

# Implications des taux de retour énergétique pour la transition bas-carbone

Louis Delannoy (louis.delannoy@inria.fr), Pierre-Yves Longaretti (pierre-yves.longaretti@inria.fr) et Emmanuel Prados (emmanuel.prados@inria.fr)

Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), équipe STEEP  
655, avenue de l'Europe, 38330 Montbonnot-Saint-Martin

La conversion de l'énergie nécessite elle-même de l'énergie, une contrainte évaluée à travers le concept d'EROI ("Energy Return on Investment"). Différentes versions de cet indicateur sont couramment utilisées pour mesurer l'utilité comparative de vecteurs énergétiques et évaluer des scénarios de transition vers les énergies à faible teneur en carbone. L'absence de méthodologie formelle avant les années 2010 a conduit à de fréquents malentendus sur le calcul et les incidences de l'EROI, notamment en ce qui concerne la faisabilité de la transition.

Pour remédier à cette situation, nous résumons les points clés qui se rapprochent d'un consensus actuel autour de l'EROI et discutons de leurs implications vis-à-vis de la transition bas-carbone.

La nécessité d'opérer rapidement une transition vers des sources d'énergie à faible teneur en carbone, en particulier pour limiter l'ampleur du réchauffement climatique, est incontestable.

Toutefois, la construction, l'exploitation et l'entretien d'un nouveau système énergétique requiert de l'énergie, dont une grande partie proviendra de combustibles fossiles. La question de l'énergie disponible pour la société, centrale pour construire un monde plus juste, résilient et décarboné, est notamment abordée par la communauté scientifique de l'Analyse Énergétique Nette.

## Approches et métriques de l'analyse énergétique nette (AEN)

L'Analyse Énergétique Nette (AEN) ou "Net Energy Analysis" est une école de pensée qui place les processus de conversion d'énergie au cœur de son approche. Ses métriques sont nombreuses mais tournent principalement autour du concept de Taux de Retour Énergétique ou EROI ("Energy Return on Investment") [1]. Celui-ci se définit comme le rapport entre l'énergie restituée par le système ( $E_{rest}$ ) et celle investie pour accomplir la conversion ( $E_{inv}$ ):

$$EROI = E_{rest} / E_{inv}$$

L'énergie est comptabilisée sur l'ensemble du cycle de vie du système étudié, de sa construction à sa destruction (ou réutilisation/recyclage) en passant par son utilisation, suivant les principes de l'analyse du cycle de vie (ACV). Lorsque l'EROI est calculé de manière dynamique, non plus sur le cycle de vie mais sur un laps de temps donné (généralement une année), on lui préférera le terme PROI ("Power Energy Return on Investment"). C'est notamment le cas pour l'EROI sociétal, fréquemment mentionné dans la littérature, qui est en réalité le PROI annuel « moyen » d'un pays (ou du monde). Il est souvent mis en perspective avec des valeurs théoriques

minimales supposées nécessaires à l'existence des sociétés modernes et à leur croissance.

Un EROI supérieur à 1 signifie que le système étudié restitue plus d'énergie que ce qu'il nécessite pour accomplir la conversion. Un système avec un EROI inférieur à 1 requiert, lui, plus d'énergie qu'il n'en restitue. De tels systèmes peuvent être localement ou temporairement utiles lorsqu'ils ont des propriétés intéressantes, par exemple pour fournir un vecteur énergétique spécifique qui fait l'objet d'une demande particulière, comme le système alimentaire industriel, mais ils ne peuvent pas être une source principale d'approvisionnement pour la société.

Bien que les équations soient simples, elles se sont révélées être à l'origine de difficultés théoriques et pratiques, notamment en ce qui concerne la délimitation de l'analyse du système étudié [2]. En effet, le périmètre d'analyse de l'EROI peut s'appliquer à plusieurs stades spatiaux (extraction, transformation, distribution, etc.) et énergétiques, en fonction de l'incorporation de :

- 1• la consommation interne (une partie de l'énergie finale produite est directement autoconsommée) ;
- 2• la consommation externe (importée de l'extérieur du système) ;
- 3• l'empreinte énergétique des matériaux utilisés ;
- 4• les services auxiliaires (supervision, nettoyage, etc.) ;
- 5• la main-d'œuvre ;
- 6• les externalités (par exemple, les besoins énergétiques nécessaires pour remédier aux dégâts environnementaux ou liés aux dispositifs de stockage). La complexité de conversion des externalités en flux énergétiques rend en pratique périlleuse toute comptabilisation de ce flux.

