

L'EROI et son importance dans l'évaluation des performances des systèmes énergétiques¹

Par Gérard BONHOMME

Professeur émérite à l'Institut Jean Lamour – Campus Artem – Université de Lorraine, et président de la commission Énergie & Environnement de la Société française de physique

Et Jacques TREINER

Chercheur associé au Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain et président du comité d'experts du Shift Project

Satisfaire les besoins en énergie de nos sociétés, dans un contexte de lutte contre le réchauffement climatique et de perspectives d'épuisement des stocks de combustibles fossiles et de ressources minérales, requiert de mettre en œuvre des solutions alternatives à bas-carbone. Le coût du MWh est sans doute un critère utile, mais, comme nous le montrons dans cet article, des critères physiques sont indispensables pour évaluer les solutions technologiques et les scénarios énergétiques envisageables. Le principal de ces critères fondés sur des grandeurs physiques est le taux de retour énergétique (EROI), qui mesure l'efficacité d'un système à fournir à la société une énergie utile pour des secteurs d'activité autres que le secteur énergétique lui-même.

Introduction

Les sociétés humaines sont soumises, pour ce qui concerne la gestion de leur approvisionnement énergétique, à des contraintes analogues à celles des individus vis-à-vis de leur nourriture. Pour se maintenir et se développer, une société ne doit consacrer qu'une fraction de ses ressources énergétiques à l'obtention de ces mêmes ressources. L'essor de nos sociétés industrielles n'a été rendu possible que par la mise en œuvre de ressources énergétiques comme le charbon et le pétrole, qui ont démultiplié les capacités de transformation de la matière, tout en ne consacrant qu'une faible partie de l'énergie à l'obtention de ces ressources. L'évaluation de l'accès à des ressources énergétiques permettant d'assurer le bon fonctionnement de nos sociétés complexes nécessite de s'appuyer sur des critères fondés sur des grandeurs physiques objectives. La seule prise en compte de critères économiques à court terme est insuffisante et souvent trompeuse. Le premier point à considérer est donc celui de la quantité d'énergie dont une société peut disposer, compte tenu de l'autoconsommation du secteur énergétique lui-même. Le concept d'EROI permet une approche physique de ce point fondamental.

¹ Cet article est adapté d'un article original à paraître prochainement dans le cadre d'un numéro spécial sur l'énergie de la revue *Reflets de la physique*.

Taux de retour en énergie (EROI)

Définition et méthodologie

Pour survivre dans un environnement donné, tout animal doit être capable de fournir, à travers son métabolisme, l'énergie associée au travail qu'il lui a fallu dépenser pour acquérir sa nourriture et celle de ses petits, au travail correspondant à différentes activités vitales (battements du cœur, respiration, reproduction, confection du nid ou du terrier, etc.), à la chaleur produite pour assurer le maintien de sa température (s'il est à sang chaud) et à l'énergie chimique liée au renouvellement de ses cellules. Il aura d'autant plus de possibilités de pouvoir se livrer à l'ensemble des activités vitales précitées que la fraction de l'énergie musculaire dépensée pour acquérir de la nourriture sera faible. Cela dépend non seulement des performances intrinsèques de l'organisme, mais aussi de l'abondance de la nourriture et de la facilité à l'obtenir. C'est justement dans le cadre de l'écologie qu'a été introduite une grandeur mesurant le rapport entre l'énergie mise à la disposition du métabolisme (la nourriture) et l'énergie investie pour obtenir la première à partir de l'environnement. Dans le cas du métabolisme humain, l'on peut comprendre ainsi que la dépense énergétique d'un groupe de chasseurs-collecteurs ait pu varier dans d'assez grandes proportions, selon qu'il suffisait à ses

membres de tendre les bras pour collecter une nourriture abondante ou que ceux-ci aient dû, au contraire, parcourir de vastes distances pour chasser un gibier qui était rare.

