

# EROI minimum et croissance économique

Par Victor COURT

Ingénieur et économiste, Centre Économie et Management de l'énergie, IFP Énergies nouvelles

Et Florian FIZAINÉ

Économiste, Institut de recherche en gestion et économie, Université Savoie Mont-Blanc

Les notions d'énergie nette et d'EROI ont progressivement gagné en popularité depuis leur émergence dans les années 1970. Particulièrement utiles pour caractériser, respectivement, l'état d'abondance et la difficulté à extraire l'énergie de l'environnement, leur mesure s'avère néanmoins difficile. Depuis quelques années, dans un contexte de raréfaction des hydrocarbures et de basculement vers les énergies décarbonées, plusieurs études ont essayé d'estimer l'impact d'une baisse de l'EROI sur le fonctionnement d'une société industrielle. Une autre façon d'aborder ce sujet revient à se demander s'il est possible d'estimer la valeur minimale d'EROI requise pour soutenir la croissance économique. En raison de certaines faiblesses méthodologiques, les résultats de ce champ de recherche restent hétérogènes et difficiles à interpréter, d'autant qu'ils s'inscrivent dans un contexte de requalification de l'objectif à atteindre (croissance économique ou qualité de vie), auquel la science ne pourra pas répondre seule.

De prime abord, les concepts d'énergie nette et de taux de retour énergétique (TRE, ou Energy Return on Investment (EROI)) paraissent simples et utiles pour mieux comprendre ce qui se joue dans un projet de transition bas-carbone. Plusieurs questions importantes ont émergé il y a quelques années autour de ces notions : quel est le lien entre EROI et prospérité économique ? Faut-il nécessairement un système énergétique avec un EROI élevé pour observer une croissance économique élevée ? Peut-on définir une valeur d'EROI en-dessous de laquelle la croissance économique est impossible ?

Dans cet article, nous nous proposons de faire le point sur les connaissances existantes vis-à-vis de ces interrogations. Après avoir rappelé les concepts d'énergie nette et d'EROI, nous détaillerons les raisons pour lesquelles l'utilisation de ces notions, simples et intuitives en apparence, est difficile en pratique. Nous reviendrons ensuite sur les résultats les plus importants en ce qui concerne le minimum d'EROI requis pour observer une croissance de l'activité dans une économie moderne. Enfin, nous discuterons des notions de croissance, de prospérité et de leurs liens avec l'EROI et la sobriété.

## Un système énergétique est toujours cannibale

Odum (1973) a probablement été le premier à remarquer que la variable déterminante pour un système thermodynamique quelconque (un être vivant, un écosystème, une société humaine, etc.) est la quantité d'énergie qui est disponible une fois que les besoins énergétiques propres à son système d'extraction

d'énergie ont été satisfaits. Dans le cadre macroéconomique qui nous intéresse ici, l'énergie nette est donc la quantité d'énergie qui atteint l'économie une fois que les besoins propres au système énergétique ont été satisfaits. On a donc :

$$\text{énergie nette} = \text{énergie produite} - \text{énergie investie pour produire l'énergie} \quad (1)$$

L'énergie nette est donc l'énergie disponible pour faire autre chose qu'extraire de l'énergie de l'environnement, c'est-à-dire soutenir les activités économiques qui définissent un mode de vie donné. L'EROI, mis au point par Hall (1972), est un concept dérivé qui correspond non pas à la soustraction, mais au rapport entre la quantité d'énergie fournie par un processus donné et la quantité d'énergie consommée par ce même processus :

$$\text{EROI} = \frac{\text{énergie produite}}{\text{énergie investie pour produire l'énergie}} \quad (2)$$

Cet indicateur mesure donc l'accessibilité d'une ressource énergétique : plus l'EROI d'un système énergétique est élevé, et plus la quantité d'énergie nette délivrée est importante pour chaque unité d'énergie préalablement investie (Hall *et al.*, 2014). Un point important est de comprendre que l'EROI évolue au cours du temps sous l'effet de deux facteurs antagonistes : d'un côté, l'appauvrissement de la qualité des ressources (car après avoir exploité les meilleurs gisements de pétrole ou de vent, il faut se contenter des moins bons), qui tend à diminuer l'EROI ; et, de l'autre, le changement technique (par effet d'apprentissage, de rendements d'échelle et par R&D) qui lui, au contraire, tend à augmenter l'EROI (Court et Fizaine, 2017).

