



Évolution historique et tendancielle de l'EROI du pétrole et du gaz

Louis Delannoy, Emmanuel Aramendia, Pierre-Yves Longaretti, Emmanuel Prados

► To cite this version:

Louis Delannoy, Emmanuel Aramendia, Pierre-Yves Longaretti, Emmanuel Prados. Évolution historique et tendancielle de l'EROI du pétrole et du gaz. *Annales des mines - Série Responsabilité et environnement*, 2023, pp.1-12. <10.3917/re1.111.0044>. <hal-04262020>

HAL Id: hal-04262020

<https://hal.science/hal-04262020v1>

Submitted on 27 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

Évolution historique et tendancielle de l'EROI du pétrole et du gaz

Par Louis DELANNOY, Emmanuel ARAMENDIA,
Pierre-Yves LONGARETTI et Emmanuel PRADOS

Équipe de recherche STEEP (laboratoire Jean Kuntzmann, INRIA Grenoble)

Au fur et à mesure de leur exploitation, les combustibles fossiles deviennent plus difficiles d'accès et nécessitent plus d'énergie pour être extraits. La baisse continue de l'EROI du pétrole et du gaz semble dès lors préoccupante, étant donné que ces deux sources d'énergie représentent encore 52 % de la consommation énergétique globale. Toutefois, ces ratios sont mesurés au stade de l'énergie primaire et devraient plutôt être estimés au stade final ou utile, où l'énergie est au plus proche de la réalité des processus économiques. En suivant ce principe, les EROI des combustibles fossiles sont déjà aujourd'hui comparables voire inférieurs à ceux des énergies renouvelables, y compris lorsque des technologies de stockages d'énergie de court-terme sont intégrées au calcul. Ce résultat fait partie du consensus émergent de la communauté scientifique d'analyse énergétique nette, mais sa dissémination se heurte aux fréquents malentendus sur l'EROI hérités de l'absence de méthodologie formelle avant les années 2010. Pour remédier à cette situation, nous résumons les diverses étapes ayant mené à l'aboutissement de ce consensus émergent, présentons l'EROI du pétrole et du gaz au stade primaire, final et utile de 1971 à 2019, et discutons les implications vis-à-vis de la transition bas-carbone.

As fossil fuels are exploited, they become more difficult to access and require more energy to extract. The continued decline in the EROI of oil and gas is therefore of concern, as these two energy sources still account for 52% of global energy consumption. However, these ratios are measured at the primary energy stage and should rather be estimated at the final or useful stage, where the energy is closest to the reality of economic processes. Following this principle, the EROI of fossil fuels are today comparable to or even lower than those of renewable energies (including short-term energy storage technologies in the calculation). This is part of the emerging consensus of the net energy analysis community, but its dissemination is hampered by frequent misunderstandings about EROI inherited from the lack of a formal methodology before the 2010s. To address this, we present the various steps that led to this emerging consensus, synthesize the EROIs of oil and gas at the primary, final, and useful stages from 1971 to 2019, and discuss the implications for the low-carbon transition.

CONTEXTUALISATION

La question du ratio de la quantité d'énergie nécessaire pour produire un baril de pétrole ou un mètre cube de gaz, par rapport à l'énergie fournie à la société lors de

leur utilisation, préoccupe la communauté scientifique depuis les années 1980. L'EROI correspond à l'inverse de ce ratio, divisant la production totale d'énergie par l'apport d'énergie dans le système devant être consommée pour produire cette énergie. Si l'une des premières mentions est à mettre au crédit de M.K. Hubbert¹, à qui nous devons la théorie du pic pétrolier, le sujet est rapidement repris et développé en profondeur par Cutler Cleveland, Robert Costanza, Charlie Hall, et Robert Kaufman. Ces derniers sont les premiers à estimer le rendement énergétique de la production pétrolière aux États-Unis (Cleveland *et al.*, 1984) et l'énergie nette des ressources en gaz dans le golfe du Mexique (Cleveland et Costanza, 1984). Cleveland poursuit ce travail en examinant le schéma général de l'extraction du charbon et des ressources pétrolières, et l'EROI qui en découle de 1954 à 1997 (Cleveland, 1992), puis en actualisant les calculs pour le pétrole aux États-Unis de 1954 à 1987 (Cleveland, 2005).

