

# Le taux de retour en énergie (EROI)

## et son importance dans l'évaluation des performances des systèmes énergétiques

**Gérard Bonhomme**<sup>(1)</sup> (gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr) et **Jacques Treiner**<sup>(2)</sup> (jtreiner@orange.fr)

(1) Institut Jean Lamour, Campus Artem, Université de Lorraine, 2 allée André Guinier, 54000 Nancy

(2) Chercheur associé au Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain, Université Paris-Cité  
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 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 les secteurs d'activités autres que le secteur énergétique lui-même. D'autres aspects doivent aussi être considérés, comme la disponibilité des ressources, les surfaces mobilisées, les besoins en minéraux, les risques industriels et les impacts sur l'environnement et la santé.

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 l'utilisation de ressources énergétiques comme le charbon et le pétrole, qui ont multiplié 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 ("Energy Return on

Investment" ou en français « Taux de retour en énergie ») introduit ci-dessous permet une approche physique de ce point fondamental. Pour autant, il ne rend pas compte en tant que tel d'autres aspects essentiels, dont les potentiels et la disponibilité des ressources au regard des besoins à satisfaire. Ces aspects et leur impact en retour sur l'EROI seront abordés ; les autres critères à considérer, comme les besoins en minéraux, les risques industriels et sanitaires, et les impacts sur l'environnement, ne seront qu'évoqués ici car ils font l'objet d'articles spécifiques dans la cinquième partie.

## 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 associé à différentes activités vitales (battements du cœur, respiration, reproduction, nid, terrier, etc.), à la chaleur associée au maintien de sa température (s'il est à sang chaud) et à l'énergie chimique associée au renouvellement de ses cellules. Il a d'autant plus de possibilités à se livrer à l'ensemble des activités vitales que la fraction de l'énergie musculaire dépensée pour acquérir la nourriture est faible, et ceci 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 (nourriture) et l'énergie investie pour l'obtenir à partir de l'environnement. Dans le cas du métabolisme humain, 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 rare gibier.

De façon plus générale, et pour n'importe quel système énergétique, il est intéressant de considérer le rapport de l'énergie mise à disposition  $E_{out}$  à l'énergie investie pour l'obtenir  $E_{in}$ . Ce rapport sans dimension est appelé EROI, de l'acronyme anglais "Energy Return On Investment", ou encore parfois EROI "Energy Returned on Energy Invested", ou encore TRE en français (« Taux de Retour Énergétique »):

$$EROI = E_{out} / E_{in}$$

L'EROI mesure la capacité pour un système d'extraire 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 (nourriture), en d'autres formes d'énergie, en particulier en énergie mécanique, et que mesure son rendement thermodynamique. Les êtres vivants ou les systèmes thermodynamiques sont envisagés ici comme multiplicateurs d'énergie (ou plutôt d'exergie<sup>(a)</sup>), le facteur amplificateur étant défini par l'EROI.

Si l'on raisonne à l'échelle de la société 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 :

$$(E_{out} - E_{in}) / E_{out} = 1 - (1 / EROI)$$

La variation de l'énergie disponible (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 que très peu d'énergie disponible pour satisfaire d'autres besoins que ceux de la recherche d'énergie elle-même<sup>(b)</sup>.

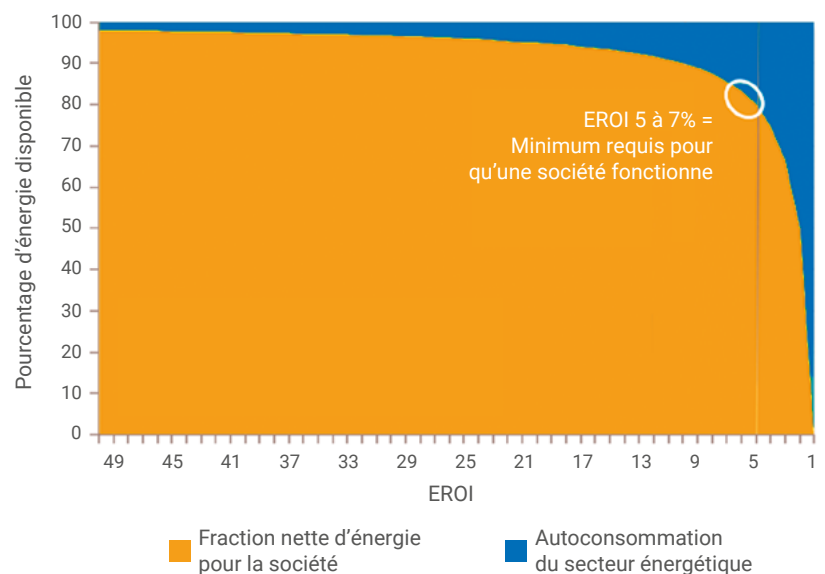
Comment utiliser ce concept d'EROI pour caractériser les systèmes énergétiques mis en œuvre dans nos sociétés ?

