

Quel rendement sur notre investissement énergétique ?

Réalisé par

Patrick Déry, B.Sc, M.Sc. (physique)
Analyste/consultant, spécialiste en énergétique,
agriculture et environnement

Pour

**Conseil régional de l'environnement et du
développement durable (CREDD)**, Saguenay—Lac-Saint-Jean

Groupe de recherches écologiques de La Baie (GREB)

Février 2008

Partenaires financiers



Sommaire

Sommaire	2
Note	2
Remerciements	2
Avertissement	2
Présentation des organisations	3
Introduction	4
Quelques concepts et définitions	5
Qu'est-ce que l'énergie.....	5
Les lois de la thermodynamique.....	6
Premier principe	6
Second principe.....	6
Exergie	6
Qualité de l'énergie.....	6
Densité énergétique.....	7
Autres concepts.....	8
Rendement sur l'investissement énergétique et énergie nette.....	8
L'énergie nette de différentes sources d'énergie	11
Classement des filières selon l'énergie nette	15
Un outil de discrimination des sources d'énergie	17
Conclusion	19

Note

Le présent rapport est le troisième d'une série de cinq sur l'énergétique au Saguenay—Lac-Saint-Jean. Les trois premiers rapports concernent des concepts importants de l'énergétique que sont la substitution énergétique, l'économie d'énergie et le rendement énergétique. Le quatrième aborde l'énergétique aux niveaux mondial et québécois. Le dernier rapport met l'accent sur la situation régionale face à la question énergétique.

Remerciements

L'auteur tient à remercier tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce rapport.

Avertissement

Les commentaires ou opinions exprimés dans ce rapport ne représentent pas nécessairement les positions du Conseil régional de l'environnement et du développement durable (CREDD), du Groupe de recherches écologiques de La Baie (GREB), du Regroupement action jeunesse (RAJ-02) et du Secrétariat à la Jeunesse (SAJ); elles constituent des observations et affirmations personnelles de l'auteur. Les graphiques, tableaux ou toute autre partie de ce rapport peuvent être utilisés à condition de mentionner l'auteur.

Présentation des organisations

Conseil régional de l'environnement et du développement durable (CREDD) du Saguenay—Lac-Saint-Jean

Organisme à but non-lucratif dont les mandats sont :

- Regrouper et représenter des organismes ou groupes environnementaux ainsi que des organismes publics ou privés, des entreprises, des associations et des individus intéressés par la protection de l'environnement et par la promotion du développement durable d'une région, auprès de toutes les instances concernées et de la population en général;
- Favoriser la concertation et les échanges avec les organisations de la région et assurer l'établissement de priorités et de suivis en matière d'environnement dans une perspective de développement durable;
- Favoriser et promouvoir des stratégies d'actions concertées en vue d'apporter des solutions aux problèmes environnementaux et participer au développement durable de la région (par de la sensibilisation, de la formation, de l'éducation et d'autres types d'action);
- Agir à titre d'organisme ressource au service des intervenants régionaux oeuvrant dans le domaine de l'environnement et du développement durable;
- Réaliser des projets découlant du plan d'action du CRE;
- Favoriser par la concertation et, par le partage d'expertises, la mise sur pied de projets par le milieu (organismes, groupes ou individus);
- Collaborer d'un commun accord aux projets déjà pris en charge par le milieu (organismes, groupes ou individus).

Groupe de recherches écologiques de La Baie (GREB)

Organisme à but non-lucratif dont la mission est :

- Favoriser l'essor d'un mode de vie écologiquement, socialement et économiquement viable dans la perspective d'une occupation et d'un développement territoriaux rationnels et ce, selon trois axes d'intervention : recherche, expérimentation, éducation et action civique.

Introduction

Nous vivons dans un univers où l'énergie est essentielle à tous les processus. Elle est présente partout, que se soit dans la matière (par la fameuse équation d'Einstein $E=mc^2$ qui lie matière et énergie), dans le mouvement (révolution des astres les uns par rapport aux autres ou des particules dans un fluide, par exemple) ou dans le rayonnement (lumière, radiation nucléaire ou rayonnement fossile du Big Bang, par exemple).

En physique, les lois, contrairement aux théories ou aux hypothèses, doivent être vraies, universelles, simples, absolues, stables et omnipotentes; des exigences qui rendent celles-ci très rares. Les transformations énergétiques sont régies par des lois appelées lois de la thermodynamique. Qui n'a pas déjà entendu l'expression «Rien ne se perd, rien ne se crée»¹? Cette affirmation est l'idée principale de la première loi de la thermodynamique. Ces lois nous enseignent que pour extraire de l'énergie d'une source quelconque, nous devons dégrader la «qualité» d'une certaine quantité d'énergie qui, de ce fait, perd ainsi de ses qualités. Par exemple, en géothermie, pour extraire la chaleur du sol (énergie de basse qualité), il est nécessaire de dégrader de l'électricité (énergie de haute qualité). L'électricité se transforme ainsi en chaleur à basse température dont la qualité énergétique est inférieure.

À un moment donné, la qualité de l'énergie devient si basse ou sa dissipation si importante dans l'environnement qu'il est impossible de l'utiliser pour un quelconque travail utile à l'être humain. La transformation devient alors pratiquement irréversible : elle génère de l'entropie².

L'extraction d'une source d'énergie nécessite donc d'utiliser de l'énergie provenant de cette même source ou d'une source différente. Or, une fois que de l'énergie est extraite, et pour que celle-ci puisse effectuer un certain travail³, elle doit être d'une qualité suffisante. Cela nous permet d'introduire le concept de rendement sur l'investissement énergétique. Ce concept, semblable à celui du rendement sur l'investissement financier, nous informe si une source potentielle d'énergie permet ou non d'extraire une quantité d'énergie supérieure à celle utilisée pour son extraction.