C'est à la même époque, et sous l'impulsion de Charles Hall, que la communauté d'analyse énergétique nette commence à se montrer plus active dans l'application et la dissémination du concept d'EROI, comme en témoignent les propositions de méthodologie formelle et nomenclature unifiée par Mulder et Hagens (2008) et Murphy *et al.* (2011). Cet effort se voit renforcé par la montée en puissance du débat sur le pic pétrolier et la crise financière mondiale – qui peut être relié à la stagnation de la production de pétrole conventionnel (Hamilton, 2009) – catalysant la publication de nombreux travaux² par de nouveaux auteurs. Notons par exemple la modélisation de l'EROI et de la production énergétique nette du pétrole offshore dans le golfe du Mexique (Gately, 2007), et la première évaluation de l'EROI mondial du pétrole et du gaz à la tête du puits entre 1992 et 2006 (Gagnon, 2009).

Un élément fondateur pour la structuration de la communauté est l'édition spéciale sur l'EROI dans le journal *Sustainability* en 2011, où les analyses sur le pétrole et le gaz sont nombreuses. Citons notamment Brandt (2011), qui explore la production énergétique nette du pétrole en Californie de 1955 à 2005 ; Guilford *et al.* (2011), qui évaluent l'EROI à long terme pour le pétrole et le gaz américains ; Moerschbaeche & Day Jr. (2011), qui calculent l'EROI de la production de pétrole et de gaz dans les eaux profondes du golfe du Mexique en 2009 ; et Sell, Murphy & Hall (2011), qui examinent l'EROI des puits de gaz de réservoir étanche dans le bassin des Appalaches. Cette première salve de travaux est suivie dans l'édition suivante du même journal par une estimation de l'EROI de la production conventionnelle de gaz naturel au Canada (Freise, 2011), du schiste bitumineux (Cleveland et O'Connor, 2011), de la production d'hydrates de méthane (Callarotti, 2011) et du pétrole et gaz norvégiens de 1991 à 2008 (Grandell, Hall et Höök, 2011). *Sustainability* continue de publier régulièrement des analyses d'EROI, comme celle du champ pétrolifère de Daqing en Chine (Hu *et al.*, 2011) mais fait face à une concurrence accrue d'autres journaux comme *Energy Policy* du fait de la meilleure compréhension de l'EROI par la communauté scientifique au sens large.

¹ « Cependant, il existe un coût différent et plus fondamental [à la production de pétrole] qui est indépendant du prix monétaire. Il s'agit du coût énergétique de l'exploration et de la production. Tant que le pétrole est utilisé comme source d'énergie, lorsque le coût énergétique de la récupération d'un baril de pétrole devient supérieur au contenu énergétique du pétrole, la production cessera, quel que soit le prix monétaire », Réponse aux remarques de David Nissens, traduction par nos soins.

² Voir par exemple Hall, Powers et Schoenberg (2008).

Les années 2010 connaissent une profusion de travaux ayant trait à l'EROI du pétrole et du gaz à diverses échelles géographiques et temporelles, revue par Delannoy *et al.* (2021a, 2021b). La grande majorité s'attarde toutefois à estimer l'EROI des processus d'extraction, sans prendre en compte toute la chaîne de conversion et de distribution³. Ce manque est comblé à l'échelle globale par Brockway *et al.* (2019), qui estiment l'EROI primaire (à l'extraction) et final (à la distribution) des combustibles fossiles baissant respectivement de 40 à 30 et de 7 à 6, de 1995 à 2011. Ce résultat novateur, salué pour sa rigueur, remet en question la supposée primauté de l'EROI des fossiles sur celui des renouvelables et ce faisant, se heurte à une frange d'utilisateurs avertis de l'EROI mais n'ayant pas suivi les récents développements au sein de la communauté scientifique. Afin d'y répondre, celle-ci se mobilise et établit une liste de 9 points faisant partie du consensus émergent (Delannoy *et al.*, 2023), dont quatre concernent le pétrole et le gaz :