De façon plus générale, et pour n'importe quel système énergétique, il est intéressant de considérer l'énergie mise à disposition – E_{out} – rapportée à l'énergie investie pour l'obtenir – E_{in} . Ce rapport est appelé EROI, de l'acronyme anglais "Energy Return On Invested".

$$EROI = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

L'EROI mesure les performances d'un système dans l'extraction de l'énergie utilisable à partir de son environnement, ce qu'il ne faut surtout pas confondre avec son efficacité à convertir la chaleur obtenue en brûlant un combustible (la nourriture) en d'autres formes d'énergie, en particulier en énergie mécanique, une efficacité que l'on mesure au travers de son rendement thermodynamique. Les êtres vivants comme les machines thermiques sont envisagés ici comme des multiplicateurs d'énergie (ou plutôt d'exergie²), le facteur amplificateur étant défini par l'EROI.

Si l'on raisonne à l'échelle de la société tout entière, E_{out} désigne l'énergie primaire totale mise à disposition en investissant l'énergie E_{in} , qui représente l'autoconsommation du secteur énergétique. De là, on peut exprimer la fraction d'énergie nette restant disponible pour d'autres usages que la production d'énergie par la relation :

$$\frac{E_{out} - E_{in}}{E_{out}} = 1 - \frac{1}{EROI}$$

² L'énergie est la grandeur physique qui permet de quantifier toutes les transformations internes et tous les échanges avec le milieu extérieur pour n'importe quel système thermodynamique. Le concept d'énergie peut donc revêtir des formes très diverses. On connaît bien sûr la différence fondamentale entre chaleur et travail, que, justement, le concept d'énergie a permis de réunir au début de la construction de la science thermodynamique et de la découverte de ses lois fondamentales (premier et second principes). Le concept d'exergie a été introduit pour prendre en compte la capacité d'une forme donnée d'énergie à être convertie en travail mécanique. L'exergie désigne ainsi la quantité maximale de travail qui peut être récupérée et, de là, la qualité d'une forme donnée d'énergie peut être caractérisée par la fraction d'exergie qu'elle contient. L'évaluation de cette fraction implique de considérer une transformation thermodynamique. L'énergie stockée dans les combustibles fossiles, qui est mesurée par l'enthalpie de combustion (pouvoir calorifique inférieur ou supérieur selon l'état de référence), est en principe et idéalement de la pure exergie, qui correspond alors à l'énergie libre de Gibbs : on peut ainsi imaginer sa transformation totale en travail dans un cycle de Carnot, dont le rendement de conversion est donné par $1 - T_c/T_h$, dans la limite d'un rapport de températures infinies entre la source froide et la source chaude, ce qui n'est bien entendu jamais le cas dans la réalité. Mais ce contenu en enthalpie ne suffit pas à caractériser la qualité d'une forme d'énergie portée par un vecteur énergétique (électricité, chaleur, etc.). Pour l'électricité, il s'agit aussi de pure exergie, mais pour la chaleur, dont seule une partie peut être convertie en travail mécanique dans un cycle thermodynamique, la fraction exergétique est mesurée par le rendement du cycle de Carnot idéal, et dépend évidemment de sa température (voir, par exemple, V. Court (<https://doi.org/10.1007/s41247-019-0059-6>) [2]).

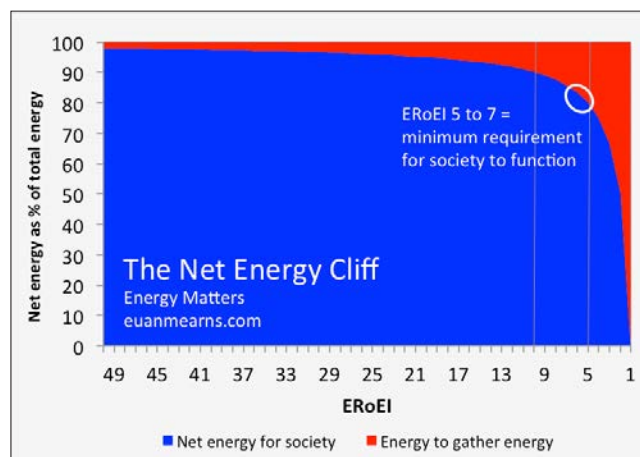


Figure 1 : « Falaise » du taux d'énergie disponible pour les autres usages que sa propre production [1].