Dans ce troisième volet sur l'énergétique régionale du Saguenay—Lac-Saint-Jean, nous mettons en évidence l'importance de l'évaluation de l'énergie nette dans le choix et l'usage des filières énergétiques. Celle-ci se révèle cruciale dans un contexte de resserrement des approvisionnements énergétiques comme celui dont nous commençons à entrevoir les premiers signes⁴. Il importe donc de bien comprendre

¹ Anaxagore de Clazomènes, Les homoéméries et le Nous, V^{ème} siècle avant J.C.

² Grandeur, qui en thermodynamique, permet d'évaluer la dégradation de l'énergie d'un système. L'entropie d'un système caractérise son degré de désordre.

³ Dans le sens physique. Par exemple, un réfrigérateur fait le travail de produire du froid.

⁴ Robert L. Hirsch, Peaking of world oil production: Recent forecasts, DOE NETL. April 2007. National Petroleum Council (US), Facing The Hard Truths About Energy, July 2007.

ces concepts de rendement sur l'investissement énergétique et d'énergie nette et de les utiliser lors de l'élaboration de politiques énergétiques.

Contrairement aux deux précédents volets, celui-ci ne comporte pas de démonstrations car elles auraient nécessité des moyens hors de proportion.

Quelques concepts et définitions

Qu'est-ce que l'énergie

L'énergie est une grandeur caractérisant un système et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels elle entre en interaction. Dans le sens commun, l'énergie désigne donc tout ce qui permet d'effectuer un travail, fabriquer de la chaleur, de la lumière ou de produire un mouvement.

L'énergie doit être considérée comme une grandeur numérique clairement définie, et, en aucun cas comme un fluide ou une substance⁵.

Aussi, l'énergie englobe toutes les formes et toutes les sources. C'est donc bien davantage que l'électricité. Souvent, au Québec, il existe une confusion entre énergie et électricité, dû à notre usage important de cette dernière, qui ne représente pourtant que 38 % de l'énergie consommée. De plus, toute l'électricité ne découle pas de source hydraulique : environ 6% provient d'autres sources (centrale nucléaire Gentilly-2, parcs éolien, centrale au mazout de Sorel-Tracy...) . En somme, l'hydroélectricité ne réussit à combler qu'environ le tiers de notre consommation énergétique. En ce qui concerne la part d'énergie qui provient des sources non-renouvelables, elle représente plus de la moitié de l'énergie totale consommée au Québec⁶.

Government Accountability Office, CRUDE OIL: Uncertainty about Future Oil Supply Makes It Important to Develop a Strategy for Addressing a Peak and Decline in Oil Production, February 2007.

Agence internationale de l'énergie, Medium Term Oil Market Report, July 2007.

World Energy Council, Survey of Energy Resources 2007, september 2007.

Energy Watch Group, Uranium resources and nuclear energy, December 2006 EWG-Series No 1/2006

Energy Watch Group, Coal: Resources and Future Production, April, 2007.

Energy Watch Group, Crude Oil: The Supply Outlook, October 2007.

Robelius, F. 2007. Giant Oil Fields -The Highway to Oil. Giant Oil Fields and their Importance for Future Oil Production. Acta Universitatis Upsaliensis. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* . 168 pp. Uppsala.

Darley, Julian, High noon for natural gas: the new energy crisis, Chelsea Green, 2004.

⁵ Comme les courants ésotériques la conçoivent, par exemple.

⁶ Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, L'énergie au Québec 2004. www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/energie/energie/energie-au-quebec-2004.pdf

Les lois de la thermodynamique

Les lois de la thermodynamique caractérisent les transformations énergétiques pour toutes les théories physiques (mécanique, électromagnétisme, physique nucléaire, etc.). On ne leur a jamais trouvé la moindre exception.

Premier principe

- L'énergie est toujours conservée. L'énergie totale d'un système parfaitement isolé reste constante.
- L'énergie peut se transmettre d'un système à un autre.
- On ne crée pas l'énergie, on la transforme de certaines formes d'énergie en d'autres formes d'énergie.
- L'énergie ne peut pas être produite du néant. Elle est en quantité invariable dans la nature.

Second principe

- La transformation de l'énergie est irréversible.
- L'entropie d'un système isolé augmente, ou reste constante. Ce concept est associé à l'impossibilité du passage du désordre à l'ordre sans intervention extérieure. L'entropie est la grandeur qui permet d'évaluer la dégradation de l'énergie d'un système.

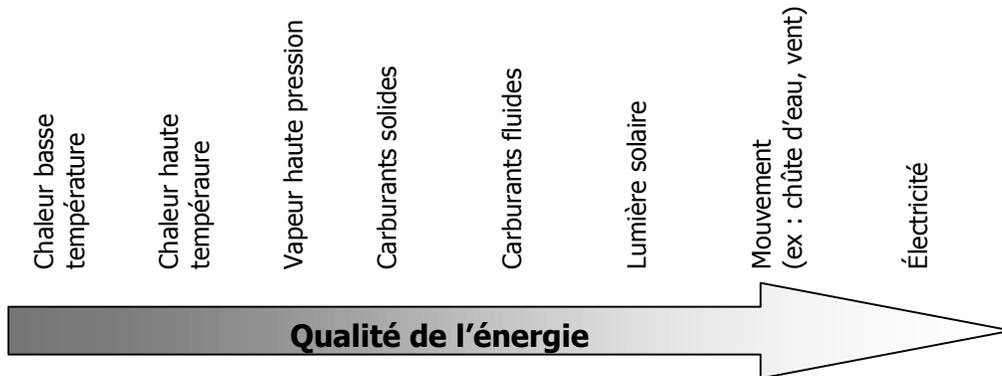
Exergie

- L'exergie est la mesure de la quantité d'énergie qui est disponible pour faire un travail utile à l'humain.
- L'exergie, contrairement à l'énergie, est détruite au fur et à mesure de la dégradation de la qualité de l'énergie utilisée (augmentation de l'entropie).