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 extrait à l'équivalent énergétique, 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 il tombe en dessous de 10:1 pour les sables bitumineux.

- *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 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 au cas précédent, si bien que  $EROI_{pu} < EROI_{st}$ .

&gt;&gt;&gt;



1. Falaise du taux d'énergie disponible pour les autres usages que sa propre production.  
(Source : E. Mearns, <https://cutt.ly/eroei-for-beginners>).

## 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 les progrès technologiques affectent à la fois le numérateur  $E_{\text{out}}$  et le dénominateur  $E_{\text{in}}$ . La question se pose différemment pour les énergies de stock et les énergies de flux (voir l'article de J. Treiner, p. 9).

Concernant les combustibles fossiles, l'analyse de séries longues est rendue difficile par 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 bonne représentation 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 une valeur monétaire. Cette approche contient évidemment des biais, associés notamment à tout mouvement purement spéculatif qui introduit des fluctuations non significatives du point de vue énergétique.

Une analyse récente [1] présente différentes façons de lisser ces fluctuations de manière à dégager des tendances fortes. 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 150:1, mais que celui du charbon est toujours croissant. Ces tendances doivent être mises en corrélation avec la production annuelle de ces 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 l'EROI, mais qu'avec l'épuisement d'une ressource de stock, l'extraction soit de plus en plus difficile, que les gisements soient moins riches, et exigent la mise en œuvre de techniques de plus en plus coûteuses, ce qui fait décroître l'EROI.

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

Deux études détaillées récentes [2, 3] s'intéressent 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 les quantités d'énergie accessibles. Dans le cas particulier de la production d'électricité à partir du flux solaire, les auteurs obtiennent 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 % de la surface totale des terres, le potentiel photovoltaïque maximum accessible avec un EROI supérieur à 9 s'élève à  $184 \cdot 10^{18}$  J/an, soit 51 150 TWh, dont 67 % pour l'Afrique et ... 0 % pour l'Europe (à comparer aux quelques 27 000 TWh d'énergie électrique consommée aujourd'hui dans le monde). Or l'EROI calculé par les auteurs est déjà nécessairement surévalué, car il ne prend pas en compte les dépenses énergétiques du stockage. Le résultat pour l'Europe est particulièrement significatif : en considérant des valeurs d'EROI aussi petites que 4, le potentiel maximum pour le solaire photovoltaïque se monte à  $10^{19}$  EJ/an, soit 2780 TWh/an, (à comparer à la consommation électrique annuelle actuelle de 3330 TWh). Ce résultat correspond bien à ceux de Prieto & Hall [4] et de Weissbach *et al.* [5] (sans stockage), comme on va le voir ci-dessous.

Un autre exemple est donné par 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 : 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 [6] et de S. Harchaoui et P. Chatzimpiros [7].

