

RETOUR SUR L'INVESTISSEMENT ÉNERGETIQUE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE

Yvan DUTIL^{*}, Daniel R. ROUSSE

Chaire de recherche industrielle en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique, École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, Canada

RÉSUMÉ

Une des forces motrices du développement des civilisations est l'accès à des ressources énergétiques abondantes. Depuis la révolution industrielle, ce sont essentiellement les carburants fossiles qui ont alimenté la croissance économique au cours des 250 dernières années. L'avantage fondamental de ces carburants est qu'ils offrent un retour énorme d'énergie à partir d'un investissement initial modeste. En parallèle, les énergies renouvelables se développent afin de produire de l'énergie ayant moins d'impact négatif sur l'environnement. Cependant, alors que certaines de ces technologies présentent un excellent retour sur l'investissement énergétique, d'autres présentent des retours très faibles. Cet aspect soulève des doutes sur leurs pertinences de ces dernières technologies comme substituts écologiques aux carburants fossiles. De plus, il est à noter qu'il y a une forte corrélation entre le retour sur l'investissement énergétique et le rendement économique d'une technologie de production de l'énergie. De sorte, que dans bien des circonstances, les signaux énergétiques, écologiques et économiques pointent tous dans la même direction.

Mots Clés : Économie biophysique, Retour sur l'investissement énergétique, électricité, énergie primaire

1. INTRODUCTION

Afin de limiter à moins de 2 °C l'augmentation de la température du globe au cours du prochain siècle, il faudra réduire la production de gaz à effet de serre de moitié d'ici 2050. Dans le cas des pays industrialisés, dans le cadre d'un partage équitable de l'effort cela se traduit par une réduction de 80 % de la production, un facteur 5 par rapport au niveau de 1990 [1]. Simultanément, la demande en énergie ira en augmentant alors que les énergies fossiles deviennent de plus en plus difficiles d'accès. En conséquence, la nécessaire transition énergétique représentera un défi formidable, ce qui imposera une stricte discipline en matière d'allocation de ressources.

Si les outils économiques classiques sont pertinents pour orienter les politiques publiques, ils n'en demeurent pas moins limités. En effet, la théorie économique classique a du mal à intégrer les contraintes physiques imposées aux technologies. Il existe cependant une théorie économique où ces contraintes sont explicites : l'économie biophysique.

On peut faire remonter cette idée aux travaux des physiocrates, contemporain d'Adam Smith, pour qui la richesse était produite par la terre et dérivait donc directement du rayonnement solaire. C'est cependant au 20^e siècle que le lien entre énergie et économie a été formalisé. En particulier, le prix Nobel de chimie

Frederick Soddy [2] et l'ingénieur fondateur du mouvement technocrate Howard Scott [3] reconnurent que l'énergie était «l'intrant universel». Cette idée fut reprise au début des années 80 par Cutler Cleveland et Robert Costanza qui considéraient de l'énergie doit être considérée comme l'unique source et mesure de la valeur et que, par conséquent, le concept de valeur lui-même devrait être basé sur l'énergie [4-5]

Les deux philosophies se distinguent donc à la place qu'occupe l'énergie dans l'économie. En effet, pour l'économie classique l'énergie est une commodité et la production est le fruit du travail et du capital (ex. : un bucheron avec sa scie mécanique). Dans le cas de l'économie biophysique, c'est l'énergie qui est à la base de la production (ex. : l'essence dans la scie). On remarquera que du point de vue de la physique la seconde vision est la plus adéquate.

2. L'ÉNERGIE NETTE

L'analyse économique biophysique s'intéresse à la production d'énergie nette. De la production d'énergie brute, on soustrait donc les coûts énergétiques de la production d'énergie. L'indicateur principal utilisé est le retour sur l'investissement énergétique (EROI : *energy return on investment*). Mathématiquement, ce rapport est défini comme [6-9]:

^{*} auteur correspondant
Adresse électronique : yvan@t3e.info

$$EROI = \frac{\dot{Énergie}_{produite}}{\dot{Énergie}_{investie}} \quad (1)$$

Le principal défi de ce genre d'analyse est de définir correctement la frontière du problème [8-9]. Par exemple, la production d'essence doit tenir compte de toutes les étapes nécessaires à sa production et à son transport jusqu'au consommateur.