Il existe de fait une multitude d'EROI, différenciables à l'aide de frontières spatiales et énergétiques. Plus un

## “ Deux EROI sont communs dans la littérature : l'EROI standard, qui comprend les besoins énergétiques nécessaires à l'extraction de l'énergie, et l'EROI au point d'utilisation (ou final), qui comprend en plus l'énergie consommée pour le traitement et la livraison de l'énergie ”

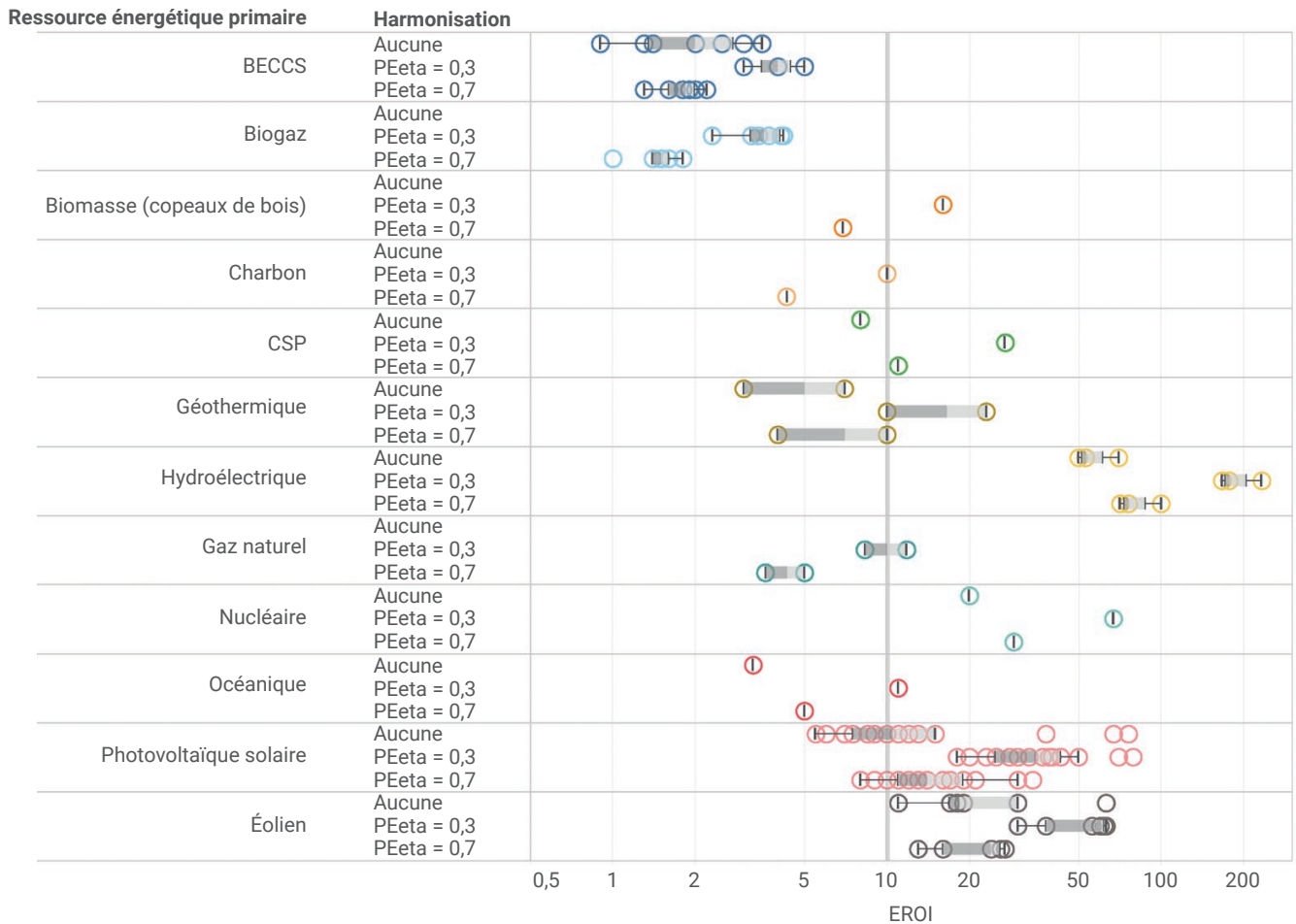
calcul d'EROI intègre des stades énergétiques, plus la valeur estimée sera basse (le dénominateur étant la somme des flux). De même, l'inclusion de bornes spatiales plus étendues réduit généralement l'EROI, tout en accentuant les incertitudes (elles-mêmes liées au cadre temporel). Deux EROI sont toutefois communs dans la littérature : l'EROI standard et l'EROI au point d'utilisation.