La variation de cette fraction (en pourcents) en fonction des EROI décroissants est représentée sur la Figure 1. Elle manifeste une décroissance très rapide en-deçà d'un EROI voisin de 5, d'où l'introduction du terme de « falaise de l'énergie », traduisant le fait que si l'EROI passe en dessous de 5, il ne reste dès lors que très peu d'énergie disponible pour satisfaire d'autres besoins que celui de la recherche d'énergie elle-même³.

Comment utiliser ce concept d'EROI pour caractériser les systèmes énergétiques mis en œuvre dans nos sociétés ?

Le premier exemple d'utilisation concerne le cas de l'approvisionnement en combustibles fossiles. Le cas particulier du pétrole et du coût énergétique de son extraction sert même de référence. Cet exemple permet aussi d'illustrer les diverses façons de caractériser un système énergétique par la notion d'EROI.

- EROI-standard ($EROI_{st}$) : c'est, en sortie de puits, le rapport du nombre de tonnes de pétrole extraits à son équivalent énergétique, exprimé en tonne-équivalent pétrole (tep), dépensé pour son extraction. Ainsi, dans les meilleures années de l'extraction pétrolière, ce nombre était de l'ordre de 100:1. Aujourd'hui, l'EROI du pétrole est de l'ordre de 30:1, et tombe même en dessous de 10:1 pour les sables bitumineux.

³ Un être vivant convertit une partie de sa ration alimentaire quotidienne en énergie musculaire, qui lui permet d'agir sur son environnement, notamment pour se déplacer dans le but de collecter sa nourriture. Un EROI seuil correspondrait alors à la situation où il devrait mobiliser la totalité de cette énergie musculaire pour la collecte de sa nourriture, ce qui ne lui laisserait évidemment aucun surplus. Pour un être humain, on trouve, en retenant un rapport entre une puissance moyenne dissipée estimée à 125 W et une puissance musculaire moyenne d'environ 25 W, un EROI seuil de 5 (= 125/25). Cela correspond bien sûr, dans ce cas, à l'inverse du rendement de la conversion de l'apport en nourriture en énergie musculaire. Cette valeur minimale montre qu'il existe déjà un seuil essentiel correspondant à la nécessité pour le métabolisme de satisfaire tous ses propres besoins en énergie. Il en va de même pour une société qui doit pouvoir s'alimenter et, au-delà, pouvoir assurer, au meilleur coût énergétique et sans impacter négativement les besoins de son propre métabolisme, son approvisionnement en énergie et ressources à partir de son environnement.

- EROI-point d'utilisation ($EROI_{pu}$) : le pétrole brut n'est pas utilisable en tant que tel. Il convient de le transporter jusqu'à une raffinerie (d'où un premier coût énergétique investi), de le raffiner (autre coût investi), puis de le transporter jusqu'à un réseau de distribution (troisième coût investi). L'énergie investie est donc supérieure à l'énergie correspondant au cas précédent, si bien que $EROI_{pu} < EROI_{st}$.

L'évolution de l'EROI au cours du temps et selon la géographie

L'EROI d'une ressource énergétique varie au cours du temps. La disponibilité de la ressource, son abondance et le progrès technologique affectent à la fois le numérateur (E_{out}) et le dénominateur (E_{in}). La question se pose différemment pour les énergies de stock et les énergies de flux.

Concernant les combustibles fossiles, l'analyse de séries longues est rendue difficile par le manque de données techniques permettant d'effectuer une comptabilité en termes purement énergétiques. Une approche consiste alors à prendre les coûts monétaires (les prix) comme « proxy », c'est-à-dire comme de bonnes représentations des coûts énergétiques. L'idée est que toute dépense énergétique correspond à des transformations de la matière, ces transformations mettant en jeu du travail et du capital qui ont, tous deux, une valeur monétaire. Cette approche présente évidemment des biais, associés notamment au fait que tout mouvement purement spéculatif introduit des fluctuations non significatives du point de vue énergétique.