Qualité de l'énergie

La **qualité de l'énergie** se définit par la propension d'une forme d'énergie à se transformer en une autre forme. Par exemple, on peut dire que l'électricité possède, au plan énergétique, une qualité supérieure à celle de la chaleur à basse température car elle se convertit facilement en chaleur à basse température avec un rendement de 100% alors que la chaleur à basse température peut très difficilement se convertir en électricité. Lorsque cela se produit, les rendements sont très faibles, soit de quelques points de pourcentage. La figure suivante exprime de manière visuelle la qualité de différentes formes d'énergie⁷.

⁷ Adaptation des travaux de T. Ohta, *Energy Technology : Sources, Systems and Frontier Conversion*, Pergamon, Elsevier, Great Britain, 1994.



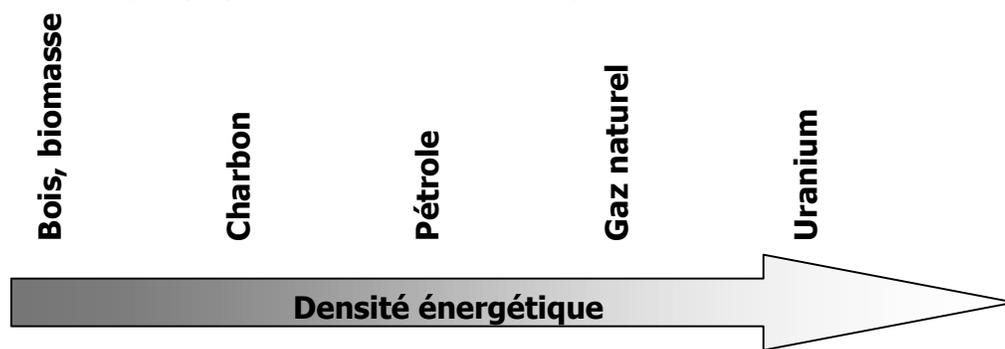
Densité énergétique

La **densité énergétique** est la quantité d'énergie que peut libérer une forme de stockage énergétique en fonction de son poids (densité gravimétrique) ou de son volume (densité volumique).

Depuis les débuts de l'humanité, les êtres humains ont surtout compté sur l'énergie endosomatique (provenant de l'intérieur du corps : humain, animaux) et, en moindre importance sur l'énergie renouvelable exosomatique (provenant de l'extérieur du corps). Mais avec l'ère industrielle, le rapport s'est inversé. De plus, le type de sources est passé de renouvelables (bois, vent, soleil) à non-renouvelables (charbon, pétrole...).

De nos jours, nous comptons presque exclusivement sur l'énergie exosomatique de sources non-renouvelables. Concernant ce type d'énergie, la progression des sources pouvant stocker de l'énergie s'est faite des sources d'énergie les moins denses énergétiquement aux plus denses⁸.

Or, depuis quelques années, on voit apparaître, dans les parts de marché de l'énergie, un retour en force des sources les moins denses (biomasse et charbon entre autre). Cela indique qu'il est fort probable que la croissance de l'extraction des sources ayant une densité énergétique supérieure ait atteint actuellement son maximum. La figure suivante exprime de manière visuelle la densité de différentes sources d'énergie qui peuvent stocker de l'énergie.



⁸ Cutler Cleveland, *Energy transitions past and future*, The Oil Drum, 8 août 2007.

Autres concepts

Bien d'autres concepts pourraient contribuer à expliquer la complexe question des systèmes énergétiques, mais ceux qui ont été précédemment définis suffisent aux objectifs poursuivis dans ce rapport. Ajoutons toutefois celui d'«Emergy» développé par H.T. Odum⁹ et D.M. Scienceman. Ce concept est principalement utilisé dans l'étude de la dynamique des systèmes et représente la mesure de l'énergie disponible qui a déjà été utilisée (dégradée durant les transformations) d'un produit transformé; produit qui peut être physique (matériau, énergie...) mais qui peut aussi être immatériel (information).

Rendement sur l'investissement énergétique et énergie nette

Selon les concepts et définitions discutés dans la section précédente, l'énergie ne peut pas être extraite sans une dépense d'énergie. Les lois physiques nous obligent à consacrer une certaine quantité d'énergie dans l'utilisation des équipements ou dans la fabrication de ceux-ci pour qu'une quantité plus grande d'énergie soit produite et serve au travail auquel on la destine. La question fondamentale est donc de connaître la quantité d'énergie nécessaire à investir dans une source potentielle pour qu'en bout de ligne on en obtienne pour les usages autres que la production d'énergie.

Nous voulons alors connaître le rendement que nous obtenons par rapport à l'investissement énergétique fourni. Ce concept est semblable à celui utilisé en finance, le ROI (return on investment ou retour sur l'investissement), mais en utilisant l'énergie plutôt que la monnaie.

⁹ H.T.Odum, Energy Values of Water Sources, 19th Southern Water Resources and Pollution Control Conference, 1970.

H.T.Odum, Embodied Energy, Foreign Trade, and Welfare of Nations, A-M. Jansson (ed.) Integration of Economy and Ecology - An Outlook for the Eighties, 1984.

H.T.Odum, Ecosystem Theory and Application, Wiley, New York, 1986.

H.T.Odum, Self-Organization, Transformity, and Information, Science, Vol. 242, pp. 1132-1139, 1988.

H.T.Odum, Self-Organization and Maximum Empower, C.A.S.Hall (ed.) Maximum Power; The Ideas and Applications of H.T.Odum, Colorado University Press, Colorado, pp. 311-330, 1995.

H.T.Odum, Emergy: Policies for a New World Order, H.Abele (ed.) Energy and Environment; A question of Survival, Verlag Stiftsdruckerei, Switzerland, 1995.

H.T.Odum, Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making, Wiley, 1996.

H.T.Odum, Letter to the Editor, Ecological Engineering, 9, 215-216, 1997.

H.T.Odum, Material circulation, energy hierarchy, and building construction,

C.J.Kibert, J.Sendzimir, and G.B.Guy (eds) Construction Ecology; Nature as the basis for green buildings, Spon Press, New York, 2002.