- l'EROI primaire du pétrole est inférieur à celui du gaz, qui est lui-même inférieur à celui du charbon. Les deux premiers sont en baisse constante depuis les années 1950 en raison de l'épuisement progressif des réserves les plus facilement accessibles ;
- les combustibles fossiles conventionnels tendent à avoir un EROI primaire inférieur à celui du gaz et du pétrole de réservoirs étanches produits par fracturation, mais supérieur à celui d'autres combustibles non conventionnels (sables bitumineux, huile de schiste extraite, méthane de houille, etc.) ;
- l'EROI primaire des ressources énergétiques fossiles s'améliore dans un premier temps au fur et à mesure que la technologie se développe, avant de diminuer en raison d'une baisse de la qualité de la ressource extraite⁴ ;
- l'EROI agrégé des combustibles fossiles au point d'utilisation diminue au fil du temps, bien qu'à un rythme lent. Ceci est dû au fait que l'investissement énergétique le plus important n'est pas l'énergie nécessaire à l'extraction, mais l'énergie ultérieure nécessaire au traitement et à la livraison – qui est largement indépendante du type de pétrole ou de gaz pour chacune de ces deux catégories de combustible fossile (ce point est explicité plus en détail dans la partie intitulée Stades final et utile).

Un autre point du consensus émergent souligne qu'aujourd'hui, l'EROI au point d'utilisation de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles est souvent inférieur à celui de l'électricité d'origine photovoltaïque, éolienne et hydraulique, même

³ Il est de plus en plus important de se concentrer sur le point d'utilisation car : (i) les besoins énergétiques du traitement, du raffinage et d'autres processus en aval des combustibles fossiles peuvent être plus importants que ceux de leur extraction, et (ii) la plupart des systèmes d'énergie renouvelable fournissent directement des vecteurs énergétiques finaux, généralement de l'électricité, ce qui rend l'analyse au stade de l'énergie finale essentielle pour comparer les systèmes d'énergie renouvelable et les systèmes d'énergie fossile.

⁴ Par exemple, l'EROI standard du brut issu des sables bitumineux a augmenté depuis que les premières mines produisant du bitume sont devenues opérationnelles (Guay-Boutet, 2023). Au contraire, de nombreux grands gisements de pétrole conventionnel ont déjà connu des baisses marquées de leur EROI standard en raison des exigences de la récupération assistée et de l'épuisement global des ressources, comme le montre le déclin de la quantité des réserves « 2P » (prouvées et probables) restantes (Laherrère, Hall et Bentley, 2022).

lorsque les besoins énergétiques des technologies de stockage à court terme sont pris en compte (Raugei *et al.*, 2020 ; Slameršak *et al.*, 2022). La comptabilisation des besoins énergétiques liés aux dispositifs de stockage est toutefois plus pertinente au niveau du système énergétique d'un pays ou d'une région qu'au niveau d'une technologie de production d'électricité individuelle, car chaque technologie, si elle était déployée isolément, nécessiterait une certaine capacité de stockage pour réussir à suivre la demande d'électricité (Raugei *et al.*, 2015 ; Carbajales-Dale *et al.*, 2015).

Un dernier aspect essentiel concerne l'extension de l'analyse au stade utile de l'utilisation de l'énergie (Aramendia *et al.*, 2021), c'est à dire au stade où l'énergie est effectivement échangée contre des services énergétiques, qui dépend de l'efficacité du dispositif d'utilisation finale utilisé (voir Figure 1). En effet, des vecteurs énergétiques différents peuvent être utilisés pour des utilisations finales similaires avec des efficacités finales très différentes. Par exemple, l'efficacité du moteur d'un véhicule électrique (fourchette 86-96 %) a une efficacité bien supérieure à celle d'un véhicule à combustion interne traditionnel (fourchette 21-35 %) (Paoli et Cullen, 2020). Une étude récente (Aramendia *et al.*, 2023) montre que la prise en compte de ces efficacités de conversion de l'énergie finale en utile est essentielle pour comprendre l'EROI « effectif » des énergies fossiles, que nous explorerons dans la suite. Cette étude montre aussi que la prise en compte de ces efficacités est cruciale pour comparer les énergies renouvelables, qui vont majoritairement produire de l'électricité, aux énergies fossiles, en général utilisées avec des efficacités bien plus basses.