1• **L'EROI standard** comprend les besoins énergétiques matériels nécessaires à l'extraction de l'énergie. Il est plus adapté aux énergies fossiles qu'aux énergies renouvelables, où les différentes frontières spatiales ont tendance à se chevaucher. Il permet entre autres de caractériser la demande énergétique d'un secteur de production ou d'estimer les dégâts écologiques associés (les impacts environnementaux étant majoritairement proportionnels à la consommation d'énergie). Certaines infrastructures étant communes à la production de pétrole et de gaz, il est usuel de ne retenir qu'un seul indicateur pour la production des deux sources d'énergie.

2• **L'EROI au point d'utilisation (ou final)** comprend en plus l'énergie consommée pour le traitement et

la livraison de l'énergie. Il est préférable de comparer des sources d'énergie au point d'utilisation, car les processus de traitement ou de livraison peuvent être particulièrement énergivores. Par exemple, les EROI au point d'utilisation des liquides pétroliers sont historiquement stables, quand bien même les EROI standard ont drastiquement décliné. Il est toutefois important de distinguer le type d'utilisation finale (thermique ou électrique) des vecteurs énergétiques et d'inclure les externalités non négligeables (besoin de stockage, procédé de capture et séquestration de carbone, etc.) pour s'assurer que la comparaison fait sens. Il convient également de noter que l'inclusion du stockage dans le périmètre du système (plutôt qu'au niveau d'une technologie de production d'électricité individuelle) est toutefois plus pertinente au niveau d'un pays, d'une région ou d'un réseau, étant donné que chaque technologie, si elle était déployée isolément, nécessiterait une certaine capacité de stockage pour réussir à suivre l'évolution de la demande d'électricité. En somme, la prise en compte de la mutualisation des infrastructures de stockage donne des résultats d'évaluation d'EROI plus réalistes.

&gt;&gt;&gt;



### 1. EROIs harmonisés au point d'utilisation pour l'électricité.

Les plages de données reportées comprennent des estimations faites à des époques et lieux différents. La signification de PEeta d'un EROI harmonisé est précisée dans l'encadré, p. 36.

BECCS = "bioenergy with carbon capture and sequestration" (bioénergie avec systèmes de captage et de séquestration du carbone) ;

CSP = "concentrating solar power" (énergie solaire à concentration).

(Figure adaptée de D.J. Murphy *et al.* [6]).