On peut faire remonter cette notion aussi loin que dans les écrits du stratège chinois Sun Tzu au V^e siècle avant notre ère [10]:

De là un général sage ne manque pas de ponctionner l'ennemi pour la nourriture et l'entretien. Une charrette de vivres de l'ennemi est équivalente à vingt charrettes de son pays et un kilo de fourrage de l'ennemi vaut vingt kilos de son propre fourrage.

Ce qui revient à dire que le EROI d'un kilo de nourriture volée est égal à 20 fois celui d'un kilo de nourriture qui a dû être transporté jusqu'au front en raison de la queue logistique liée au transport.

De façon générale, plus élevé est le EROI, plus faibles sont les impacts environnementaux par unité d'énergie produite, car moins d'énergie est nécessaire pour sa production [11]. De même, les sources d'énergie avec un meilleur EROI sont susceptibles de représenter un meilleur investissement économique, car le prix d'un produit est relié de façon plus ou moins directe à la quantité d'énergie nécessaire à sa fabrication [12]. Par conséquent, les sources d'énergie avec un meilleur EROI devraient être choisies en préférence d'autres sources [12-14]

Ceci est particulièrement vrai pour les sources d'énergie renouvelables dont la trace environnementale provient essentiellement de l'extraction et du transport des ressources pour les fabriquer avant leur usage.

Bien qu'il soit difficile de calculer le EROI de l'ensemble des sources d'énergie utilisées dans une société, il y a plusieurs indications que le niveau actuel du EROI aux États-Unis est de l'ordre de 10 et qu'un niveau inférieur induit des impacts économiques négatifs sur la société. Alors qu'un EROI de 3 est nécessaire pour simplement distribuer l'énergie à la société [15].

Il est intéressant de noter que le EROI des activités de chasse et de cueillette des !Kung, un peuple de chasseurs-cueilleurs primitif du désert du Kalahari, est de l'ordre de 10, ce qui leur donne accès à un certain niveau de confort [16]. À l'opposé, lors de leur Survie dans la forêt boréale québécoise, André-François Bourbeau et Jacques Montminy ont observé que le EROI de la cueillette de fruits était de l'ordre 3,3-3,6. Dans ces conditions, il leur aurait fallu un minimum de 8 à 9 heures pour simplement supporter leur métabolisme basal [17], ce qui ne leur aurait laissé aucune marge face aux autres activités nécessaires à leur survie.

3. LES SYSTEMES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

Dans cette section, nous présentons une brève revue de la littérature scientifique portant sur les analyses d'énergie nette de système production d'énergie électrique. Ici, une mise en garde s'impose. En effet, afin de comparer correctement les valeurs de EROI, il faut tenir en compte de l'ensemble des intrants dans un système de production. Ainsi, il faut non seulement tenir compte de la production d'électricité, mais aussi de sa conversion, de sa transmission et de son stockage.

Dans le cas de la production d'électricité, il faut aussi tenir compte du fait que la plupart du temps, le résultat est converti en énergie primaire. Dans le cas où des énergies fossiles sont utilisées comme source d'énergie primaire, la quantité d'énergie primaire est toujours supérieure à la quantité d'énergie électrique produite en raison de l'inefficacité inhérente aux machines thermiques. Par conséquent, dans cette situation, si de l'électricité est utilisée en intrant, la quantité d'énergie investie est plus grande que le nombre de kilowatts-heures consommés. Inversement, dans le cas d'une source d'énergie renouvelable (éolien, photovoltaïque), on va souvent considérer qu'il se substitue à de l'énergie provenant de sources thermiques. Par conséquent, l'énergie produite sera plus grande que sa simple valeur en kilowatts-heures. De sorte qu'un équipement de production électrique, qui nécessiterait beaucoup d'électricité pour sa fabrication, présenterait un EROI plus grand s'il est fabriqué au Québec où l'électricité provient essentiellement de sources renouvelables et utilisé en Inde ou en Chine où l'électricité est de sources non renouvelables, que s'il fait le chemin inverse [18]. Dans ce cas particulier, la différence pourrait atteindre un facteur 10!