## Le diable est dans les détails

Depuis plusieurs années, les études se succèdent pour estimer l'EROI des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), des renouvelables modernes (hydroélectricité, éolien, solaire) ou encore du nucléaire. Le but est de pouvoir comparer les systèmes énergétiques du point de vue de leur capacité à fournir de l'énergie nette à la société, et ainsi comprendre ce qu'une transition vers un système bas-carbone implique en termes d'EROI agrégé (ou « sociétal »). Plusieurs chercheurs, tels que Brandt *et al.* (2013) ou King (2014), ont souligné que le sigle EROI est plutôt vague et qu'il serait préférable de parler d'*energy return ratio* (ERR, ou « ratio de retour énergétique »), en faisant *a minima* la distinction entre un *gross energy return ratio* (GERR), c'est-à-dire la production d'énergie brute divisée par l'énergie consommée pour assurer ladite production, et un *net energy return ratio* (NERR), c'est-à-dire l'énergie nette (donc l'énergie brute moins l'énergie investie) qui va à la consommation finale divisée par l'énergie consommée pour assurer la production de l'énergie brute<sup>1</sup>.

Mais d'autres problèmes méthodologiques se posent lors du calcul de l'EROI de systèmes énergétiques différents, notamment la cohérence de leurs limites physiques (Brandt et Dale, 2011 ; Brandt *et al.*, 2013 ; Modahl *et al.*, 2013 ; Zhang *et al.*, 2013 ; King *et al.*, 2015 ; Murphy *et al.*, 2016, 2022). Pour des raisons de disponibilité des données, les estimations se sont longtemps focalisées sur l'EROI du pétrole et du gaz, qui sont des énergies primaires. En revanche, en ce qui concerne les énergies bas-carbone (nucléaire et renouvelables), on se place au niveau de l'électricité produite par les infrastructures correspondantes, et on parle alors d'énergie finale<sup>2</sup>. Des comparaisons ont été faites entre les EROIs de ces différents types d'énergies, mais elles sont hasardeuses. En pratique, on devrait toujours se retrancher à comparer des EROIs de systèmes énergétiques qui fournissent des vecteurs éner-

gétiques équivalents. Ainsi, il est légitime de comparer l'EROI de l'électricité produite à partir de gaz (ou d'un autre combustible fossile) avec celui de l'électricité produite à partir d'une éolienne (ou d'une autre infrastructure bas-carbone : barrage, panneaux photovoltaïques, centrale solaire à concentration ou nucléaire). Et de la même manière, cela a du sens de comparer entre eux des EROIs de différents carburants liquides provenant, par exemple, du pétrole ou de la biomasse. En revanche, cela n'a pas de sens de comparer l'EROI du charbon avec celui de l'électricité d'origine solaire, car on voit bien que, dans ce cas, on mélange des pommes et des oranges (Raugei, 2019).

Ces problèmes prennent toute leur ampleur lorsque l'on souhaite parler de l'évolution temporelle de l'EROI de l'ensemble du système énergétique. En effet, la transition bas-carbone implique un changement des vecteurs énergétiques utilisés, notamment par une électrification des usages. Dès lors, il est difficile de comparer l'EROI moyen d'un système énergétique majoritairement fossile, c'est-à-dire reposant sur des combustibles solides, gazeux et liquides, avec celui d'un système bas-carbone reposant sur bien plus d'électricité, d'hydrogène et de biomasse (solide avec le bois, liquide avec les agrocarburants ou gazeuse avec le biogaz).

## Diminution de l'EROI et falaise d'énergie nette

En conservant en tête les avertissements qui précèdent, on peut tout de même se pencher sur la question de l'interaction entre l'EROI agrégé d'une société et son niveau de prospérité économique. En particulier, on peut imaginer qu'il existe une valeur minimale d'EROI en-dessous de laquelle une société moderne ne pourrait plus croître, ni même, peut-être, assurer ses fonctions essentielles, car le système énergétique « cannibaliserait » une trop grande part de l'énergie produite, rendant ainsi l'énergie nette (celle restant disponible pour la société) plus rare et donc plus chère, ce qui gripperait la machine économique (Murphy et Hall, 2010).