Une analyse parmi les plus récentes et les plus complètes présente différentes façons de lisser ces fluctuations de façon à dégager des tendances lourdes [3]. Elle indique que l'EROI du pétrole et celui du gaz sont passés par leurs maximums respectifs dans les années 1930 et 1940, avec des valeurs respectives de 50 :1 et de 150 :1. Celui du charbon est en revanche toujours croissant. Ces tendances doivent être mises en corrélation avec la production annuelle de ces différentes ressources : on s'attend en effet à ce qu'au début de l'exploitation, la découverte de nouveaux gisements et la maîtrise progressive de leur extraction fassent croître leur EROI, mais qu'avec l'épuisement d'une ressource de stock et, de fait, la moindre richesse des gisements, leur extraction soit de plus en plus difficile et exige la mise en œuvre de techniques de plus en plus coûteuses, ce qui fait décroître l'EROI.

Pour les énergies de flux, qui, elles, sont bien inépuisables, la variabilité de l'EROI se pose non seulement en termes de progrès technologiques, mais également en termes de disponibilité géographique et de quantités suffisantes pour répondre à la demande.

Deux études détaillées récentes [4, 5] se sont intéressées à la disponibilité et à la qualité des ressources pour l'éolien et le solaire selon les localisations géographiques. On s'attend naturellement à ce que l'EROI varie en fonction du flux disponible selon la localisation. En utilisant un maillage complet de la surface terrestre et en prenant en compte les potentiels et les surfaces disponibles par cellule, les auteurs obtiennent des esti-

mations des quantités d'énergie accessibles. Dans le cas particulier de la production d'électricité à partir du flux solaire, les auteurs ont déterminé pour les différentes technologies (solaire photovoltaïque et solaire à concentration) les quantités d'énergie accessibles par plage d'EROI. Au niveau mondial, avec une surface disponible de l'ordre de 5 %⁴ de la surface totale des terres, le potentiel photovoltaïque maximal accessible avec un EROI supérieur à 9 s'élève à 184 EJ/an, soit 51 150 TWh, dont 67 % pour l'Afrique et... 0 % pour Europe (à comparer aux quelques 25 000 TWh d'énergie électrique consommées aujourd'hui). Or, l'EROI calculé par les auteurs est déjà nécessairement surévalué, car il ne prend pas en compte les dépenses énergétiques liées au stockage. Le résultat pour l'Europe est particulièrement significatif : en considérant des valeurs d'EROI aussi petites que 4, le potentiel maximal pour le solaire photovoltaïque se monte à 10 EJ/an, soit 2 780 TWh/an (à comparer à la consommation électrique annuelle actuelle, de 3 330 TWh). Ce résultat correspond bien à ceux mis en évidence par Prieto et Hall [6] et par Weißbach *et al.* [7] (sans stockage), comme on va le voir ci-après.

Un autre exemple est donné à travers la biomasse. Son utilisation pour la production d'électricité est considérée dans le paragraphe suivant. Mais une approche plus pertinente, au regard de son utilisation depuis l'invention de l'agriculture (et du stockage des ressources), tient compte des usages majoritaires de la biomasse dans le monde : en tant que nourriture et source de chaleur. On trouvera des analyses intéressantes des taux de retour en énergie pour différents types de pratiques agricoles dans les travaux récents de Carl Jordan [8], et de S. Harchaoui et P. Chatzimpiros [9].

EROI des sources d'énergie électrique

Avec la part de plus en plus importante prise par l'électricité, il convient de se demander comment adapter le concept d'EROI à des sources électrogènes de façon à pouvoir les comparer.

Dans ce cas, on choisira pour E_{out} l'énergie électrique produite. Il s'agit donc ici de l'EROI-standard.

Précisons à ce niveau la nécessité de prendre en compte une différence fondamentale entre les sources pilotables, que sont les centrales thermiques traditionnelles, et les sources électrogènes non pilotables, que constituent les éoliennes ou les parcs photovoltaïques. La puissance électrique variable délivrée au cours du

⁴ Il s'agit simplement d'un ordre de grandeur. On trouvera une discussion complète dans l'article de Dupont E. *et al.* Dans leurs estimations, les auteurs ont pris en compte des taux de couverture variables selon les régions et les types de technologies mises en œuvre (centrales solaires, solaire de toiture, etc.). On retrouve cet ordre de grandeur de 5 % dans d'autres travaux, par exemple, ceux de MacKay D. (https://www.withouthotair.com/c6/page_41.shtml) et de Perez M. et Perez R. (2022) (<https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100014>). Mais le point essentiel est que les estimations faites à partir de ce taux de 5 % de la quantité d'énergie récupérable annuellement diffèrent considérablement selon le seuil d'EROI choisi. Pour Dupont *et al.*, elles varient de 1 194 EJ (332 000 TWh), en l'absence de fixation d'un seuil, à 184 EJ (51 110 TWh), pour un EROI > 9.