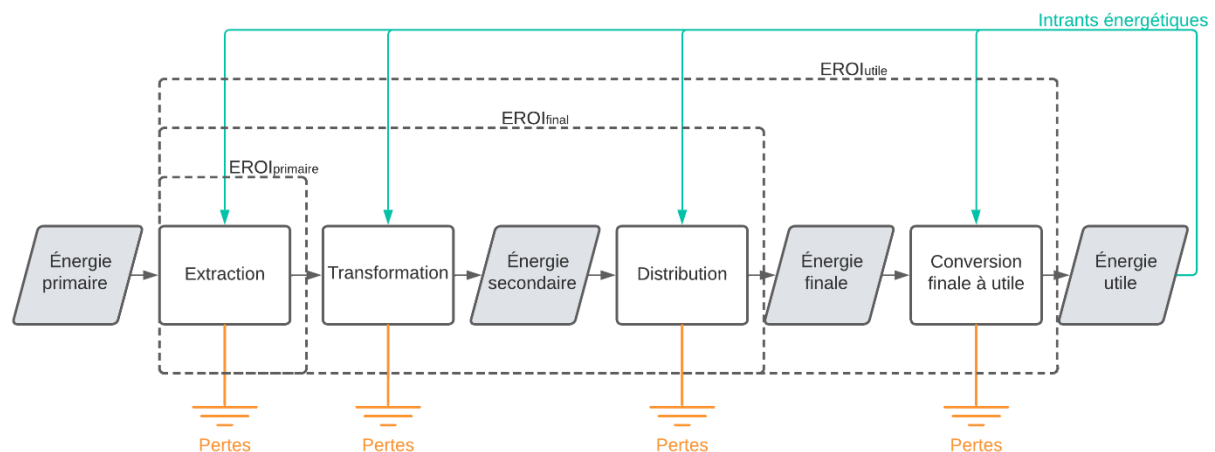


Figure 1. EROI au stade primaire (EROIprimaire), au point d'utilisation (EROIfinal) et utile (EROIutile). L'élargissement du cadre considéré réduit généralement l'EROI, tout en accentuant les incertitudes (Source : Adapté de Delannoy *et al.*, 2023).

DONNEES HISTORIQUES

Nous montrons ici l'évolution historique, au niveau mondial, de l'EROI du pétrole et du gaz, basée sur une méthodologie issue des tableaux entrées-sorties (*input-output tables*) (Aramendia *et al.*, 2022) appliquée au flux énergétiques (physiques) rapportés par l'Agence Internationale de l'Énergie (voir Aramendia *et al.*, 2023 pour plus de détails).

Stade primaire – déclin de l'EROI

La Figure 2 montre l'évolution historique, au niveau mondial, de l'EROI du pétrole et du gaz au stade primaire – l'évolution ne peut pas être séparée de manière rigoureuse en termes de pétrole et gaz avec les données de l'Agence Internationale de l'Énergie, celles-ci étant agrégées. Cependant, étant donné que l'extraction du pétrole et du gaz a souvent lieu de manière conjointe, le calcul d'un EROI moyen conjoint reste une hypothèse raisonnable.