H.T.Odum et E.C.Odum, Emergy Analysis Overview of Nations, Working Paper, WP-83-

82. Laxenburg, Austria: International Institute of Applied System Analysis. 469 pp. (CFW-83-21), 1983.

H.T.Odum et E.C.Odum, A Prosperous way Down: Principles and Policies, Colorado University Press, Colorado, 2001.

Le **rendement sur l'investissement énergétique –RIE-** (energy profit ratio ou Energy return on energy invested – EROEI - en anglais) se définit donc comme le rapport suivant¹⁰ :

$$\text{RIE} = \frac{\text{Somme de l'énergie produite par la source durant sa durée de vie}}{\text{Somme de l'énergie consommée pour extraire l'énergie de cette source}} \\ \text{(incluant la fabrication, l'installation, l'énergie intrinsèque des matériaux...)}$$

Pour faciliter la compréhension, on utilise aussi le concept d'**énergie nette** (net energy en anglais) qui est :

$$\text{Énergie nette} = \text{RIE} - 1$$

Une valeur égale à 0 équivaut à consommer autant d'énergie dans l'extraction de la source que celle-ci en fournit. Si la valeur de l'énergie nette est négative, la source consomme plus d'énergie qu'elle n'en produit. Si la valeur est positive, elle en produit plus qu'elle n'en consomme.

Un autre concept lié est le **temps de remboursement énergétique** (energy payback time en anglais) qui est le temps que prend un équipement de production d'énergie pour «rembourser» l'énergie employée à sa fabrication, son installation et son usage.

Prenons un exemple pour illustrer ces concepts.

Un panneau solaire, d'une durée de vie de 25 ans, qui produirait 250 kWh par année et qui aurait nécessité une énergie 1000 kWh pour sa fabrication et son installation.

Le temps de remboursement énergétique (TRE) de ce panneau serait de 4 ans.

$$\text{TRE} = \frac{1000 \text{ kWh}}{250 \text{ kWh}} = 4 \text{ ans}$$

¹⁰ Cutler Cleveland, Energy Return on Investment (EROI), Encyclopædia of Earth, December 2006.

Son rendement sur l'investissement énergétique (RIE) serait de 6,25 et son énergie nette (EN) serait de 5,25.

$$\text{RIE} = \frac{250 \text{ kWh} \times 25 \text{ ans}}{1000 \text{ kWh}} = 6,25$$

$$\text{EN} = \text{RIE} - 1 = 5,25$$

Ces ratios nous informent sur le potentiel d'une source à produire réellement de l'énergie pour accomplir un travail utile à l'être humain. Toutefois, il est très difficile de calculer ces valeurs, car les facteurs considérés dans l'évaluation de ces ratios peuvent varier grandement. Une approche par l'analyse des cycles de vie est celle qui apporte le plus de précision, mais nécessite le plus d'efforts. Elle considère l'ensemble de l'énergie consommée depuis le début, le «berceau», jusqu'à celle nécessaire à la destruction des installations de production, le «tombeau» (en incluant la gestion des déchets jusqu'à leur intégration dans les systèmes écologiques, industriels ou autres).

Nous verrons dans la prochaine section les valeurs calculées pour différentes sources potentielles et actuelles d'énergie.

L'énergie nette de différentes sources d'énergie

Dans cette section, nous avons résumé les valeurs d'énergie nette de différentes sources d'énergie. Nous avons indiqué sur les tableaux les valeurs minimales et maximales ainsi qu'une estimation de l'énergie nette moyenne de ces sources¹¹. Nous avons aussi indiqué les utilisations énergétiques principales de celles-ci.

Tableau 1 : Énergie nette (E.N.) des sources non-renouvelables

Provenance	E.N. Min.	E.N. Est.	E.N. Max.	Utilisations principales
Pétrole Sable bitumineux	5 <0	~17 ~1	20 2	Carburant, chaleur, électricité
Gaz naturel	2	~10	25	Chaleur, électricité, carburant
Charbon	2	~15	80	Chaleur, électricité, carburant
Nucléaire (fission)	<0	Négatif? ¹²	60	Électricité

¹¹ Cutler J. Cleveland et al., Energy and US Economy : A Biophysical Perspective, Science, New Series, 225, No. 4665, 1984.

Roel Hammerschlag, Ethanol's Energy Return on Investment: A Survey of the literature 1990-Present, Environ. Scie. Technol. 40, 1744-1750, 2006.

Luc Gagnon, Comparaison des options de production d'électricité, rendement de l'investissement énergétique, Hydro-Québec, avril 2000.

Luc Gagnon, Comparaison des options de production d'électricité, rendement de l'investissement énergétique, Hydro-Québec, mai 2005.

Erik Anselma, Energy Payback Time and CO2 Emissions of Photovoltaic Systems, Elsevier, 2003.

World Nuclear Association, Energy Analysis of Power Systems, UIC Nuclear Issues Briefing Paper #57, march 2006.

Ida Kubiszewski and al., Energy Return on Investment (EROI) for wind energy, Encyclopedia of Earth, January 2007.

Energoclub, EROEI, il concetto di convenienza energetica, november 2007.

Dana Visalli, It Takes Energy to Get Energy, Conserve Magazine, April 2007.

Ugo Bardi, Il conto in banca dell'energia : il ritorno energetico sull'investimento energetico (EROEI), ASPO-Italia, Février 2005.

Nate Hagens, A Net Energy Parable: Why EroEI is So Important?, Oil Drum, August 2006.

Hugh Outhred, Nuclear Power: Magic Lantern or Pandora's Box?, AIE Symposium: Nuclear Power for Australia, June 2005.

Daigee Shaw, Challenges for Renewable Energy Development Policies, 2006.

Jeff Rubin, Fueling Inflation, CIBC World Market, Strategecon, October 2007.