temps ne peut être prise en compte pour constituer l'énergie utilisable que si elle répond à tout instant à la demande du réseau. La situation peut être comparée à celle d'un être vivant qui, dans un environnement donné, ne serait pas en mesure de collecter sa nourriture à un rythme correspondant aux besoins de son métabolisme. En l'absence de possibilité de stockage d'une partie de la nourriture collectée, celle-ci serait irrémédiablement perdue, avec une incidence majeure sur l'EROI.

Notons cependant que la capacité d'un réseau électrique à intégrer en temps réel la production de sources intermittentes non pilotables dépend du taux de pénétration de ces sources. On peut reprendre la comparaison précédente. Un agriculteur-éleveur peut profiter occasionnellement des ressources en gibier offertes par la forêt voisine, évitant par là même de puiser dans ses réserves.

Les calculs doivent être faits pour l'ensemble du cycle de vie de l'installation, tel qu'illustré par la Figure 2. Il est nécessaire de prendre en compte les coûts énergétiques de la construction de l'installation, de son fonctionnement et de sa maintenance, ainsi que de son démantèlement. On comprend aisément que la durée de vie de l'installation soit déterminante dans la détermination de l'EROI final. On notera que la notion souvent utilisée de « temps de retour en énergie » ne mesure que le temps nécessaire à une installation pour fournir, lors de son fonctionnement, une quantité d'énergie correspondant à celle investie lors de sa construction.

L'évaluation de ces différents coûts énergétiques, qui implique la détermination de ceux de l'extraction, de la mise en œuvre des matériaux et de l'autoconsommation de l'installation, est une tâche ardue. Cette part est représentée en rouge et en orange dans la phase

d'exploitation commerciale du schéma ci-dessus (voir la Figure 2). L'étude complète a été effectuée par une équipe de physiciens allemands (voir la référence bibliographique [7]), dont les résultats seront résumés dans le paragraphe suivant. Compte tenu de la difficulté à déterminer de façon purement physique chaque coût énergétique, nombre d'auteurs, s'appuyant sur le fait que les prix jouent un rôle comparable à celui de l'énergie en matière de mesure universelle des transformations de la matière associées à la création de biens et de services, évaluent les différents termes impliqués dans le calcul des énergies d'entrée et de sortie à partir de leurs équivalents en coûts monétaires. Cela conduit à des difficultés de comparaison, surtout si le lien entre coûts monétaires et coûts énergétiques est établi en termes d'énergie primaire.

En outre, l'examen précis des limites du système à considérer fait d'ailleurs apparaître une différence fondamentale entre les énergies de stock et les énergies de flux. Pour les énergies de stock alimentant des sources pilotables, les équipements auxiliaires qui consomment une partie de l'énergie produite par l'installation sont pour l'essentiel ceux de mise en œuvre des techniques d'extraction minière et, lorsqu'il s'agit de combustible nucléaire, les dispositifs d'enrichissement. Pour les énergies de flux, il est nécessaire de prendre en compte, en tant qu'équipements auxiliaires, les dispositifs de stockage nécessaires pour que l'énergie électrique délivrée réponde vraiment à une demande sociétale : les réseaux électriques fonctionnent en effet avec de la puissance garantie, et non de la puissance intermittente [10]. La prise en compte de cette caractéristique n'est pas toujours effective, alors que son incidence sur l'EROI est, comme on va le voir, tout sauf négligeable.