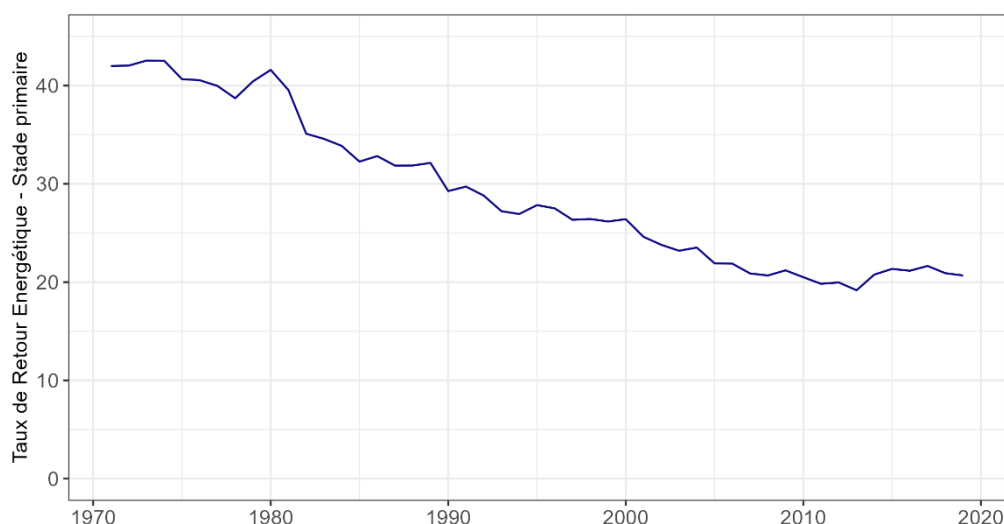


Figure 2. Taux de retour énergétique moyen, au stade primaire, du pétrole et du gaz au niveau mondial (1971-2019) (Source : Aramendia *et al.*, 2023).

Conformément à l'idée reçue de déclin du taux de retour énergétique au fur et à mesure du déclin de la qualité des ressources, l'EROI moyen a bien fortement diminué depuis 1971, d'une valeur d'environ 40 à une valeur d'environ 20, soit un doublement des besoins énergétiques à l'extraction. Notons aussi que depuis l'essor de l'exploitation du pétrole et du gaz de roche-mère (aussi dits 'de schiste'), l'EROI moyen s'est stabilisé. La longévité de ce plateau est toutefois questionnée du fait de l'exploitation accrue d'autres formes de liquides pétroliers ou de gaz non conventionnels à EROI plus faible (Delannoy *et al.*, 2021a ; 2021b).

Stades final et utile : une dynamique moins évidente

La Figure 3 montre l'évolution historique, au niveau mondial, de l'EROI du pétrole et du gaz aux stades final et utile, tous vecteurs énergétiques confondus (combustibles et électricité).

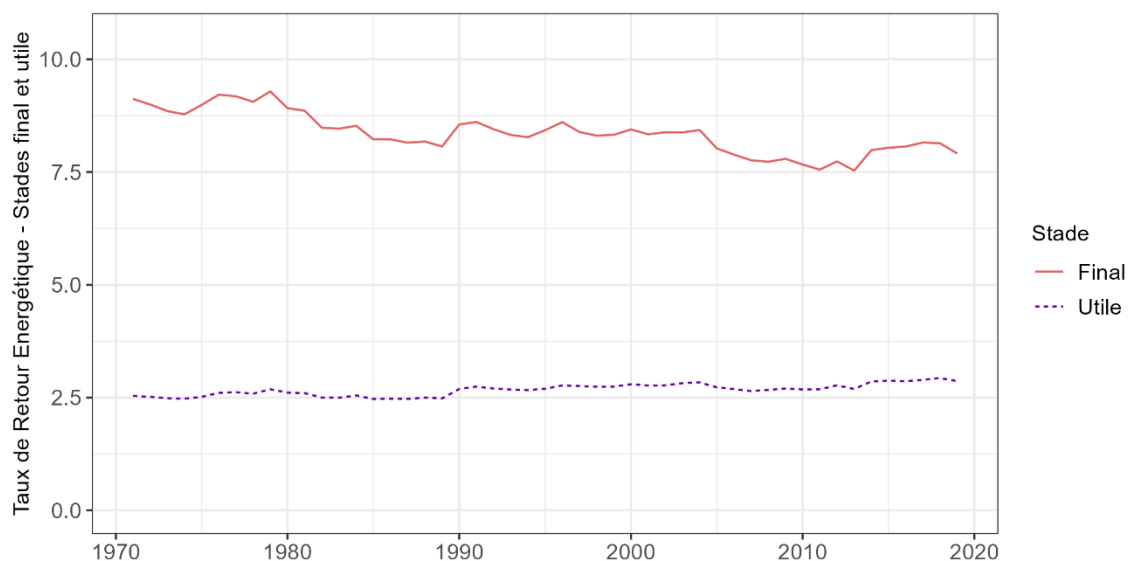


Figure 3. Taux de retour énergétique moyen, aux stades final et utile, du pétrole et du gaz au niveau mondial (1971-2019) (Source : Aramendia *et al.*, 2023).