R. Phillips and al., Micro-Wind Turbines in Urban Environments: an assessment, Building Research Establishment, november 2007.

Van Leeuwen, JWS, Factsheet #4: Energy Security and Uranium Reserves, Oxford Research Group, July 2006.

Paul Gipe, Energy Balance of Wind Turbines, Wind-Work, November 2006.

La Capra Associates, Net Energy Analysis, Connecticut Energy Advisory Board, November 2007.

World Nuclear Association, Nuclear Electricity, 7th Ed., 2003.

Ron Swanson, Peak Oil, Climate Recovery and Renewable Energy, ASES Forum, July 2006.

¹² David Fleming, The Lean Guide To Nuclear Energy : A Life-Cycle in Trouble, The Lean Economy Connection, November 2007.

Les valeurs minimales se caractérisent habituellement par la transformation en électricité de ces sources d'énergie tandis que les maximales par une transformation en chaleur, comme pour le chauffage de bâtiments, par exemple. Les distances de transport entre la zone d'extraction et le lieu de consommation affectent de façon importante la valeur de l'énergie nette.

La valeur de l'énergie nette moyenne du nucléaire est très difficile à établir car il est nécessaire d'intégrer l'énergie nécessaire à la gestion sécuritaire des déchets radioactifs passés, présents et à venir. Or leur durée est si longue, se chiffrant à plusieurs milliers d'années, que l'énergie cumulative nécessaire à cette gestion pourrait dépasser la production totale d'énergie de cette filière¹³. Les informations sont si contradictoires (sur la quantité d'énergie nécessaire à la disposition à long terme des déchets, par exemple) que nous n'avons pas attribué de valeur moyenne à cette filière.

Tableau 2 : Énergie nette (E.N.) des sources renouvelables

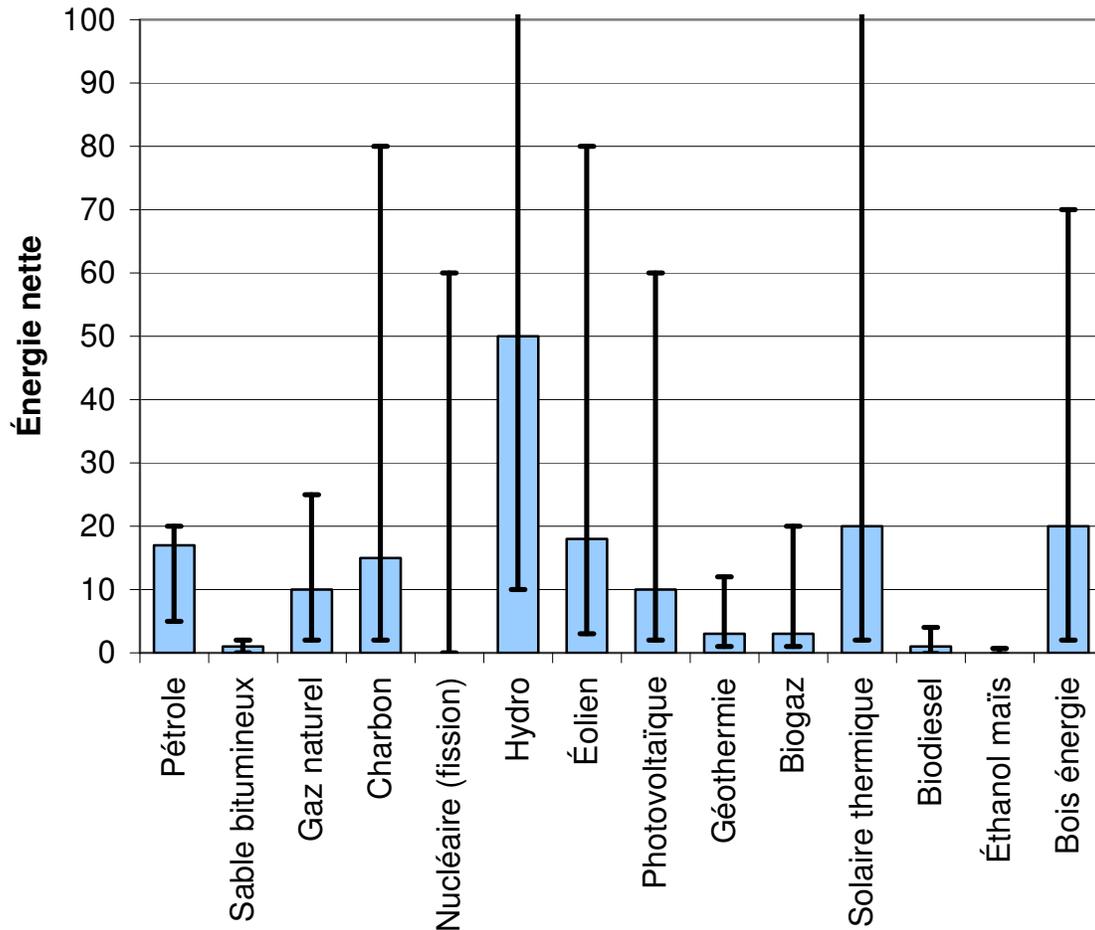
Provenance	E.N. Min.	E.N. Est.	E.N. Max.	Références
Hydroélectricité	10	50+	280	Électricité
Solaire thermique	2	20	200	Chaleur, électricité
Bois énergie	2	20	70	Chaleur, électricité, carburant
Éolien	3	18	80	Électricité
Photovoltaïque	2	10	60	Électricité
Géothermie	1	3	12	Chaleur
Biogaz	1	3	20	Chaleur, électricité, carburant
Biodiesel	-0,1	1	4	Carburant, chaleur, électricité
Éthanol maïs	-0,15	~0	0,7	Carburant, chaleur, électricité

Les valeurs minimales d'énergie nette sont, comme pour les sources non-renouvelables, souvent reliées à la production d'électricité par des sources combustibles. Les valeurs maximales correspondent habituellement à une utilisation plus judicieuse des sources. Le rapport élevé du solaire thermique correspond à l'utilisation optimale de l'énergie solaire passive. La distance entre le lieu de

¹³ Id.

production et le lieu de consommation affecte grandement la valeur de l'énergie nette.