## 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  $E_{\text{out}}$  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 comme les éoliennes ou les parcs photovoltaïques. La puissance électrique variable délivrée au cours du temps ne peut être prise en compte pour constituer l'énergie utilisable que si elle répond à tout instant à une 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 possibilités de stockage, une partie de la nourriture collectée 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 qualification de l'EROI final. On notera que la notion souvent utilisée de *temps de retour en énergie* ne mesure que le temps nécessaire pour que l'installation ait fourni, lors

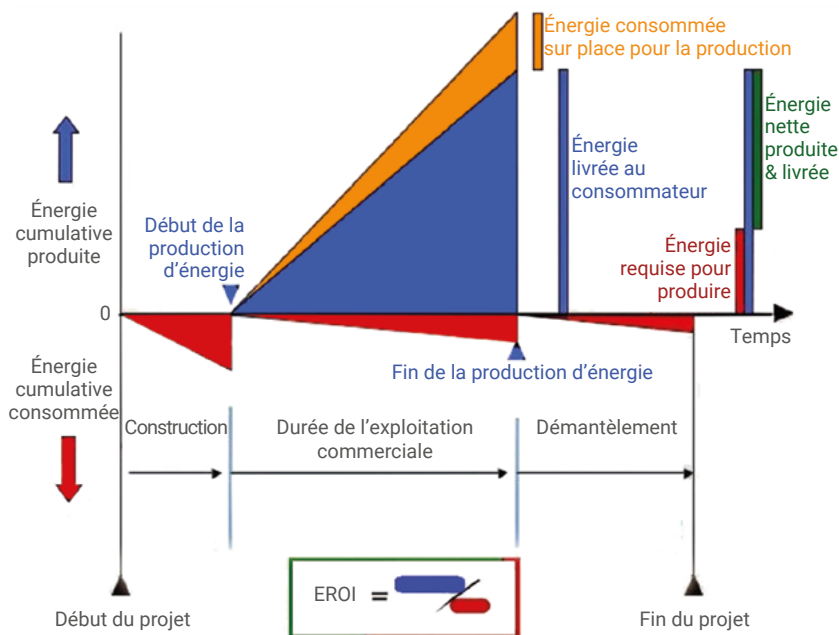
de son fonctionnement, l'énergie investie dans sa construction.

L'évaluation de ces différents coûts énergétiques, qui implique de définir ceux de l'extraction, de la mise en œuvre des matériaux et de l'auto-consommation de l'installation, est une tâche ardue. Cette part est représentée en rouge et en orange dans la phase d'exploitation commerciale (fig. 2). L'étude complète a été effectuée par une équipe de physiciens allemands [5] et un résumé de ses résultats sera présenté dans la section suivante. Compte tenu de la difficulté à déterminer de façon purement physique chaque coût énergétique, nombre d'auteurs, utilisant le fait que les prix jouent un rôle comparable à celui de l'énergie en tant que 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 utilisés pour l'extraction minière et en plus, lorsqu'il s'agit de combustible nucléaire, les dispositifs d'enrichissement. Pour les énergies de flux, il faut en outre prendre en compte, comme équipement auxiliaire, 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 avec de la puissance *intermittente*. Cette prise en compte n'est pas toujours faite, alors que son incidence sur l'EROI est, comme on va le voir, tout sauf négligeable.

&gt;&gt;&gt;