L'EROI au stade final a bien décliné au cours du temps, mais de manière bien moins marquée qu'au stade de l'énergie primaire ; d'environ 9,9 en 1971 à environ 8,6 en 2019, ce qui correspond à une augmentation des besoins énergétiques de 15 %. Le fait que l'EROI au stade final diminue bien moins qu'au stade primaire est dû au fait que les phases de transformation de l'énergie primaire en énergie finale sont les plus demandeuses d'énergie, particulièrement dans le cas du pétrole pour lequel la raffinerie constitue de loin le procédé le plus énergivore (Brandt, 2011 ; Yáñez *et al.*, 2018) – de l'ordre de 80-90 % de la consommation énergétique. Cela implique que i) un EROI primaire en forte diminution a une influence modérée sur l'EROI final, et ii) une augmentation de l'efficacité énergétique (même modérée) dans le procédé de conversion de l'énergie primaire en énergie finale peut compenser dans une certaine mesure une diminution de l'EROI primaire.

Par exemple, pour que l'EROI au stade final diminue jusqu'à 5 (soit une augmentation des besoins énergétiques de 72 %), et en supposant une efficacité énergétique des procédés de transformation de l'énergie primaire en finale (raffinerie, etc.) constante, l'EROI au stade primaire devrait chuter de sa valeur actuelle d'environ 20 à une valeur d'environ 7,5, soit une augmentation des besoins énergétiques à l'extraction primaire de 167 %, alors que ceux-ci ont mis 5 décennies (1971-2019) à doubler. De plus, l'efficacité énergétique des procédés de transformation de l'énergie primaire en énergie finale a augmenté au cours du temps (par exemple, la consommation moyenne d'énergie par unité d'énergie raffinée a diminué d'environ 10 % de 1971 à 2019 d'après les données de l'Agence Internationale de l'Énergie), et continuera *a priori* à faire de même, mitigeant ainsi le risque posé par le déclin de l'EROI au stade primaire⁵.

⁵ À titre d'exemple, le ministère de l'Énergie américain estime que le potentiel de réduction de consommation d'énergie dans les raffineries du pays est de 13 % (meilleures technologies actuellement disponibles), et pourrait atteindre (au maximum absolu) 38 % avec de nouvelles technologies (US

Au sujet de l'EROI au stade utile, la Figure 3 montre deux éléments cruciaux. Premièrement, l'EROI utile est bien plus bas que l'EROI final (environ 2,7 en 2019). Cela est dû aux efficacités de conversion de l'énergie finale en énergie utile, qui sont en moyennes très basses pour les énergies fossiles. Deuxièmement, la figure montre que contrairement à ses équivalents aux stades primaires et final, l'EROI utile n'a pas diminué au cours du temps, mais a été relativement constant (dans la fourchette 2,5-2,7), malgré des besoins énergétiques en augmentation pour produire l'énergie finale. Cela est dû principalement aux efficacités de conversion de l'énergie finale en énergie utile qui ont légèrement augmenté au cours du temps. Aramendia *et al.* (2023) estiment notamment l'augmentation de l'efficacité moyenne de 51 à 74 % pour le gaz, et de 30 à 33 % en moyenne pour les produits pétroliers, pour les utilisations sous forme de combustible (hors électricité). Ces augmentations ont compensé la diminution de l'EROI aux stades primaire et final.

Les valeurs d'EROI au niveau de l'énergie utile cachent cependant des différences significatives. En effet, les utilisations du pétrole et du gaz diffèrent : le gaz (haut EROI final) est fortement utilisé dans les applications de chauffage et dans l'industrie, et les produits pétroliers (EROI final bien plus bas) sont majoritairement utilisés dans les applications de mobilité. Or, l'efficacité de conversion de l'énergie finale en utile varie selon l'utilisation ; par exemple, un moteur thermique présente une efficacité d'environ 30 % alors qu'une chaudière récente présente une efficacité d'environ 90 %. Comme illustré par la Figure 4, l'EROI sera bien plus élevé pour une utilisation sous forme de chaleur à basse température (par exemple chauffage résidentiel) que pour une utilisation dans un procédé industriel (par exemple métallurgique).