>>>

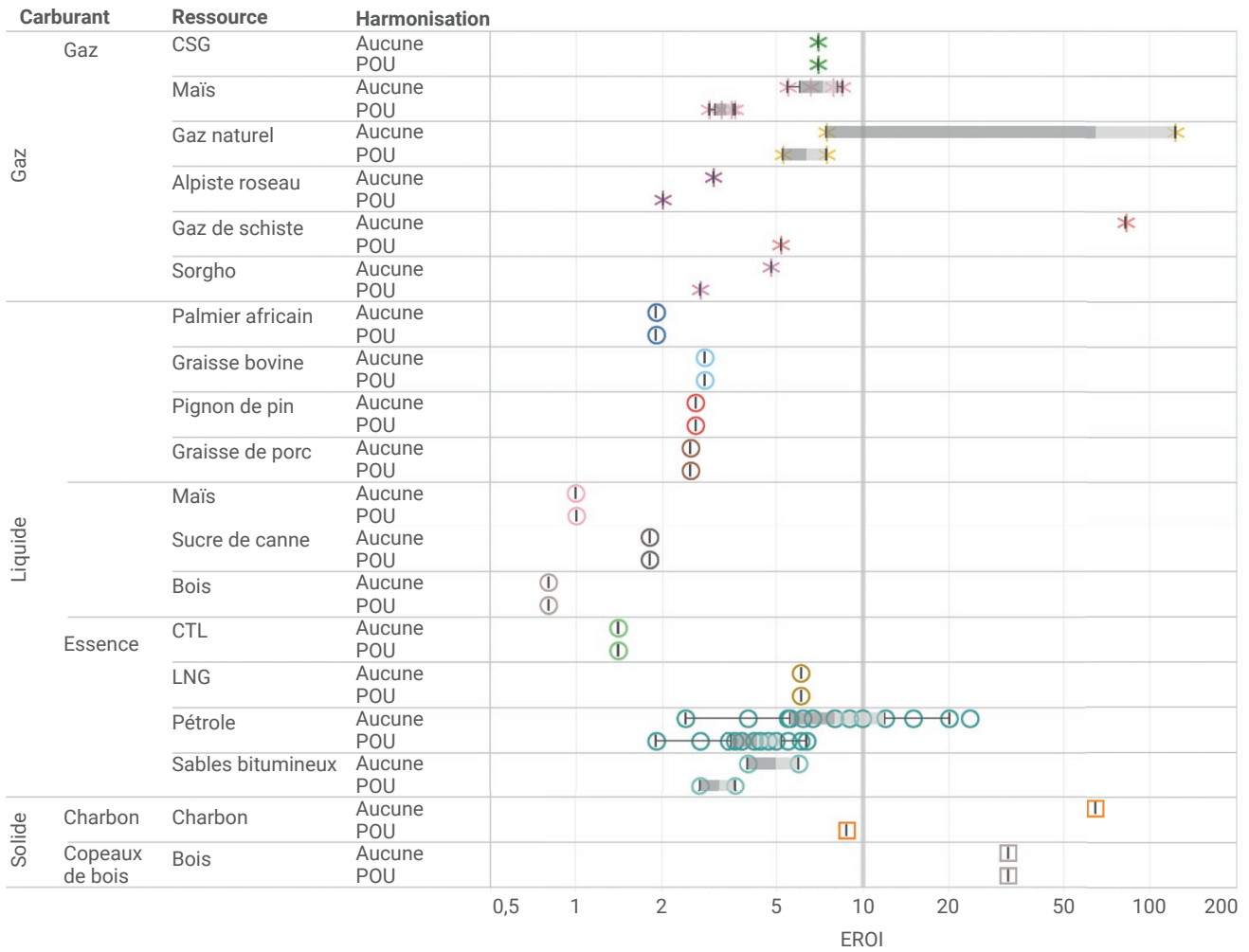
Il ressort de cette brève présentation que comparer des EROI sans (i) préciser un cadre spatial et énergétique clair et commun ; (ii) adjoindre une analyse temporelle et/ou géographique ; (iii) apporter des marges d'erreurs ou incertitudes ; (iv) utiliser les études les plus récentes disponibles où ne sélectionner qu'un échantillon précis ; (v) mettre en perspective les conclusions obtenues avec celles résultant d'une analyse faite par le prisme d'un EROI au périmètre différent (par exemple en se restreignant à l'EROI standard), peut donner lieu à des conclusions incomplètes, voire incorrectes.