2.1. HYDRO-ELECTRICITE

L'hydroélectricité est la forme de production d'énergie que présente le plus grand EROI rapporté. Ainsi, dans le cas des barrages d'Hydro-Québec, le EROI a été estimé à 205 pour un barrage avec réservoir et 267 pour une centrale au fil de l'eau sur une période de 100 ans [19]. Toutefois, il est à noter que ces chiffres sont significativement supérieurs à ceux rapportés ailleurs dans la littérature scientifique qui vont de 19 à 100 [20-23]

Il est à noter que dans le cas des hydroliennes, Fraenkel [24] estime que le EROI est du même ordre de grandeur que les éoliennes par analogie. Cependant, du point de vue méthodologique, cette approche est boiteuse.

2.2. EOLIEN

La métaanalyse la plus récente sur le sujet est celle de Kubiszewski et al. [25] qui est largement basée sur la revue de Lenzen [26]. Le EROI moyen dans cette étude croît avec la puissance (on retrouvera une explication physique dans l'article de Lenzen [26]). Ainsi, le EROI atteint environ 30 pour des puissances de l'ordre de

750 kW. Ce qui est une puissance relativement faible par rapport aux éoliennes modernes. Il semble que cette tendance se maintienne. Ainsi, Flanagan rapporte un EROI de 50 pour une éolienne de 2 MW [27] alors que Tremeac et Meunier [28] rapportent un EROI de 33,5 pour une éolienne de 4,5 MW.

Comme le EROI augmente avec la puissance, il est très faible pour les petites installations domestiques. Ainsi Tremeac et Meunier estiment le EROI d'une éolienne de 250 W à 8,7. Cependant, cette valeur est beaucoup plus grande que celle calculée par Mithraratne [29] pour une éolienne de 1,5 kW dans le contexte néo-zélandais qui n'atteignait que 1,8 à 2,9 et énormément supérieure à celle du Encraft Warwick Wind Trials Project [30] qui a observé que certaines éoliennes domestiques (400 W à 1,35 kW) consommaient de l'énergie en opération ce qui revient à un $EROI < 1$ et ce sans même calculer une analyse de cycle de vie complète.

2.3. NUCLÉAIRE

La méta-analyse la plus détaillée de l'industrie nucléaire est celle de Lenzen [31]. Les EROI évalués vont de 1,1 à 10. Le bilan énergétique étant dominé par le traitement du combustible nucléaire en amont et en aval. Il est cependant à noter que des études plus récentes estiment le EROI de réacteurs nucléaires aux environs de 50 [32-33]. La source de cette différence n'est pas très claire. Cependant, elle semble être liée à l'utilisation de procédés de préparation du combustible différents et à une estimation moindre des coûts de traitement des déchets nucléaires.

2.4. PHOTOVOLTAÏQUE

L'analyse du EROI des panneaux photovoltaïques est probablement la plus controversée. D'une part, dans certains les calculs sont faits en terme d'énergie électrique produite alors que dans d'autres cas c'est l'énergie primaire déplacée qui est calculée. Cette simple nuance peut changer le EROI d'un facteur 3. De plus, certains calculs ne s'appliquent qu'aux panneaux solaires eux-mêmes et n'incluent pas le support, le câblage et l'onduleur. Finalement, la technologie évolue très rapidement ce qui rend caduque les analyses après quelques années. Finalement, la durée de vie réelle des composantes d'une installation PV est encore controversée.

Ainsi, en 2007, Pacca et al [3] estimèrent le EROI de panneau PV installé à Ann Arbor, Michigan à 3,4-7,9, mais ces valeurs pouvaient espérées être améliorée à 4,4-15,6 grâce à meilleure efficacité de l'onduleur.

Lalemant et al. [35] firent une analyse similaire pour des systèmes installés en Europe. En termes d'énergie primaire, le EROI estimé va de 5 à 8,3 en fonction de la situation géographique. Cet article contient aussi une revue de littérature des résultats les plus récents dans le domaine. Raugei et al. [36] estiment de leur côté des EROI allant de 19 à 38 en terme d'énergie primaire en se basant sur les évaluations de Fthenakis & Kim pour l'énergie intrinsèque [37].