Pour comprendre ce point, il est crucial de voir que la relation entre l'EROI et l'activité économique est fortement non linéaire, tout simplement parce que le lien entre l'EROI et la disponibilité de l'énergie nette est lui aussi fortement non linéaire :

$$\text{énergie nette} = 1 - \frac{1}{\text{EROI}} \quad (3)$$

Comme le montre la Figure 1 page suivante, si l'EROI d'une société passe de 50 à 35, la part de l'énergie produite que la société consacre au secteur énergétique sous forme d'investissements directs et indirects passe de 2 à 2,86 % ; en d'autres termes, l'énergie nette passe de 98 à 97,1 % de la production d'énergie brute. Ce changement est important, mais il est probablement gérable par n'importe quelle société. En revanche, si l'EROI passe de 20 à 5, alors l'énergie cannibalisée par le secteur énergétique passe de 5 à 20 % de la production d'énergie brute. Si l'EROI connaît une nouvelle

<sup>1</sup> Par ailleurs, King *et al.* (2015) ont montré qu'une autre distinction cruciale devait être faite entre l'« ERR instantané » d'un système énergétique, c'est-à-dire la production annuelle d'énergie divisée par l'énergie annuelle investie, et l'« ERR complet » portant sur l'ensemble du cycle de vie d'un système énergétique, c'est-à-dire la production cumulée d'énergie divisée par l'ensemble de l'énergie investie sur toute la durée de vie du système. Dans ce cadre, pour un système énergétique donné, l'« ERR complet » représente la moyenne sur l'ensemble du cycle de vie des « ERRs instantanés » qui peuvent varier chaque année.

<sup>2</sup> L'énergie primaire est présente naturellement dans l'environnement sous forme de stocks (charbon, pétrole, gaz, uranium) ou de flux (soleil, cours d'eau, vagues, marées, vent, géothermie). Ces ressources primaires ne sont pas utilisables en tant que telles. Elles doivent être extraites de l'environnement et converties en des formes énergétiques secondaires, aussi appelées « finales ». L'énergie secondaire ou finale correspond aux produits solides, liquides et gazeux qui proviennent du traitement du charbon, du pétrole brut et du gaz naturel, ou des flux thermiques et électriques eux-mêmes issus de la combustion d'énergies fossiles ou des énergies renouvelables (cours d'eau, vagues, marées, vent, géothermie). Ensuite, une multitude de machines et d'appareils – allant du moteur d'une voiture à l'ampoule d'une lampe, en passant par tous les appareils mécaniques, électriques et électroniques que nous utilisons – convertissent cette énergie finale en énergie utile, sous forme de mouvement, de chaleur, de lumière ou de transformations chimiques (Court, 2022, pp. 138-139).