Énergie nette de différentes sources d'énergie



On peut constater que la valeur d'énergie nette pour une même source est très variable, pour ne pas dire extrêmement variable. Cela s'explique par le très grand nombre de facteurs plus ou moins quantitatifs ainsi que des conditions d'application de la technologie étudiée. L'usage de la source est aussi très important. Une source qui produit une chaleur à une température relativement basse, comme la biomasse forestière, par exemple, aura une valeur d'énergie nette plus importante si la chaleur est utilisée directement pour le chauffage, en l'occurrence des bâtiments, que si elle est utilisée pour générer de l'électricité.

Malgré ces variations, il est quand même possible, avec les informations dont nous disposons, de dégager des grandes lignes à propos des sources d'énergie qui représentent un potentiel intéressant.

Les sources non-renouvelables d'énergie ont des valeurs d'énergie nette en décroissance constante depuis le début de leur exploitation. Dans le cas du pétrole, par exemple, cette valeur était d'environ 100 dans les années 1930. C'est sur cette base que s'est édifiée la société dans laquelle nous vivons, c'est-à-dire une société qui libère 97 à 99% de ses citoyens de la tâche de produire de l'énergie endosomatique (agriculture, chasse-cueillette).

Dans les années 1970, l'énergie nette du pétrole est passée à environ 40. Aujourd'hui, pour le pétrole dit conventionnel, on estime que la valeur d'énergie nette se situe maintenant entre 15 et 20. Quant aux sables bitumineux, considérés par certains comme une source de remplacement du pétrole conventionnel, leur valeur d'énergie nette est évaluée entre 1 et 2. Cela veut dire que 35 à 50 % de l'énergie provenant des sables bitumineux doit retourner à l'extraction de ceux-ci. Leur énergie nette est si faible qu'il est fort improbable qu'une société industrialisée comme la nôtre ait pu voir le jour si elle avait dû se baser sur cette source.

Le gaz naturel a suivi les traces du pétrole, mais il est hypothéqué par son état gazeux qui rend difficile son transport sur de grandes distances hormis via les gazoducs. Le procédé de liquéfaction/transport/regazéification consomme de 15 à 30% de l'énergie d'origine¹⁴, diminuant ainsi la valeur de l'énergie nette du gaz naturel d'un facteur important. Pour une valeur moyenne de l'énergie nette du gaz naturel au terminal d'expédition de 10, cette valeur tombe entre 6 et 8 à l'entrée du gazoduc du pays consommateur.

Le charbon a suivi une trajectoire semblable, passant de 80 dans les années 1950 à 25 dans les années 1970.

L'extraction d'uranium a débuté d'abord pour les besoins militaires. L'énergie nette du nucléaire est plus difficile à calculer car elle dépend de ce qui est considéré dans les calculs. Il y a une grande variabilité des chiffres et certains, comme mentionné précédemment, vont même jusqu'à prétendre que l'énergie nette de la filière nucléaire est négative si l'on intègre l'énergie nécessaire à la sécurisation passée, présente et à venir de la production des déchets¹⁵.

¹⁴ J. David Hughes, *Natural Gas in North America: Should We be Worried?*, Geological Survey of Canada, World Oil Conference, ASPO – USA, Boston, Massachusetts, October 26, 2006
Darley, Julian, *High noon for natural gas: the new energy crisis*, Chelsea Green, 2004.

¹⁵ David Fleming, *The Lean Guide To Nuclear Energy : A Life-Cycle in Trouble*, The Lean Economy Connection, November 2007.

Classement des filières selon l'énergie nette

Notre territoire étant très pauvre en ressources énergétiques non-renouvelables, nous n'avons considéré que les sources que nous avons la possibilité de mettre en production et qui peuvent être renouvelables. Les sources les plus intéressantes du point de vue de l'énergie nette sont donc, par ordre d'importance :

- 1- **L'hydroélectricité** : La grande hydroélectricité avec réservoir a une énergie nette semblable à celle de l'hydroélectricité au fil de l'eau. De même, la petite hydroélectricité (mini, micro, pico), quoique qu'ayant une énergie nette plus faible que la grande, est très intéressante de ce point de vue ($\sim 30^{16}$).
- 2- **La biomasse forestière** : La cogénération à partir de la biomasse forestière peut être intéressante en autant que l'utilisateur soit d'abord un consommateur de chaleur et non principalement d'électricité. Cette dernière peut toutefois être un sous-produit de la production de chaleur. L'inverse, électricité d'abord/chaleur ensuite, occasionne des rendements relativement faibles : les pertes d'énergie sont très importantes, pouvant parfois atteindre 65% et plus. La meilleure utilisation de cette filière demeure donc la production directe de chaleur pour le chauffage des bâtiments. Au Québec, une importante quantité d'électricité pourrait être déplacée vers des utilisations plus productives, comme le transport électrifié ou, à la limite, l'exportation, en utilisant la biomasse forestière comme source de chauffage des bâtiments. Pour ce faire, doivent être considérés non seulement les résidus forestiers, mais aussi les arbres inutilisés par l'industrie forestière (feuillus, bois mort, bois brûlé, bois de petites dimensions...) ainsi que la biomasse forestière provenant des forêts de proximité.
- 3- **Le solaire thermique** : Les meilleures valeurs de l'énergie nette de ce type de source s'appliquent au solaire passif. Les coûts énergétiques pour intégrer les éléments solaires dans une construction neuve ou au moment d'une rénovation sont souvent très faibles et parfois même inexistantes (le cas du SolarWall^{MD} est particulièrement intéressant dans le secteur industriel car il s'agit simplement de choisir un revêtement extérieur semblable au point de vue du contenu énergétique à un revêtement classique en métal, mais ayant des propriétés de production d'énergie solaire passive). Un autre exemple est l'orientation des rues et des constructions en fonction du solaire, qui peut diminuer la consommation d'énergie pour le chauffage de 10% à 20%, et ce, uniquement en tenant compte de l'orientation sud des grandes surfaces des constructions¹⁷. Dans une moindre mesure, du point de vue de l'énergie nette, la production d'eau chaude à partir de l'énergie solaire peut être intéressante, à des degrés variables selon les applications (résidentielle,

¹⁶ Ugo Bardi, Il conto in banca dell'energia : il ritorno energetico sull'investimento energetico (EROEI), ASPO-Italia, Février 2005.