En ce sens, l'étude publiée par G. Bonhomme et J. Treiner (« Le taux de retour en énergie (EROI) et son importance dans l'évaluation des performances des systèmes énergétiques »), parue en février 2024 dans le numéro spécial 77 de *Reflets de la physique* sur l'énergie (pp. 24 à 29) paraît problématique, car elle retranscrit les résultats d'une seule étude datant de 2014 et âprement critiquée par la communauté, sans mentionner les développements récents et importants, tant sur le plan méthodologique que quantitatif des calculs des EROI.

### Consensus et implications des EROIs pour la transition bas-carbone

La littérature sur les EROIs est à la fois riche et incomplète, ce qui rend délicates les comparaisons entre énergies fossiles et renouvelables, d'autant que certaines technologies évoluent vite. Un consensus se dessine toutefois au sein de la communauté de l'AEN [3], qui conclut que :

- 1• L'EROI standard du pétrole est inférieur à celui du gaz, qui est lui-même inférieur à celui du charbon.



**2. EROIs harmonisés au point d'utilisation pour un usage thermique.**

POU fait référence à une harmonisation au point d'utilisation final, dont la signification est précisée dans l'encadré, p. 36. CSG = "coal seam gas" (gaz piégé au cœur du charbon) ; CTL = "coal to liquids" (liquéfaction du charbon) ; LNG = "liquefied natural gas" (gaz naturel liquéfié). (Figure adaptée de D.J. Murphy *et al.* [6]).

- 2• Les combustibles fossiles non conventionnels peuvent avoir des EROIs standard inférieurs ou supérieurs aux combustibles conventionnels [4, 5].
- 3• L'EROI global des combustibles fossiles au point d'utilisation diminue avec le temps, bien qu'à un rythme lent, car l'investissement le plus important n'est pas l'énergie requise pour l'extraction, mais l'énergie subséquente requise pour le traitement et la distribution.
- 4• L'EROI standard des combustibles fossiles augmente initialement à mesure que la technologie d'extraction s'améliore, mais baisse

ensuite en raison de l'épuisement progressif des réserves les plus facilement accessibles.

- 5• Les énergies renouvelables électriques affichent un EROI au point d'utilisation souvent plus élevé que les combustibles fossiles lorsque ces derniers sont utilisés pour produire de l'électricité [6, 7], même lorsque ledit EROI intègre les besoins énergétiques pour les technologies de stockage à court terme. Des disparités régionales importantes existent cependant, entraînant un large éventail de valeurs possibles (fig. 1).

6• Les énergies renouvelables thermiques (sauf la biomasse sous forme de plaquettes) présentent des EROIs inférieurs à ceux des énergies fossiles lorsque celles-ci sont utilisées directement [6] (fig. 2).

- 7• Les EROIs au point d'utilisation du nucléaire et de l'hydroélectricité sont élevés, mais restent incertains en raison du peu d'études existantes et de la dépendance importante des résultats vis-à-vis de l'hypothèse de localisation. Ces sources ne semblent pas non plus pouvoir être généralisées ou déployées assez rapidement à l'échelle mondiale pour relever à elles seules les défis de la

>>>

## ➤ HARMONISATION DE L'EROI DE DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE

Le facteur PEeta intervenant dans la figure 1 fait référence à une « énergie primaire harmonisée » des valeurs d'EROI, dépendant du mix énergétique primaire de la production électrique. Ces valeurs sont obtenues en définissant dans un premier temps l'EROI de l'électricité produite, puis en remontant à une énergie primaire moyenne équivalente à l'aide de l'efficacité moyenne du réseau (qui dépend de son mix énergétique). La figure 2 fait également intervenir une harmonisation.

Avant de définir formellement en quoi ces harmonisations consistent, il convient de clarifier un point de vocabulaire qui est source de confusion : les physiciens et la communauté des chercheurs travaillant sur les questions d'EROI n'appellent pas énergie primaire la même chose. La littérature de l'EROI distingue une « source d'énergie primaire » (pétrole sous terre, vent, irradiation solaire) et une « énergie primaire », c'est-à-dire la ressource après extraction. Dans le cas du pétrole, il s'agit du pétrole à la tête de puits. Dans le cas de l'éolien ou du solaire, il s'agit de l'électricité en sortie d'éolienne (courant alternatif variable en intensité et fréquence) ou de panneau photovoltaïque (courant continu). Elles doivent toutes être transformées pour obtenir une forme d'énergie utilisable (essence ou courant alternatif stabilisé à la fréquence du réseau).