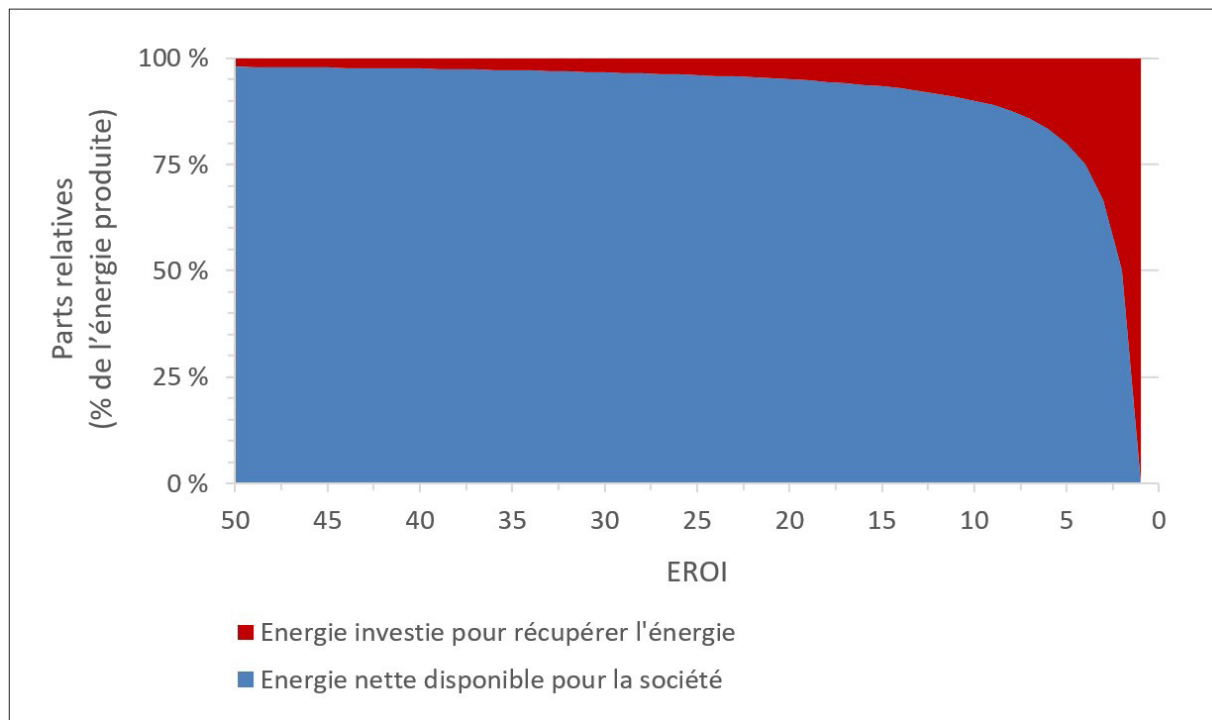


Figure 1 : EROI et falaise d'énergie nette – Source : adapté de Brockway *et al.*, 2019.

baisse en dessous de 5, la quantité d'énergie détournée vers le secteur énergétique augmente de façon exponentielle et, progressivement, il ne reste plus d'énergie nette disponible pour faire autre chose qu'extraire de l'énergie. Bien sûr, dans ce contexte, une parade pour maintenir le flux d'énergie nette consiste à augmenter la taille du système énergétique, mais cela ne constitue qu'une coûteuse fuite en avant.

### Quel est l'EROI minimal requis pour une société moderne ?

À notre connaissance, seules quatre études ont essayé d'estimer la valeur d'EROI minimale requise pour assurer la croissance d'une société. Hall *et al.* (2009) ont été les premiers à proposer un EROI technique minimal de 3 pour l'énergie primaire (plus exactement pour le pétrole à la sortie du puits). Ces mêmes auteurs ont avancé, mais sans s'appuyer sur des calculs explicites, qu'une valeur un peu plus élevée, de l'ordre de 5, devait être nécessaire pour soutenir les sociétés contemporaines. Et ils ont estimé qu'un EROI minimal d'environ 12 à 14, toujours en termes d'énergie primaire, était probablement nécessaire pour qu'une société capitaliste moderne puisse avoir un taux de croissance économique positif. Weißbach *et al.* (2013) estiment, quant à eux, qu'un EROI minimal de 7 est requis pour les pays de l'OCDE. Mais, là aussi, cette estimation est faite au doigt mouillé. La première étude quantitative réalisée dans ce domaine est celle de Lambert *et al.* (2014), mais son objectif est particulier : au lieu de chercher la valeur minimale d'EROI nécessaire pour qu'une croissance économique reste positive, son but est plutôt de réaliser des corrélations assez simples (bien que non linéaires) entre l'EROI et l'indice de développement

humain (IDH) de différents pays<sup>3</sup>. Le principal résultat de cette étude est qu'un EROI sociétal d'environ 15 semble nécessaire (au stade de l'énergie primaire) pour qu'un pays présente un IDH de 0,7 (seuil permettant de bénéficier d'une « qualité de vie convenable »). Enfin, en se basant sur diverses données (quantité et prix des différentes énergies consommées, produit intérieur brut) concernant les États-Unis, nous avons nous-mêmes estimé qu'entre 1950 et 2012, l'économie américaine avait eu besoin d'un approvisionnement en énergie primaire caractérisé par un EROI d'au moins 11 pour bénéficier d'un taux de croissance positif (Fizaine et Court, 2016).

Tous les résultats du paragraphe précédent concernent l'énergie primaire. Mais quand est-il lorsque l'on déplace la réflexion au niveau de l'approvisionnement en énergie finale ? Malheureusement, il n'existe aucune étude ayant estimé l'EROI minimal requis en termes d'énergie finale pour assurer la croissance d'une société. Cependant, plusieurs ont estimé l'évolution de cet indicateur pour quelques pays, ou au niveau global, ce qui a permis d'en déduire indirectement ce que serait la valeur d'EROI minimale requise de l'énergie finale d'une économie moderne. Par exemple, Brand-Correa

<sup>3</sup> L'IDH a été créé pour évaluer le bien-être dans un pays en ne se référant pas uniquement à un indicateur économique, comme le produit intérieur brut ou le revenu national brut. Cet indicateur est une moyenne géométrique de trois composantes normalisées se référant respectivement à l'espérance de vie, à l'éducation et au niveau de vie économique. C'est un indice de classement des pays non pas absolu mais relatif : pour chacune des trois dimensions précitées, la note 1 est attribuée au pays qui occupe la première place, et une note se situant entre 0 et moins de 1 est donnée aux autres pays (par application d'une formule simple) ; on réalise ensuite la moyenne (géométrique) des notes des trois dimensions pour obtenir une note agrégée (UNDP, 2022).