David Elliot, A Sustainable Future, in «Before the wells run dry», FEASTA 2003.

¹⁷ Turn to Solar for Lower Heating Costs, Energy Source Builder #42, Iris Communications, December 1995.

commerciale, industrielle...). Il faut noter aussi que cette source est intermittente et ne peut constituer une source de base mais un complément pour réaliser des économies sur la source de base utilisée.

- 4- **L'éolien** : En gros, la valeur de l'énergie nette change en fonction de la dimension de l'éolienne : plus l'éolienne est petite, plus son énergie nette est faible pour un même site. Bien entendu, le fait qu'une grande éolienne soit plus haute (où la vitesse du vent est supérieure et plus constante) qu'une petite participe fortement à la rentabilité énergétique des plus grandes éoliennes. Toutefois, dans les sites où le vent est suffisant, les éoliennes de petite dimension peuvent avoir une valeur d'énergie nette suffisante pour être intéressante. Cette source est intermittente et ne peut fournir une énergie constante que si on y accouple une forme de stockage quelconque (batteries, hydrogène, réservoirs d'eau...).
- 5- **Le photovoltaïque** : L'énergie nette de ce type de production, malgré une valeur plus basse que les sources précédentes, demeure intéressante surtout dans les applications éloignées. Les installations sur des bâtiments existants ont une valeur d'énergie nette supérieure aux installations directement au sol car elles nécessitent moins de support (béton, métaux). Cette source, comme l'éolien, nécessite, en raison de son intermittence, une forme de stockage quelconque pour servir de source principale, ce qui influe sur l'évaluation de l'énergie nette lorsque cela est requis.
- 6- **Autres** : La géothermie (extraction de la chaleur du sol principalement pour le chauffage et la climatisation des bâtiments) ainsi que le biogaz (fermentation de matières putrescibles) ont des valeurs d'énergie nette assez basses en moyenne. La variabilité de la qualité des sources de géothermie ou la distance de transport des sources de matières putrescibles sont des variables qui influencent grandement la valeur de l'énergie nette de ces sources. Toutefois, selon les applications et leurs localisations, ces valeurs peuvent être suffisamment élevées pour justifier leur utilisation de façon assez importante. La géothermie est habituellement un complément à l'utilisation d'une autre source comme l'électricité ou le gaz naturel. Le biodiesel et l'éthanol semblent n'être actuellement que du «blanchiment» de pétrole, mais en tant que carburants liquides, ils pourraient malgré tout avoir certaines applications particulières (machinerie agricole ou forestière, par exemple). Cela à condition que l'énergie (incluse dans les fertilisants, pesticides et carburants) permettant la production de ces carburants ne provienne pas de sources non-renouvelables. Il est clair toutefois que la généralisation de ces carburants engendre de nombreux problèmes non-résolus (compétition pour les sols arables, augmentation des prix de la nourriture, accélération de la perte des éléments fertilisants...) ¹⁸. Il existe

¹⁸ EcoNexus, Biofuelwatch, Carbon Trade Watch (Transnational Institute), Corporate Europe Observatory, Ecologistas en Acción, Ecoropa, Grupo de Reflexión Rural, Munlochy Vigil, NOAH (Friends of the Earth Denmark), Rettet Den Regenwald, Watch Indonesia, [Agrofuels - Towards a reality check in nine key areas](#), June 2007.

aussi d'autres sources d'énergie (marémotrice, courants marins, gradient thermique des océans...) qui pourraient avoir des valeurs d'énergie nette intéressantes, mais les données concernant celles-ci sont actuellement insuffisantes.

Un outil de discrimination des sources d'énergie

L'importance de l'évaluation de l'énergie nette est telle qu'elle peut nous amener à changer complètement notre perception des solutions au plan des approvisionnements énergétiques et des changements climatiques. Sur ce point, des recherches plus approfondies devraient être réalisées quant à certaines «solutions» qui ne sont peut-être que des miroirs aux alouettes. Voici quelques exemples de filières qui devraient être scrupuleusement étudiées quant à leur rendement énergétique:

- 1- **Schistes bitumineux ou asphaltiques** : La valeur de l'énergie nette des schistes bitumineux ou asphaltiques, dont les réserves gigantesques sont perçues comme un remplacement au pétrole conventionnel tout comme les sables bitumineux, est fort probablement négative¹⁹.
- 2- **Gaz naturel liquéfié** : L'effet de la liquéfaction du gaz naturel sur la valeur de l'énergie nette semble à première vue diminuer cette dernière de près de 40%²⁰.
- 3- **Fission nucléaire** : La gestion à long terme des déchets passés, actuels et futurs de l'industrie nucléaire doit être incluse dans les évaluations de l'énergie nette de cette filière. Certains estiment que cette industrie est négative du point de vue énergétique lorsque l'on inclut la gestion de ces déchets. De plus, la génération d'électricité nucléaire est fortement dépendante des sources fossiles d'énergie, principalement le pétrole (extraction, transport, etc.). Une évaluation de l'énergie nette serait d'ailleurs essentielle pour prendre une décision éclairée sur la réfection ou non de la centrale nucléaire de Gentilly-2. Deux questions doivent trouver réponses.