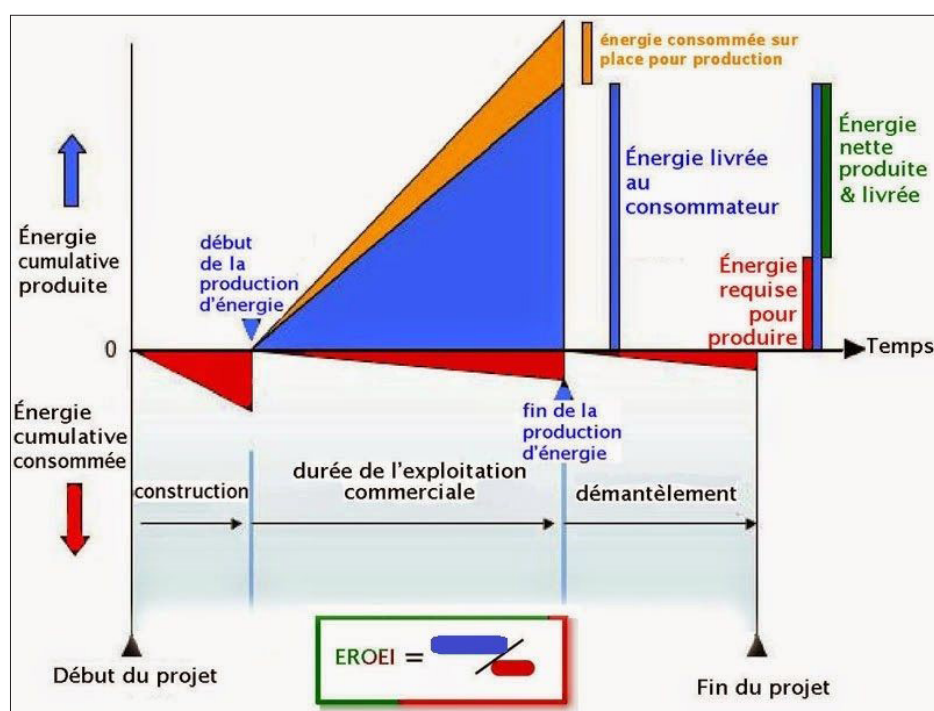


Figure 2 : Schéma simplifié pour l'analyse de cycle de vie d'un système énergétique, d'après la référence bibliographique [7].

Résultats et discussion

Nous rapportons ici (voir la Figure 3) les résultats obtenus par Weißbach *et al.* En dépit d'inévitables marges d'incertitude, ces résultats fournissent des indications fiables pour les principaux systèmes électrogènes : centrales thermiques alimentées en combustibles carbonés fossiles, à partir de la biomasse, ou en combustible nucléaire ; installations convertissant directement les flux solaire et éolien en énergie électrique.

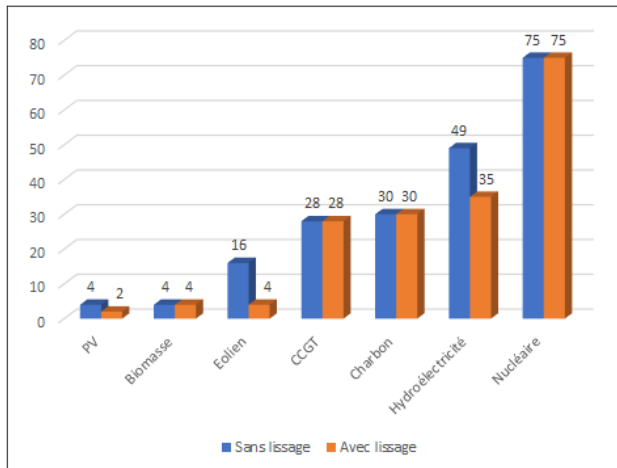


Figure 3 : EROI des principales technologies de production d'énergie électrique [7]. Pour les sources pilotables, les valeurs lissées et non lissées sont identiques. Pour les sources intermittentes, on tient compte du stockage de l'énergie qui permet d'obtenir une production régulière et équilibrée par rapport à la demande (Précision : le sigle CCGT (Combined Cycle Gas Turbine) correspond aux centrales à gaz à cycle combiné). Dans le cas de l'hydroélectricité dite au fil de l'eau, considérée par les auteurs, la valeur lissée correspond à la mise en place de STEP (stations de transfert d'énergie par pompage). Pour le nucléaire, on considère une durée de vie des réacteurs de 60 ans et un enrichissement par centrifugation.