*et al.* (2017) ont constaté que l'EROI de l'énergie finale au Royaume-Uni est passé de 12,7 en 1997 à une valeur maximale de 13,8 en 2000, avant de retomber progressivement à 5,6 en 2012. De même, Feng *et al.* (2018) ont estimé que l'EROI de la production d'énergie finale en Chine a diminué de 11 à 5,3 entre 1987 et 2012. Similairement, Brockway *et al.* (2019) ont estimé que l'EROI mondial des combustibles fossiles au stade final était passé de 6 à 5,4 entre 1995 et 2011. Tous ces résultats suggèrent que l'EROI minimal nécessaire pour l'approvisionnement en énergie finale des sociétés contemporaines se situe en dessous de 5, sans que personne puisse vraiment dire à quel niveau exact <sup>4</sup>.

## EROI, dépense énergétique et (dé)croissance

Dans le cadre de l'étude que nous avons publiée il y a quelques années (Fizaine et Court, 2016), nous avons aussi montré qu'il existait une relation étroite entre l'indicateur de dépenses monétaires énergétiques exprimées en pourcentage du PIB et l'EROI. Pour ce faire, il faut d'abord estimer l'énergie investie dans le système énergétique ( $E_{in}$ ) en termes monétaires :

$$E_{in} = \frac{E_{out} \times P_e}{(1 + MROI)} \times EI \quad (4)$$

Où  $E_{out}$  est la quantité d'énergie produite et vendue,  $P_e$  est le prix moyen de l'énergie,  $MROI$  est le taux de rendement monétaire (c'est-à-dire la marge) dans le système énergétique et  $EI$  est l'intensité énergétique des dépenses monétaires. L'énergie investie est donc la somme des dépenses monétaires effectuées dans le système énergétique pour le construire et l'exploiter, multiplié par l'intensité énergétique de ces mêmes dépenses monétaires. On peut ensuite faire l'hypothèse que l'intensité énergétique des dépenses monétaires consenties dans le secteur énergétique s'apparente à l'intensité énergétique du PIB ( $GDP$ ) du pays considéré, soit  $EI = E_{out}/GDP$ . En intégrant cette expression dans l'équation (4), laquelle ainsi modifiée vient se substituer à l'équation (2), on obtient :

$$EROI = \frac{1}{\frac{P_e}{(1 + MROI)} \times \frac{E_{out}}{GDP}} \quad (5)$$

On remarque ainsi qu'une façon de lutter contre la baisse de l'EROI associée à une hausse des coûts de construction et d'exploitation peut consister à réduire l'intensité énergétique de ces dépenses. Finalement, l'expression (5) peut encore être exprimé par :

$$EROI = \frac{GDP \times (1 + MROI)}{P_e \times E_{out}} \quad (6)$$

<sup>4</sup> Dans la seule étude de ce type à notre connaissance, Vittorio Ecclesia *et al.* (2022) ont poussé l'analyse jusqu'au stade de l'énergie utile. Pour le Portugal (pays sur lequel a porté leur étude), il semble qu'entre 1960 et 2014, l'énergie utile ait été délivrée avec un EROI agrégé d'environ 3.

Cette expression économique de l'EROI revient alors à une représentation de la capacité à produire de la valeur économique avec des dépenses monétaires effectuées dans le secteur énergétique. L'EROI évolue approximativement à l'inverse des dépenses énergétiques exprimées en pourcentage du PIB. Or, c'est précisément cet indicateur qui semble être corrélé négativement à la croissance économique du PIB : un niveau élevé de dépenses énergétiques (en % du PIB) apparaissant comme une condition suffisante (mais pas nécessaire) pour réduire la croissance (voir la Figure 2 de la page suivante). Nous avons montré ce lien pour les États-Unis (Fizaine et Court, 2016), lequel a aussi été mis en évidence à l'échelle de l'OCDE par des économistes de cette institution (OCDE, 2022). Les explications théoriques derrière ce phénomène relèvent de l'impact de la hausse des dépenses énergétiques à la fois sur l'offre et sur la demande globale (Barnard et Ollivaud, 2023). Du côté de l'offre, la hausse des prix de l'énergie conduit à une hausse des dépenses énergétiques qui pousse les entreprises à produire moins et à un prix plus élevé, le tout engendrant moins de croissance économique. Du côté de la demande, la hausse des dépenses énergétiques exerce un effet dépressif sur la consommation des ménages, les amenant à revoir leur arbitrage en faveur des dépenses énergétiques qui sont difficilement substituables et à réduire, en même temps, leurs dépenses correspondant aux autres types de consommation, par un effet revenu négatif. Les quelques gagnants tirant des surprofits dus à l'augmentation des prix de l'énergie ayant une propension à dépenser relativement faible (Cookson *et al.*, 2022), l'effet net sur la demande semble négatif. Les preuves empiriques (venant d'études d'économétrie) restent toutefois fragiles, compte tenu du faible nombre de récessions économiques survenues à la suite de hausses des dépenses énergétiques. Le contexte de hausse des prix de l'énergie prévalant depuis la fin 2022 permettra peut-être de préciser cette relation, même si les dispositifs mis en place par les gouvernements pour protéger les consommateurs et les entreprises (bouclier tarifaire, chèques énergie, recapitalisation) vont probablement « diluer » la relation à travers le temps (la compensation financière de ces dispositifs s'étalant sur de nombreuses années à travers le remboursement de la dette publique engendrée par ces mesures).