Brent D. Yacobucci Randy Schnepf, Ethanol and Biofuels: Agriculture, Infrastructure, and Market Constraints Related to Expanded Production, March 16, 2007, Congressional Research Service report for Congress
Amani Elobeid, Simla Tokgoz, Dermot J. Hayes, Bruce A. Babcock, and Chad E. Hart, The Long-Run Impact of Corn-Based Ethanol on the Grain, Oilseed, and Livestock Sectors: A Preliminary Assessment, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University, November 2006.

¹⁹ C.J.Campbell The Availability of Non-Conventional Oil and Gas, ASPO-Ireland, for the Office of Science and Innovation, Department of Trade and Industry, London, May 2006.

²⁰ J. David Hughes, Natural Gas in North America: Should We be Worried?, Geological Survey of Canada, World Oil Conference, ASPO – USA, Boston, Massachusetts, October 26, 2006
Hughes

- a. Considérant la dépendance au pétrole de cette industrie et l'arrivée prochaine du pic pétrolier, comment ferons-nous pour gérer les déchets de cette filière dans l'avenir?
 - b. Combien cette gestion de l'ensemble des déchets de l'industrie nucléaire va-t-elle coûter, avec les hausses conséquentes du prix de l'énergie?
- 4- **Charbon** : L'évaluation de l'énergie nette de cette filière doit tenir compte de l'installation de systèmes de séquestration de carbone dans les futures centrales thermiques au charbon. Certaines études indiquent que ces centrales «vertes» au charbon nécessiteront une hausse de la consommation de charbon de l'ordre de 21 à 91%²¹ et une diminution de l'énergie nette de 16% à 61%²². La séquestration de carbone de cette façon est-elle une solution ou va-t-elle aggraver le problème?

²¹ Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L.A. Meyer , IPCC special report on Carbon Dioxide Capture and Storage, prepared by working group III of the IPCC, Cambridge, University Press, 2005.

²² WAKU H. ; TAMURA I. ; INOUE M. ; AKAI M. Life cycle analysis of fossil power plant with CO[2] recovery and sequestering system, Energy conversion and management , 1995, vol. 36, n° 6-9 (3 ref.), pp. 877-880

Conclusion

L'énergie ne provient pas du néant. Cela semble évident à première vue mais les implications de ce principe le sont moins : produire de l'énergie implique non seulement d'avoir la disponibilité de sources potentielles d'énergie, mais aussi la disponibilité d'énergie déjà utilisable rendant possible l'extraction d'énergie de ces sources potentielles. Il est donc nécessaire, pour connaître l'énergie réellement utile qui sera extraite de ces sources, d'évaluer le rendement sur l'investissement énergétique et l'énergie nette de celles-ci.

Brièvement, voici donc les quelques points importants à retenir concernant la question de la production d'énergie nette au Québec et dans la région du Saguenay—Lac-Saint-Jean :

- 1- **Les évaluations de la production d'énergie nette d'une même source d'énergie peuvent varier grandement.** La précision des résultats dépend grandement du contexte d'utilisation de cette source.
- 2- **L'utilisation des seuls facteurs économiques pour évaluer une filière énergétique peut mener à un cul-de-sac énergétique,** comme dans le cas des schistes bitumineux.
- 3- L'utilisation **d'une méthode comptabilisant l'énergie nécessaire à l'extraction d'énergie est fondamentale et devrait être obligatoirement utilisée lors d'une planification énergétique à long terme.** Sans cela, nous risquons de mettre des efforts importants dans des sources ayant un potentiel énergétique très limité ou même inexistant. Le cas de l'éthanol à base de maïs en est un exemple patent, mais il en existe sans doute d'autres comme la séquestration du carbone provenant des centrales thermiques au charbon ou la génération d'électricité nucléaire.
- 4- La devise de « **la bonne énergie à la bonne place** » s'avère aussi juste dans le cas de la recherche de la plus grande valeur d'énergie nette à l'échelle d'un territoire donné. **Les choix de consommation d'énergie, et non seulement la façon de produire celle-ci, influence grandement la production d'énergie nette.** Dans un tel contexte, les sources de chaleur à basse température, comme le bois ou le solaire thermique, doivent servir en priorité à l'utilisation directe de chaleur comme le chauffage des bâtiments, plutôt qu'à la production d'électricité. La cogénération est intéressante, selon le point de vue de l'énergie nette, uniquement lorsque l'usage principal est la chaleur et que l'électricité en est un « sous-produit ». En contrepartie, l'électricité devrait d'abord servir aux équipements nécessitant absolument cette forme d'énergie plutôt qu'à la production de chaleur à basse température. Par exemple, la ressource forestière en tant que source d'énergie dédiée au chauffage des bâtiments, et tel que cela se

fait abondamment en Europe²³, pourrait permettre d'opérer un déplacement de l'électricité vers l'électrification du transport afin de réduire notre dépendance au pétrole et au gaz naturel ce qui, du même coup, améliorerait notre balance commerciale et notre bilan d'émission de gaz à effet de serre.

- 5- En général, **plus l'énergie nette produite d'une même source est importante, moins celle-ci génère de gaz à effet de serre en proportion de l'énergie produite.**

- 6- Du point de vue de l'énergie nette produite, **les sources d'énergie les plus intéressantes pour le Québec sont, par ordre d'importance : l'hydroélectricité, la biomasse forestière, le solaire thermique (passif principalement), l'éolien, le solaire photovoltaïque, la géothermie et le biogaz.** Les autres sources potentielles sont soit négatives du point de vue de l'énergie nette, soit très limitées dans leurs applications; ou l'on ne dispose pas des informations nécessaires pour en juger. Cependant, certaines d'entre elles pourraient néanmoins s'avérer intéressantes pour certaines applications bien précises.

²³ Il existe actuellement de nombreuses technologies de transformations thermiques du bois (combustion, gaséification, pyrolyse...) émettant très peu de polluants. Ces transformations ne contribuent pas aux changements climatiques si la ressource est bien gérée, l'arbre captant autant de CO₂ durant sa vie qu'il en réémet lors de ces transformations.