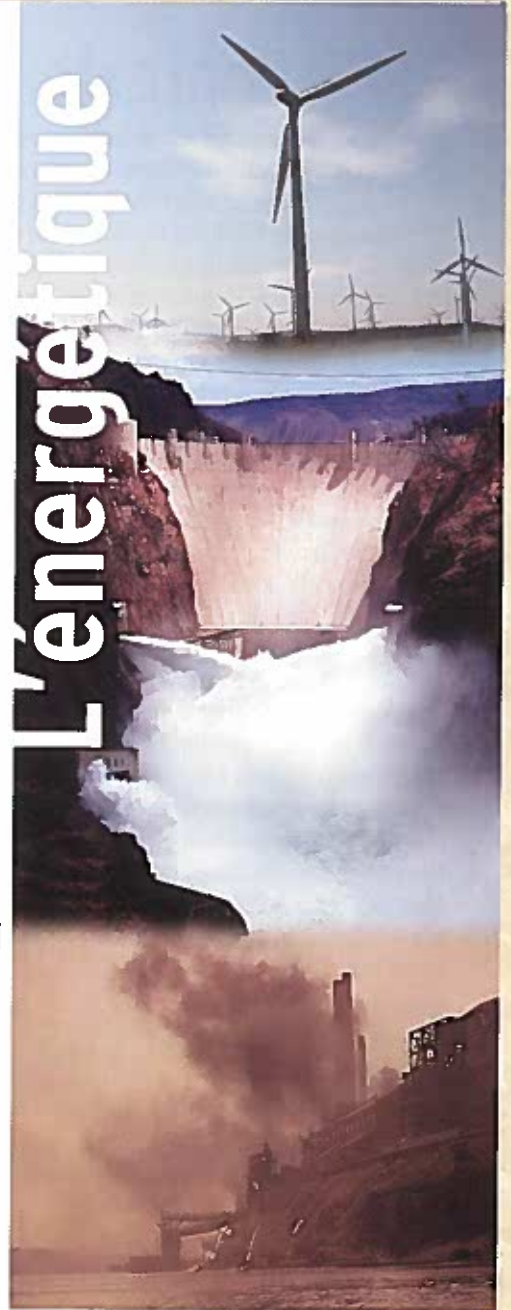
Formation continue

17
octobre
2005
à Montréal

6
février
2006
à Québec

24
avril
2006
à Montréal

L'énergie



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Formation continue



Contexte

L'énergie est un sujet qui défraye les manchètes quotidiennement ; que ce soit le pétrole, les énergies renouvelables ou les sources

d'énergie du futur l'information ne manque pas. De plus, toutes sortes de moyens sont proposés pour réduire notre consommation d'énergie ou réduire les gaz à effet de serre : des ampoules « efficaces », de l'éthanol comme carburant, de l'hydrogène, etc.

A partir de cette avalanche d'informations il est souvent difficile, tant pour les néophytes que ceux qui possèdent des connaissances partielles, de s'y retrouver. L'énergétique (les sciences de l'énergie) permet de fixer un cadre analytique à tout problème ou situation où l'énergie est en cause. À partir d'une telle approche méthodique il est possible de déterminer à l'avance quels seront les effets des modifications proposées évitant ainsi des coûts de réalisation inutiles ou la recherche de gains imaginaires. Cette formation d'une journée permet d'explorer le monde de l'énergétique et les cadres analytiques qui la compose, de l'origine de cette science aux méthodes actuelles les plus sophistiquées. Cette formation met l'accent sur la compréhension de l'énergétique à partir des principes fondamentaux d'une manière simple (en utilisant principalement les notions de travail et de chaleur) et par l'étude de cas. Malgré ces simplifications, les théories les plus complexes sont abordées (ex : l'analyse exergetique). Cette formation apporte à la fois un regard nouveau et ancien sur les sciences de l'énergie et leur relation avec la société.