## Un EROI en baisse est-il vraiment un problème ?

S'il semble évident que l'EROI d'une société ne doit pas passer en dessous de l'unité, l'impact de la baisse de l'EROI au niveau des minimums estimés précédemment soulève plusieurs interrogations. Tout d'abord, dans la mesure où les sociétés évoluent technologiquement, économiquement et culturellement, il semble inopportun de vouloir chercher une valeur d'EROI minimale absolue. L'efficacité énergétique, c'est-à-dire la capacité à fournir un même service économique en consommant moins d'énergie, peut ainsi faire baisser la valeur minimale requise pour l'EROI sociétal (Court, 2019). En effet, s'il faut moins d'énergie pour fournir le même service économique grâce aux gains d'effica-

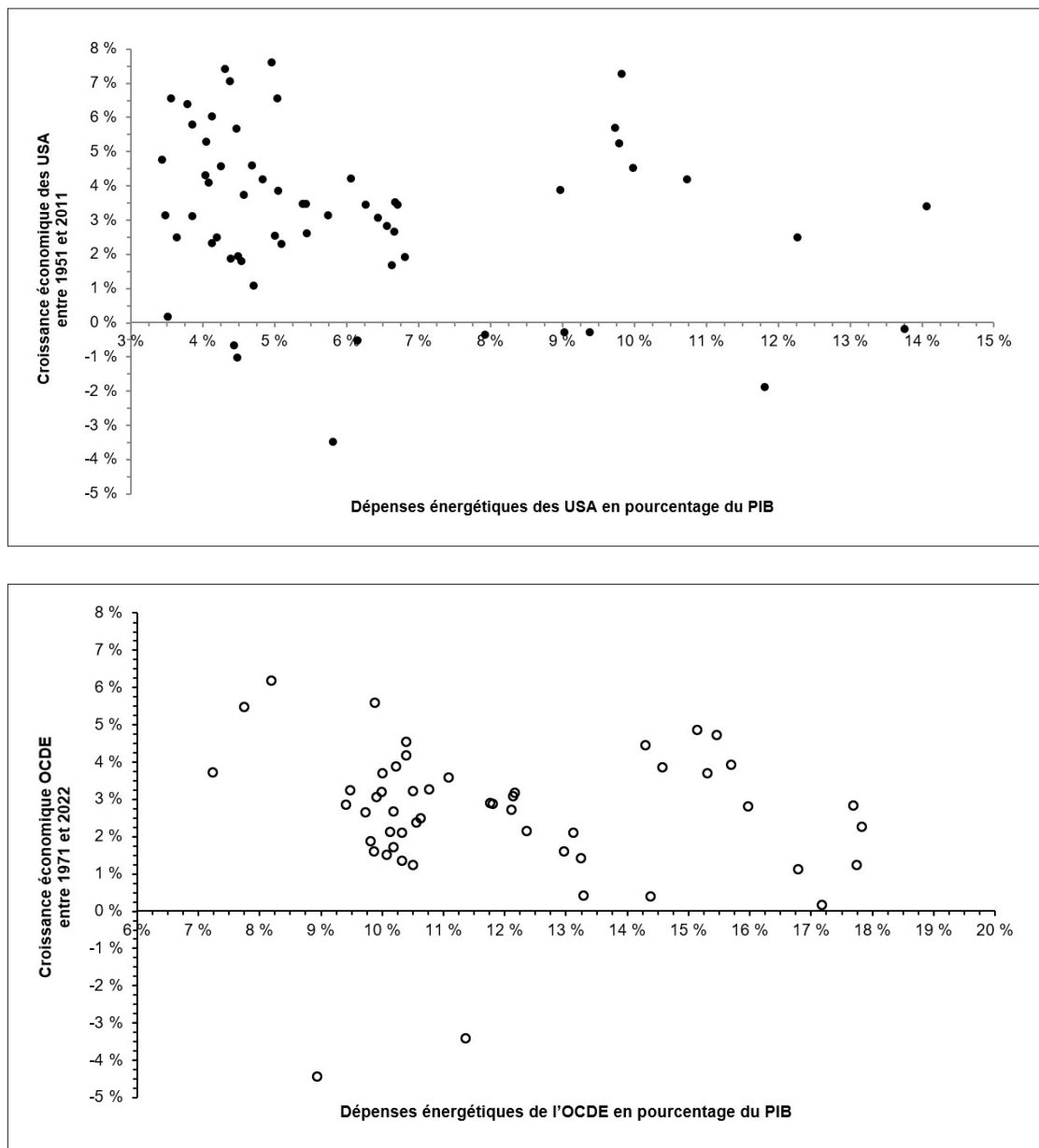


Figure 2 : Relation entre les dépenses énergétiques en pourcentage du PIB et la croissance économique pour les États-Unis (graphique du haut) et l'OCDE (graphique du bas) – Source : Fizaine et Court, 2016 ; OCDE, 2022.

cité énergétique, alors pour un système énergétique de taille équivalente, la « cannibalisation énergétique » sera moins pénalisante pour les autres secteurs économiques. Néanmoins, cette option peut s'avérer de plus en plus coûteuse au fur et à mesure que les gisements d'efficacité énergétique s'épuisent.

D'autre part, nous avons eu jusqu'à présent besoin de systèmes énergétiques avec des EROI élevés, car l'économie fossile (Malm, 2016) repose sur de nombreuses activités intenses en énergie (par exemple, passer des vacances à l'autre bout du monde ou rouler en SUV), qui ne sont peut-être pas essentielles pour maintenir une bonne qualité de vie. Car c'est bien évidemment cela qui est important, et non la croissance du PIB en tant que telle. En dernière instance, c'est bien la structure de l'économie et les modes de vie qui définissent la quantité d'énergie nette nécessaire – et donc l'EROI minimal requis – pour soutenir un certain