### **Harmonisation pour une utilisation thermique** (voir la figure 2, p. 35)

C'est l'harmonisation la plus simple à définir et également la plus précise. L'EROI défini pp. 32-33 fait intervenir un investissement énergétique et une énergie restituée. La littérature varie énormément sur la définition des frontières spatiale et temporelle du système étudié. Les valeurs citées harmonisent celles extraites de la littérature pour utiliser la même frontière spatiale (point d'utilisation, et en excluant l'énergie d'extraction, comme précisé ci-dessus) et la même frontière temporelle (totalité du cycle de vie).

### **Harmonisation pour une utilisation électrique** (voir la figure 1, p. 34)

Dans le cas de la production d'électricité, en plus de l'harmonisation décrite, il faut comparer des énergies primaires (au sens de la communauté EROI) comparables. Cette seconde harmonisation fait intervenir la notion d'énergie primaire équivalente.

Pour une énergie primaire donnée (par exemple le photovoltaïque,  $ph$ ), on part de l'EROI « électrique »,  $el$  :

$$EROI_{el} = E_{rest,ph} / E_{inv,ph}$$

On introduit ensuite l'efficacité annuelle moyenne du réseau électrique (dépendante du mix d'énergies primaires utilisé) :

$$\eta_G = (\text{énergie annuelle électrique produite}) / (\text{énergie annuelle utilisée pour faire fonctionner le réseau}).$$

Cette efficacité implique donc des puissances moyennes annuelles, et le périmètre de l'énergie utilisée n'est pas celui du cycle de vie.

On définit alors un EROI « équivalent énergie primaire » :

$$EROI_{pe-eq} = EROI_{el} / \eta_G$$

et, corrélativement, une énergie primaire équivalente à l'énergie électrique produite par le photovoltaïque (ou tout autre forme d'énergie primaire au sens de la communauté EROI) :

$$E_{ph,pe-eq} = E_{rest,ph} / \eta_G$$

La justification de cette définition n'est pas évidente. Elle traduit à notre sens un état non abouti d'harmonisation des énergies primaires dans la communauté EROI, qui résulte de l'extrême difficulté pratique à obtenir la quantité qu'il serait logique de vouloir obtenir à partir des données accessibles, à savoir l'énergie primaire elle-même (avec la définition de la communauté) et l'EROI associé pour la production d'électricité (et donc au point d'utilisation de l'électricité, en négligeant les pertes en ligne sur le réseau) pour chaque forme d'énergie primaire disponible. Les valeurs basse et haute de  $\eta_G$  utilisées dans cet exercice, de même que les EROIs associés, n'ont donc pas pour l'instant vocation à être très précises en terme d'énergie primaire, mais sont indicatives (disons à 50% près pour fixer les idées).

transition énergétique. Dans le cas de l'énergie nucléaire, des préoccupations supplémentaires apparaissent si l'on considère la gestion des déchets et les problèmes éventuels de prolifération.

- 8• Un déploiement rapide et à grande échelle des énergies renouvelables et des infrastructures associées est susceptible de réduire temporairement le PROI du système énergétique, dû aux investissements énergétiques initiaux [8].

Les technologies renouvelables paraissent plus compétitives, car (i) il est probable que leur EROI va continuer d'augmenter grâce aux améliorations technologiques espérées et au faible impact de la baisse de la teneur des gisements en minéraux stratégiques (et donc de la hausse future des besoins énergétiques pour l'extraction) [9]; (ii) leur EROI au stade utile de l'utilisation de l'énergie, c'est-à-dire au stade où l'énergie est effectivement échangée contre des services énergétiques, semble bien supérieur à ceux des combustibles fossiles [10].