Objectifs

Après cette formation le participant :

1. Connaîtra les principes fondamentaux de l'énergétique, leur origine et leur champ d'application.
2. Connaîtra les modèles énergétique soit l'exergie et l'énergie et leur utilité.
3. Sera en mesure de comprendre les notions de base en efficacité tant énergétique qu'exergetique.
4. Connaîtra certaines méthodes de base pour l'analyse de problème à caractère énergétique par la définition de système d'analyse.
5. Connaîtra les limites que la thermodynamique impose aux possibilités technologiques.
6. Aura les connaissances de base pour comprendre les enjeux énergétiques à partir de notions scientifiques.



Clientèle

Cette formation s'adresse à tous ceux qui se préoccupent d'énergie, que ce soit des enseignants, des environnementalistes, des gestionnaires ou des ingénieurs. Tous ceux qui désirent comprendre les fondements de l'énergétique et les limites qu'elle impose aux possibilités technologiques y trouveront un intérêt. Pour les spécialistes de l'énergétique qui ont peu ou pas exploré l'analyse exergetique cette formation permet d'en explorer les fondements et les applications.

Contenu du cours

Ce cours d'une journée couvre en matinée la théorie de base et en après-midi les études de cas et une introduction aux théories avancées.

Matinée

Les fondements de l'énergétique

- Notions de physique : la mécanique
- Notions de température, de force, de mouvement, de chaleur et de travail
- Les expériences fondamentales en énergétiques et les modèles qui en sont issus
- Les mouvements ordonnés et désordonnés, la machine à orienter le mouvement (explication vulgarisée du principe de Carnot) ; impossibilité du mouvement perpétuel
- Déduction des principes de l'énergétique (équivalence chaleur) et de l'exergetique (équivalence travail)
- Unités de mesure de l'énergie et de l'exergie : signification
- Notion de masse thermique
- Le froid, une forme d'énergie ?
- Questions et discussions

Méthodes d'analyses

- Comment aborder un problème énergétique : définition d'un système à analyser et son importance sur les résultats (exemple de l'ampoule électrique « efficace »).
- L'efficacité énergétique et exergetique : l'efficacité n'est qu'un paramètre
- Comptabilité énergétique et exergetique
- Améliorations de systèmes : ajout ou retrait de technologies ; systèmes en série (ex : électricité-hydrogène-chauffage) et systèmes en parallèle (ex : chauffage solaire passif et électricité)
- Questions et discussions



Responsable pédagogique

Richard Berthiaume effectue des recherches en thermodynamique appliquée aux études environnementales depuis 1990. La recherche de liens entre la formation d'ingénieur chimiste et les études environnementales l'on mené de l'entropie à l'analyse exergetique. Il a terminé une maîtrise sur le sujet en 2000, et a publié, en collaboration avec d'autres chercheurs, une méthode d'analyse pouvant être appliquée à l'évaluation des énergies renouvelables.

Après-midi

Études de cas et introduction aux théories avancées

Utilisations de l'énergétique :
importance de la définition du système et champ de validité de l'analyse

- Exemple commun : le cas de l'ampoule dite « efficace » ; effet du contexte ; chauffage en hiver et climatisation en été
- Analyse du cas du chauffage d'une maison
- Exergie en fonction de la température extérieure
- La plinthe électrique : rendement de 100 % ?
- Masse thermique (utilité)
- La pompe à chaleur : machine de Carnot « inversée »
- Introduction à l'analyse de procédés plus complexes : conversion de l'exergie
- Questions et discussions

La comptabilité exergetique :

études des ressources renouvelables et non renouvelables

- Notions de base de comptabilité exergetique et leur importance ; définition scientifique de ressources renouvelables et non-renouvelables, analyse de cycle de vie
- Les prix de l'énergie : lien avec l'analyse exergetique (équivalent chaleur et équivalent travail).
- Questionnement sur l'avenir : l'hydrogène les biocarburants, notion de vecteur d'énergie
- Énergétique et réduction des gaz à effet de serre
- Synthèse de la journée