2. Schéma simplifié pour l'analyse du cycle de vie d'un système énergétique.



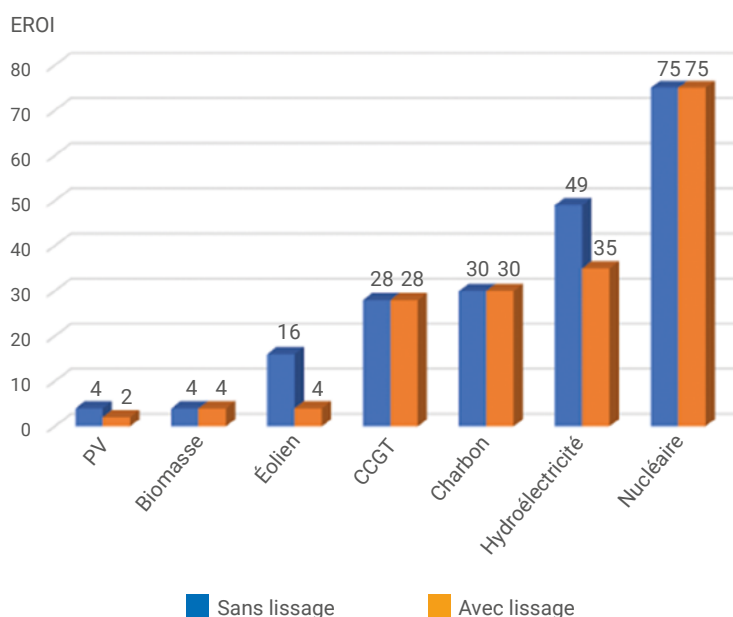
- 1• V. Court et F. Fizaine, "Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions", *Ecological Economics* **138** (2017) 145–159 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.03.015>).
- 2• E. Dupont et al., "Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints", *Applied Energy* **209** (2018) 322–338. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>).
- 3• E. Dupont et al., "Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints", *Applied Energy* **257** (2020) 113968, (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113968>).
- 4• P. Prieto et C. Hall, *Spain's Photovoltaic Revolution: The Energy Return on Investment*, Springer (2013).
- 5• D. Weissbach et al., "Energy intensities, EROIs, and energy payback times of electricity generating power plants", *Energy* **52** (2013) 210–221 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029>); "Energy intensities, EROI (energy returned on invested), for electric energy sources", *EPJ Web of Conferences* **189** (2018) 00016 (<http://doi.org/10.1051/epjconf/201818900016>).
- 6• C.F. Jordan, "The Farm as a Thermodynamic System: Implications of the Maximum Power Principle", *Biophys Econ Resour Qual* (2016) 1:9. (doi:10.1007/s41247-016-0010-z).
- 7• S. Harchaoui et P. Chatzimpiros, "Energy, Nitrogen, and Farm Surplus Transitions in Agriculture from Historical Data Modeling. France, 1882–2013", *Journal of Industrial Ecology* **232** (2018) 412–425. (doi: 10.1111/jlec.12760).
- 8• I. Capellán-Pérez et al., "Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies", *Energy Strategy Reviews* **26** (2019) 100399 (<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>).
- 9• C. de Castro et I. Capellán-Pérez, "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** (2020) 3036 (doi:10.3390/en130123036).
- 10• O. Vidal et al., "Metals for a low-carbon society", *Nature Geoscience* **6** (2013) 894–896.

## Résultats et discussion

Nous rapportons ici (fig. 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.

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 demande et production électrique (stockage de l'énergie ou puissance de soutien, par exemple centrales à gaz). On notera à ce sujet la différence d'ordre de grandeur 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 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 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'énergie. Cette limitation de l'EROI tient essentiellement au coût énergétique élevé de l'enrichissement de l'uranium, joint au 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.* [5] (pour l'Allemagne), sont *in fine* comparables à celles de Prieto et Hall [4] (pour l'Espagne), obtenues en utilisant une méthodologie différente. Une comparaison détaillée des deux approches a été effectuée, ce qui est rendu difficile compte tenu de la variété des hypothèses faites, en particulier concernant les conditions aux limites considérées et la prise en compte ou non de la



### 3. EROI des principales technologies de production d'énergie électrique [2, 3].

Pour les sources pilotables, les valeurs lissées et non lissées sont identiques. Pour les sources intermittentes, on tient compte du stockage de l'énergie permettant d'obtenir une production régulière et en équilibre avec la demande.

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 STEPs (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage, voir p. 119). Pour le nucléaire, on considère une durée de vie de 60 ans et un enrichissement par centrifugation.

gestion de l'intermittence. En effet, les résultats d'analyses limitées à un panneau photovoltaïque unique, bien qu'intéressantes pour comparer 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 sociétal<sup>(d)</sup>

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, ce poids est environ 7 %. Son inverse donne une valeur entre 14:1 et 15:1. Si l'on pondère cette valeur par le rapport entre énergie primaire et 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. Cette différence s'explique par le fait que l'EROI sociétal tient compte des systèmes nécessaires pour que l'énergie soit

utilisable par les consommateurs, contrairement à l'EROI standard.

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, elle intervient dans tous les secteurs d'activité, puisqu'elle en mesure les capacités de production (voir l'article de G. Bonhomme et H. Safa, p. 18).