On constate pour le solaire et l'éolien l'énorme incidence sur l'EROI de la prise en compte des dispositifs de lissage et d'équilibrage entre la demande et la production électrique (stockage de l'énergie ou puissance de soutien, par exemple les centrales à gaz). On notera à ce sujet la différence d'ordre de grandeur qui existe entre les fluctuations de la demande journalière d'électricité (typiquement de l'ordre de 10 % de la puissance moyenne appelée) et les fluctuations de la production issue des sources intermittentes, qui sont de l'ordre de la puissance moyenne délivrée (éolien), voire de la puissance installée (solaire PV). C'est ce qui motive le fait de tenir compte des dispositifs de lissage. On remarque aussi sans surprise que plus les sources sont diffuses, plus l'EROI est faible. Quant au nucléaire, on pourrait s'attendre à une valeur de l'EROI encore plus élevée compte tenu de la concentration de cette forme d'énergie⁵. Il n'en est rien. Cela tient essentiel-

⁵ Rappelons qu'une masse de matière engagée dans une réaction nucléaire met en jeu une énergie de l'ordre de plusieurs millions de fois supérieure à celle d'une même masse engagée dans une réaction chimique.

lement au coût énergétique élevé de l'enrichissement de l'uranium, ainsi qu'à un faible taux d'utilisation du combustible dans les réacteurs actuels.

La faible performance du solaire photovoltaïque pourrait interroger. Elle fait du reste l'objet d'âpres débats. Mais les valeurs obtenues par Weißbach *et al.* (pour l'Allemagne) sont, *in fine*, comparables à celles obtenues par Prieto et Hall (pour l'Espagne), tout en utilisant une méthodologie différente. Une comparaison détaillée des deux approches a été effectuée, ce qui est souvent un exercice rendu difficile par la variété des hypothèses faites, en particulier concernant les conditions aux limites considérées et la prise en compte ou non de la gestion de l'intermittence. En effet, les résultats d'analyses se limitant aux panneaux photovoltaïques, bien qu'intéressantes pour évaluer entre elles des technologies, ne sauraient être directement comparées à celles qui considèrent l'installation dans son ensemble, y compris son intégration dans le réseau électrique.

EROI sociétal⁶

Il est possible d'obtenir une estimation d'un EROI sociétal à partir du poids du secteur de l'énergie dans la formation du produit intérieur brut (PIB). Pour les pays de l'OCDE, cet EROI équivaut à environ 7 %. L'inverse de ce poids donne une valeur comprise entre 14:1 et 15:1. Si l'on pondère cette valeur par le rapport entre l'énergie primaire et l'énergie finale qui, en France, est de 1,9, cela conduit à un EROI sociétal de 7,5 :1. Cette valeur est très inférieure aux valeurs de l'EROI des sources d'énergie, majoritairement fossiles. Cela s'explique par le fait que l'EROI sociétal, contrairement à l'EROI standard, tient compte des systèmes nécessaires pour que l'énergie soit utilisable par les consommateurs.

Le faible poids du secteur énergétique dans la formation du PIB ne doit pas être pris pour une indication de sa faible importance économique. En effet, l'énergie ne constitue pas un domaine à part, puisqu'elle intervient dans tous les secteurs d'activité, dont elle détermine les capacités de production⁷.

Un aspect à ne pas négliger est l'impact de l'EROI des sources utilisées, et de son évolution temporelle, sur la consommation totale d'énergie. En effet, plus l'EROI

⁶ Une évaluation d'un EROI sociétal à partir de grandeurs physiques nécessiterait, par analogie avec l'énergie musculaire dépensée par un être vivant pour prélever sa nourriture sur son environnement, de comptabiliser toutes les dépenses en exergie effectuées pour extraire de l'environnement les ressources nécessaires pour alimenter les chaudières, construire les installations de captage ou de stockage et les infrastructures de distribution de toutes les formes d'énergies prélevées et mises à la disposition de la société. Un seuil absolu pourrait être estimé en considérant que la totalité de l'énergie mécanique et électrique disponible serait consommée par le secteur énergétique, ce qui ne laisserait évidemment rien pour satisfaire les autres besoins essentiels au fonctionnement de la société.