niveau de bien-être et d'opulence matérielle. Ainsi, une société qui jugera que son bien-être et sa qualité de vie passent par l'accès au plus grand nombre possible de biens matériels et à des loisirs à haute intensité énergétique nécessitera de disposer de davantage d'énergie nette qu'une société dans laquelle le bien-être sera défini avant tout par la qualité des relations interpersonnelles et la disponibilité de loisirs et de services de proximité. Avec un système énergétique de taille équivalente, cette seconde société pourra prospérer avec un EROI plus faible que la première. Cette limite a aussi une retranscription en termes de résilience par rapport aux prix de l'énergie : une activité économique moins intense en énergie résistera mieux à une augmentation des prix, que ce soit en tendance longue ou à cause d'un choc ponctuel.

Mais tous ces éléments sont bien évidemment normatifs. Il n'existe pas de consensus sur ce qui fait la qualité

de vie/le bonheur et sur la façon dont on le mesure. D'autre part, même si un tel consensus existait, la voie à prendre pour faire émerger cette société alternative reste elle aussi sujette à questionnement : réforme progressive de l'intérieur, révolution radicale, bifurcation au niveau des marges, ou peut-être un mélange de ces trois possibilités ?

## Bibliographie

BARNARD G. & OLLIVAUD P. (2023), "Energy expenditures have surged, posing challenges for policymakers", *Ecoscope: An economic lens on policies for growth and well-being*.

BRAND-CORREA L. I., BROCKWAY P. E., COPELAND C. L., FOXON T. J., OWEN A. & TAYLOR P. G. (2017), "Developing an input-output based method to estimate a national-level energy return on investment (EROI)", *Energies*, vol. 10, 534.

BRANDT A. & DALE M. (2011), "A general mathematical framework for calculating systems-scale efficiency of energy extraction and conversion: energy return on investment (EROI) and other energy return ratios", *Energies*, vol. 4, n°8, pp. 1211-1245.

BRANDT A., DALE M. & BARNHART C. (2013), "Calculating systems-scale energy efficiency and net energy returns: a bottom-up matrix-based approach", *Energy*, vol. 62, pp. 235-247.

BROCKWAY P. E., OWENA., BRAND-CORREAL I. & HARDT L. (2019), "Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources", *Nature Energy*, vol. 4, pp. 612-621.