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 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 [8, 9] examinent ceci dans le cadre des scénarios élaborés pour substituer des ressources renouvelables aux combustibles fossiles dans la production d'énergie électrique.

## Les autres critères d'analyse

Passons rapidement en revue les autres critères qu'il est indispensable de considérer pour caractériser les systèmes énergétiques et qui, à ce titre, feront l'objet d'articles spécifiques dans ce numéro.

### Les ressources minérales

La question du prélèvement des ressources naturelles se pose très différemment pour les énergies de stock et les énergies de flux. Dans le premier cas, il s'agit de l'approvisionnement en combustible lui-même (carboné ou nucléaire), alors que dans le second cas, il s'agit des ressources minérales nécessaires à la fabrication des dispositifs de captation et conversion des flux (solaire ou éolien pour l'essentiel). Ces flux sont bien inépuisables, mais les installations

qui permettent de les convertir en énergie électrique mobilisent de nombreuses ressources en matériaux [10], d'autant plus importantes en quantité qu'il s'agit d'énergies à faible intensité. Ce problème crucial des ressources minérales — qui constituent des stocks épuisables — fait l'objet d'un article spécifique dans la cinquième partie de ce numéro (p. 144).

### Les autres impacts sur l'environnement et les risques pour la santé

Hormis l'impact majeur sur l'environnement constitué par les émissions de gaz à effet serre consécutives à l'utilisation des combustibles fossiles, et motivant à lui seul la nécessité d'une transition vers des procédés décarbonés, il existe d'autres catégories d'impacts associés soit à la mise en œuvre et à l'exploitation des installations et à d'éventuels accidents,

soit à la production de déchets, inhérente à tout type de technologie. Là aussi, un article de la cinquième partie (p. 162) est dédié à l'impact sanitaire de la production et de la consommation d'énergie.

Bien que ne brûlant pas de combustibles carbonés, les renouvelables électrogènes et le nucléaire génèrent aussi des émissions de carbone, en particulier à travers les phases de construction et de démantèlement des installations. Les données de l'ADEME, en accord avec les évaluations au niveau international, sont les suivantes :

- éolien terrestre : taux d'émission de 14,1 g CO<sub>2</sub> eq / kWh ;
- éolien en mer : taux d'émission de 15,6 g CO<sub>2</sub> eq / kWh ;
- solaire photovoltaïque : taux d'émission de 55 g CO<sub>2</sub> eq / kWh.

En comparaison, selon les estimations du GIEC, le nucléaire génère 12 g CO<sub>2</sub> eq/kWh<sup>(e)</sup>, les centrales au gaz 490 g CO<sub>2</sub> eq/kWh et les centrales au charbon 820 g CO<sub>2</sub> eq/kWh.

## 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 décarbonées. Nous avons montré dans cet article qu'il est nécessaire de s'appuyer sur des critères physiques objectifs, en premier lieu sur une évaluation à l'aide de 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 — énergie totale disponible diminuée de l'autoconsommation du secteur énergétique — est suffisante. À cet égard, le cas très débattu des énergies renouvelables, en particulier électrogènes, doit être analysé selon ce critère. D'autant que d'autres aspects essentiels doivent être analysés de façon distincte, comme la disponibilité des flux, les surfaces mobilisées et les besoins en ressources minérales. C'est pourquoi des articles spécifiques leur sont dédiés dans ce numéro. ■

(a) 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 que contient la quantité d'énergie considérée. L'évaluation de cette fraction implique de considérer une transformation thermodynamique. L'énergie stockée dans les combustibles fossiles, et 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, car on peut 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 infini 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. (Cf. par exemple V. Court, "An Estimation of Different Minimum Exergy Return Ratios Required for Society", *BioPhysical Economics and Resource Quality* (2019) 4:11, <https://doi.org/10.1007/s41247-019-0059-6>).

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

(c) 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 celle d'une même masse engagée dans une réaction chimique.

(d) 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, de stockage et les infrastructures de distribution de toutes les formes d'énergie prélevée et mise 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 d'autres besoins essentiels au fonctionnement de la société.

(e) 6 g CO<sub>2</sub> eq/kWh en France selon les données de l'ADEME.