Certains de ces points permettent de mettre en exergue trois risques liés à la transition bas-carbone. Premièrement, la baisse rapide des EROIs au point d'extraction des liquides pétroliers et du gaz peut conduire à une hausse des prix importante. Deuxièmement, une baisse du PROI du système énergétique dans son ensemble pourrait avoir des conséquences macroéconomiques néfastes, comme une baisse du prix des actifs et, dans le cas où le prix de l'énergie augmente, une récession, stagnation, stagflation et augmentation des inégalités, intra et internationales [8]. Enfin, le recours au charbon (motivé par son grand EROI) dans un contexte de décline énergétique subie pourrait aggraver les dégâts écologiques et climatiques auxquels le monde devra faire face (ce commentaire s'applique dans une moindre mesure à la biomasse, liée notamment à la déforestation).

La sobriété apporte ici un élément de réponse essentiel. Plus nous diminuons nos besoins matériels tout en conservant un confort suffisant, plus bas sera l'EROI que pourrait nécessiter

notre société. Les dégâts écologiques seraient aussi réduits, et l'ajustement de nos modes de vie dans les limites planétaires pourrait s'opérer plus facilement et justement.

## Conclusion

La prise en compte des contraintes énergétiques est cruciale pour évaluer et concevoir des scénarios de transition énergétique. Pourtant, en partie à cause de l'émergence tardive de résultats robustes dans la littérature sur l'EROI, cette prise en compte n'a pas encore dépassé la communauté de l'Analyse Énergétique Nette. Nous avons donc tenté ici d'aborder cette question en soulignant le consensus émergeant sur l'EROI, en explorant les domaines clés en cours d'investigation, et en discutant des implications de l'EROI sur la transition.

Notre article souligne que les contraintes mises en lumière par l'EROI peuvent limiter l'énergie disponible pour investir dans l'infrastructure énergétique. Comme ces contraintes sont susceptibles de s'aggraver avec le temps en raison de tensions sur les flux d'énergies fossiles, notamment pétroliers, les pays qui tarderaient à agir, dans un contexte de concurrence pour l'approvisionnement en énergie, pourraient compromettre leur capacité à mener à bien une transition énergétique. Cette situation politique pourrait être particulièrement déstabilisante pour les pays en voie d'industrialisation, qui risqueraient de rester à la porte de la transition énergétique, tout en étant parmi les moins responsables et les plus touchés par le changement climatique. ■



- 1• C.A.S. Hall, "Energy Return on Investment – A Unifying Principle for Biology, Economics, and Sustainability", *Lecture Notes in Energy* **36** (2017), Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47821-0>
- 2• D.J. Murphy *et al.*, "Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels", *Sustainability*, **3** (2011) 1888-1907. <https://doi.org/10.3390/su3101888>
- 3• L. Delannoy *et al.*, "Emerging consensus on net energy paves the way for improved integrated assessment modeling", *Energy & Environmental Science*, **17** (2024) 11–26. <https://doi.org/10.1039/d3ee00772c>
- 4• L. Delannoy *et al.*, "Peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective", *Applied Energy*, **304** (2021) 117843. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117843>
- 5• L. Delannoy *et al.*, "Assessing Global Long-Term EROI of Gas: A Net-Energy Perspective on the Energy Transition", *Energies*, **14** (2021) 5112. <https://doi.org/10.3390/en14165112>
- 6• D.J. Murphy *et al.*, "Energy Return on Investment of Major Energy Carriers: Review and Harmonization", *Sustainability*, **14** (2022) 7098. <https://doi.org/10.3390/su14127098>
- 7• A. Slameršak *et al.*, "Energy requirements and carbon emissions for a low-carbon energy transition", *Nature Communications* **13** (2022) 6932. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33976-5>
- 8• P. Jacques *et al.*, "Assessing the economic consequences of an energy transition through a biophysical stock-flow consistent model", *Ecological Economics*, **209** (2023) 107832. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107832>
- 9• E. Aramendia *et al.*, "Exploring the effects of mineral depletion on renewable energy technologies net energy returns", *Energy*, **290** (2024) 130112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130112>
- 10• E. Aramendia *et al.*, "Estimation of useful-stage energy returns on investment for fossil fuels and implications for renewable energy systems", *Nature Energy* (2024). <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01518-6>