COOKSON J., GILJE E. & HEIMER R. (2022), "Shake shocked: cash windfalls and household debt repayment", *Journal of Financial Economics*, vol. 146, n°3, pp. 905-931.

COURT V. & FIZAIN F. (2017), "Long-term estimates of the energy-return-on-investment (EROI) of coal, oil, and gas global productions", *Ecological Economics*, vol. 138, pp. 145-159.

COURT V. (2019), "An estimation of different minimum exergy return ratios required for society", *Biophysical Economics and Sustainability*, vol. 4, n°3, 11.

COURT V. (2022), *L'Emballage du monde. Énergie et domination dans l'histoire des sociétés humaines*, Montréal, Écosociété.

FENG J., FENG L., WANG J. & KING C. W. (2018), "Modeling the point of use EROI and its Implications for economic growth in China", *Energy*, vol. 144, pp. 232-242.

FIZAIN F. & COURT V. (2016), "Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society", *Energy Policy*, vol. 95, pp. 172-186.

HALL C. (1972), "Migration and metabolism in a temperate stream ecosystem", *Ecology*, vol. 53, n°4, pp. 585-604.

HALL C., BALOGH S. & MURPHY J. (2009), "What is the minimum EROI that a sustainable society must have?", *Energies*, vol. 2, pp. 25-47.

HALL C., LAMBERT J. & BALOGH S. (2014), "EROI of different fuels and the implications for society", *Energy Policy*, vol. 64, pp. 141-152.

KING C. (2014), "Matrix method for comparing system and individual energy return ratios when considering an energy transition", *Energy*, vol. 72, pp. 254-265.

KING C., MAXWELL J. & DONOVAN A. (2015), "Comparing world economic and net energy metrics, part 1: single technology and commodity perspective", *Energies*, vol. 8, n°12, pp. 12949-12974.

LAMBERT J., HALL C., BALOGH S., GUPTA A. & ARNOLD M. (2014), "Energy, EROI and quality of life", *Energy Policy*, vol. 64, pp. 153-167.

MALM A. (2016), *L'Anthropocène contre l'histoire. Le réchauffement climatique à l'ère du capital*, Paris, La Fabrique.

MODAHL I., RAADAL H., GAGNON L. & BAKKEN T. (2013), "How methodological issues affect the energy indicator results for different electricity generation technologies", *Energy Policy*, vol. 63, pp. 283-299.

MURPHY D. & HALL C. (2010), "Year in review – EROI or energy return on (energy) invested", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1185, n°1, pp. 102-118.

MURPHY D., CARBAJALES-DALE M. & MOELLER D. (2016), "Comparing apples to apples: why the net energy analysis community needs to adopt the life-cycle analysis framework", *Energies*, vol. 9, 917.

MURPHY D., HALL C., DALE M. & CLEVELAND C. (2011), "Order from chaos: a preliminary protocol for determining the EROI of fuels", *Sustainability*, vol. 3, n°10, pp. 1888-1907.

MURPHY D., RAUGEI M., CARBAJALES-DALE M. & RUBIO ESTRADA B. (2022), "Energy return on investment of major energy carriers: review and harmonization", *Sustainability*, vol. 14, 7098.

ODUM H. (1973), *Energy, ecology, and economics*, AMBIO, vol. 2, n°6, pp. 220-227.

OECD. (2022), "OECD Economic Outlook", vol. 2022, Issue 2, Paris, OECD Publishing.

RAUGEI M. (2019), "Net energy analysis must not compare apples and oranges", *Nature Energy*, vol. 4, pp. 86-88.

UNDP (United Nations Development Programme) (2022), "Human Development Report 2021-22: Uncertain Times, Unsettled Lives: Shaping our Future in a Transforming World", Technical note 1, New York, [http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2022\\_technical\\_notes.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2022_technical_notes.pdf)

VITTORIO ECCLESIA M., SANTOS J., BROCKWAY P. E. & DOMINGOS T. (2022), "A comprehensive societal energy return on investment study of Portugal reveals a low but stable value", *Energies*, vol. 15, 3549.

WEIßBACH D., RUPRECHT G., HUK A., CZERSKI K., GOTTLIEB S. & HUSSEIN A. (2013), "Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants", *Energy*, vol. 52, pp. 210-221.

ZHANG Y. & COLOSI L. (2013), "Practical ambiguities during calculation of energy ratios and their impacts on life cycle assessment calculations", *Energy Policy*, vol. 57, pp. 630-633.