Étant donné qu'une bonne partie de l'énergie nécessaire à la fabrication d'un panneau PV est comprise dans sa structure de support, il est alors intéressant de l'intégrer à la façade d'un bâtiment existant afin d'économiser cette composante. Dans le cas particulier d'une façade solaire d'un édifice new-yorkais, Perez et al. [38] obtiennent des EROI de 34,6 avec les crédits énergétiques et 7,2 sans ces derniers. Le plus grand de ces nombres correspondant à la valeur pour laquelle le système reçoit un crédit pour l'énergie intrinsèque du revêtement qui a été économisée par l'installation du panneau solaire. Il est cependant à noter que dans le cas d'un capteur solaire photovoltaïque installé sur une maison net-zéro située à Montréal, le EROI a été estimé à 3,5 [39]. Dans ce cas le panier d'énergie est essentiellement composé d'énergie renouvelable (~97 %) et ne bénéficie donc pas du taux de conversion de l'énergie primaire en électricité.

Il est à noter que les progrès de la technologie sont rapides, ce qui fait espérer à des chercheurs comme Espinosa et al [40] que l'on pourra un jour produire des panneaux qui prendront seulement une journée d'opération pour produire la quantité d'énergie nécessaire à leur fabrication.

3. CONCLUSION

Dans cette brève revue de littérature, nous avons examiné les EROI de différentes technologies de production d'électricité à partir de sources ayant une faible empreinte carbone. On note que les EROI calculés sont la plupart du temps suffisamment élevés pour être rentable du point de vue énergétique et environnemental. Cependant, dans bien des cas, il dépend fortement des conditions locales. Entre autres, le panier d'électricité à un impact considérable. Ainsi, simplement en raison du développement des énergies renouvelables, le EROI des technologies diminuera au cours du temps.

D'autre part, aucun de ces calculs ne tient compte du surcoût associé à la stabilisation de la production d'énergie en raison de l'intermittence de la production des sources d'énergie renouvelable et de l'impossibilité de moduler l'énergie nucléaire. Par conséquent, il faut considérer ces EROI comme étant une limite supérieure.

RÉFÉRENCES

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation; Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007.
- [2] Soddy, F., Cartesian Economics: The Bearing of Physical Sciences upon State Stewardship, Hendersons, London, 1924.
- [3] Scott, H., Introduction to Technocracy, The John Day Company, New York, NY, 1933.
- [4] Costanza, R. Embodied energy and economic valuation, Science 1980;210:1219-1224.
- [5] Cleveland, CJ, Costanza, R, Hall, CAS, Kaufmann, RK, Energy and the US economy: A biophysical perspective, Science 1984; 255: 890-897.
- [6] Hall, CAS Migration and Metabolism in a Temperate Stream Ecosystem. Ecology 1972;53:585-604.