⁷ Voir BONHOMME G. & SAFA H. (2023), « L'impact de l'énergie sur le développement des sociétés humaines et l'économie globale », *in Reflets de la physique*, numéro spécial « Énergie » (à paraître).

de ces sources sera bas et plus il faudra augmenter la production d'énergie totale de façon à maintenir la quantité d'énergie nette destinée à couvrir les services énergétiques dont la société a besoin. Deux études récentes [11, 12] examinent ce point dans le cadre de scénarios élaborés pour substituer des ressources renouvelables aux combustibles fossiles dans la production d'énergie électrique.

Conclusion

De nombreux scénarios de transition énergétique cherchant à respecter les Accords de Paris sur le climat et visant la neutralité carbone pour 2050 ne se fondent que sur les seuls critères de coûts pour la mise en œuvre de sources bas-carbone. Il est pourtant nécessaire de s'appuyer sur des critères physiques objectifs, dont l'un des plus importants est l'EROI. Cette question est fondamentale à l'échelle de toute société, car le maintien et le fonctionnement de ses structures et services (éducation, santé, arts, etc.) ne peuvent être garantis que si l'énergie nette – c'est-à-dire l'énergie totale disponible diminuée de l'autoconsommation du secteur énergétique – est suffisante. À cet égard, le cas très débattu des énergies de flux, en particulier électrogènes, doit être analysé selon ce critère. En revanche, d'autres aspects essentiels, qui interviennent déjà dans l'évaluation de l'EROI, comme la disponibilité des flux, les surfaces mobilisées et les besoins en ressources minérales (voir VIDAL O. (2013) [13]), doivent être analysés de façon distincte.

Bibliographie

- [1] EUAN MEARN, <http://euanmearns.com/eroei-for-beginners/>
- [2] COURT V. (2019), "An Estimation of Different Minimum Energy Return Ratios Required for Society", *BioPhysical Economics and Resource Quality* 4:11, <https://doi.org/10.1007/s41247-019-0059-6>
- [3] COURT V. & FIZAIN F. (2017), "Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions", *Ecological Economics* 138, pp. 145-159, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.03.015>
- [4] DUPONT E., KOPPELAAR R. & JEANMART H. (2018), "Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints", *Applied Energy* 209, pp. 322-338, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>
- [5] DUPONT E., KOPPELAAR R. & JEANMART H. (2020), "Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints", *Applied Energy* 257, 113968, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113968>
- [6] PRIETO P. & HALL C. (2013), "Spain's Photovoltaic Revolution: The Energy Return on Investment", Springer.
- [7] WEIßBACH D. *et al.* (2013), "Energy intensities, EROIs, and energy payback times of electricity generating power plants", *Energy* 52, pp. 210-221, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029> ; et (2018), "Energy intensities, EROI (Energy Returned on Invested), for electric energy sources", *EPJ Web of Conferences* 189, 00016, <http://doi.org/10.1051/epjconf/201818900016>
- [8] JORDAN C. F. (2016), "The Farm as a Thermodynamic System: Implications of the Maximum Power Principle",

Biophysical and Economical Resource Quality 1:9, <https://doi.org/10.1007/s41247-016-0010-z>

[9] HARCHAOU S. & CHATZIMPIROS P. (2018), "Energy, Nitrogen, and Farm Surplus Transitions in Agriculture from Historical Data Modeling. France, 1882-2013", *Journal of Industrial Ecology* 23, pp. 412-425, <https://doi.org/10.1111/jiec.12760>

[10] FONTECAVE M. & GRAND D. (2021), « Les scénarios énergétiques à l'épreuve du stockage des énergies intermittentes », *Comptes Rendus Chimie*, tome 24, n°2, pp. 331-350, <https://doi.org/10.5802/crchim.115>, <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/chimie/articles/10.5802/crchim.115/>

[11] CAPELLÁN-PÉREZ I., DE CASTRO C. & GONZÁLEZ L. J. M. (2019), "Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies", *Energy Strategy Reviews* 26, November, 100399, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>

[12] DE CASTRO C. & CAPELLÁN-PÉREZ I. (2020), "Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies", *Energies* 13, 3036, <https://doi.org/10.3390/en13123036>

[13] VIDAL O. *et al.* (2013), "Metals for a low-carbon society", *Nature Geoscience* 6, pp. 894-896, <https://doi.org/10.1038/ngeo1993>