- [7] Hall, CAS, Cleveland, CJ Petroleum Drilling and Production in the U.S.: Yield Per Effort and Net Energy Analysis. *Science*, 1981;211:576-579.
- [8] Hall, CAS., Cleveland, CJ, Kaufmann, R Energy and resource quality: the ecology of the economic process. Wiley: New York, 1986.
- [9] Hall, CAS, Powers, R, Schoenberg, W Peak Oil, EROI, Investments and the Economy in an Uncertain Future. In *Renewable Energy Systems: Environmental and Energetic Issues*. Pimentel, D., Ed.; Elsevier: London, 2008, pp. 113-136.
- [10] Sun Tzu, *L'art de la Guerre*, Chapitre 2.15, Flammarion, 1972, p. 104
- [11] Huijbregts, M, et al, Cumulative Energy Demand As Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production, *Environ. Sci. Technol.* 2010;44:2189–2196.
- [12] Hendrickson, CT, Lave, LB, Matthews, HS Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach. Resources for the Future Press, 2006
- [13] Mulder, K, Hagens, NJ Energy return on investment: toward a consistent framework. *AMBIO* 2008;37:74-79.
- [14] Gagnon, L. Civilisation and energy payback. *Energy Policy* 2008;36:3317-3322.
- [15] Hall, CAS, Balogh, S, Murphy, DJR What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies* 2009;2:25-47
- [16] Lee, R IKung bushman subsistence : An input-output analysis, *Environment and cultural Behavior, ecological studies in cultural anthropology*, ed. AP Vayda., Natural History Press, New York, 1969, pp. 47-79
- [17] Bourbeau, A-F, *Survie au gré de la nature*, Éditions JCL, Chicoutimi, 1988
- [18] Raugei, M. Energy pay-back time: methodological caveats and future scenarios, Dans: *Progress in photovoltaics: research and applications*, Prog. Photovolt: Res. Appl., Wiley (2012)
- [19] Gagnon, L. Bélanger, C., Uchiyama, Y., Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001 , *Energy Policy* 2002;30:1267–1278
- [20] Cleveland, CJ, Costanza, R, Hall, CAS, Kaufmann, R Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective. *Science*. 1984;225:890-897.
- [21] Pimentel, D., Rodrigues, D., *Renewable Energy: Economic and Environmental Issues*. Bioscience. 1994: 44-48.
- [22] Gilliland, MW, Klopatek, JM, Hildebrand, SG, Net energy of seven small-scale hydroelectric power plants Oak Ridge National Lab., TN. 1981
- [23] Odum, et al 1975 Net Energy Analysis of Alternatives for the United States
- [24] Fraenkel, PL Marine current turbines: pioneering the development of marine kinetic energy converters, Dans: *Proc. IMechE Vol. 221 Part A: J. Power and Energy*, 2007, pp. 47-79
- [25] Kubiszewski, I Cleveland, CJ, Endres, PK Meta-analysis of net energy return for wind power systems, *Renewable Energy* 2010;35:218–225
- [26] Lenzen, M, Munksgaard, J Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines – review and applications. *Renewable Energy* 2002;26:339–62
- [27] Flanagan, B., GE Global Research, Workshop on Next-Generation Wind Power, RPI Center for Future Energy Systems, 2010
- [28] Treméac, B, Meunier, F. Life cycle analysis of 4.5MW and 250W wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13: 2104–2110
- [29] Mithraratne, N Roof-top wind turbines for microgeneration in urban houses in New Zealand, *Energy and Buildings* 2009;41;1013–1018
- [30] Encraft Warwick Wind Trials Project, 2009 <http://www.warwickwindtrials.org.uk/resources/Warwick+Wind+Trials+Final+Report+.pdf>
- [31] Lenzen, M., Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review, *Energy Conversion and Management* 2008;49: 2178–2199
- [32] Kunakemakorn, J, Wongsuchoto, P, Pavasant, P, N. Laosiripojana, N, Greenhouse Gas Emission of European Pressurized Reactor (EPR) Nuclear Power Plant Technology: A Life Cycle Approach, *Journal of Sustainable Energy & Environment* 2011;2:45-50
- [33] Simons, A, Bauer C, Life cycle assessment of the European pressurized reactor and the influence of different fuel cycle strategies, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 2012;226: 427-444
- [34] Pacca, S, Sivaraman, D, Keoleian, GA Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems, *Energy Policy* 2007;35:3316–3326
- [35] Laleman, R, Albrecht, J, Dewulf, J Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011;15:267–281
- [36] Raugei, M, Fullana-i-Palmer, P, Fthenakis, V The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles, *Energy Policy* 2012;45:576–582
- [37] Fthenakis, VM, Kim, HC Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy* 2011;85(8);1609–1628.
- [38] Perez, MJR, Fthenakis, V, Kim, H-C, Pereira AO Façade-integrated photovoltaics: a life cycle and performance assessment case study, Dans: *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, Wiley, 2012
- [39] Leckner, M, Zmeureanu, R Life cycle cost and energy analysis of a Net Zero Energy House with solar Combisystem, *Applied Energy* 2011;88:232–241
- [40] Espinosa, N., Hösel, M, Angmob, D, Krebs, FC Solar cells with one-day energy payback for the factories of the future *Energy Environ. Sci.*, 2012: 5; 5117