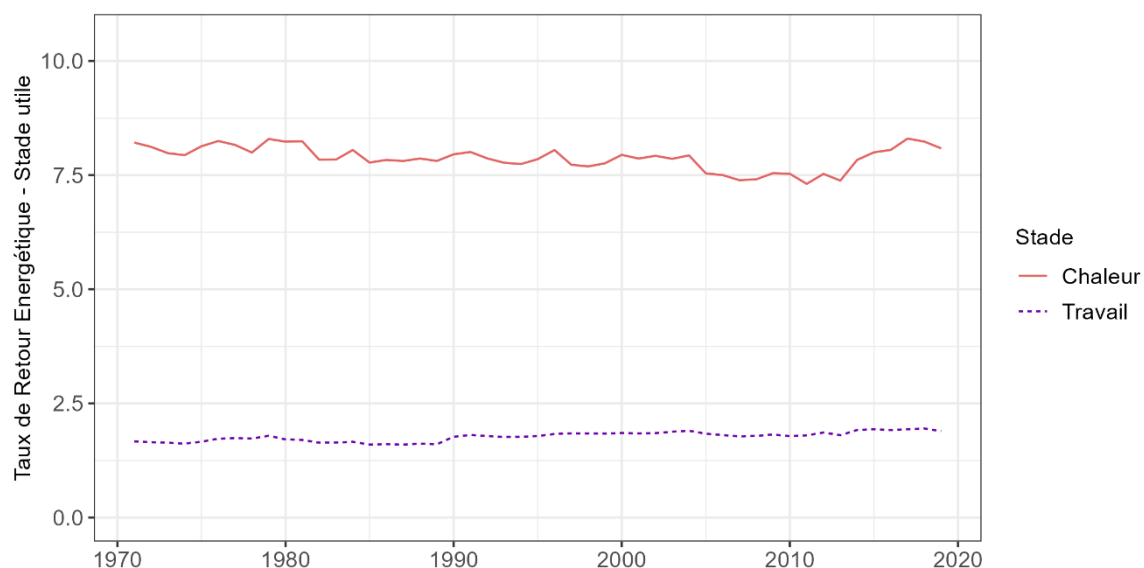


Figure 4. Taux de retour énergétique moyen, au stade utile, du pétrole et du gaz au niveau mondial (1971-2019), pour les utilisations en chaleur et en travail (Source : Aramendia *et al.*, 2023).

IMPLICATIONS DES EROI DU PETROLE ET DU GAZ SUR LA TRANSITION ENERGETIQUE

La sensibilité de l'EROI final du pétrole et du gaz (et *a fortiori*, au stade utile) vis-à-vis de l'EROI primaire est modérée : une diminution importante de l'EROI primaire est nécessaire pour entraîner un déclin notable de l'EROI final. De plus, aujourd'hui, l'EROI utile des énergies renouvelables est, contrairement aux idées reçues, supérieur en moyenne à celui des énergies fossiles (Aramendia *et al.*, 2023) ce qui suggère que la transition bas-carbone peut se révéler être bénéfique d'un point de vue de l'EROI agrégé (Slameršak *et al.*, 2022). *A priori* donc, la quantité d'énergie nette disponible au cours des prochaines années devrait être suffisante pour permettre l'investissement énergétique nécessaire à la transition (manufacture des technologies bas carbone, extension et modification des infrastructures existantes, etc.). L'EROI n'est toutefois qu'un aspect de la question car un choc énergétique structurel (notamment pour le pétrole, dont la fourniture est quasiment à flux tendu, avec très peu ou pas de marge d'augmentation de la production) pourrait réduire la fourniture d'énergie nette, et occasionner des conséquences macroéconomiques freinant la transition.

Dans un scénario de transition lente (incompatible avec les objectifs climatiques de l'accord de Paris de 2015), le déclin de l'EROI primaire du pétrole et du gaz peut toutefois avoir des effets importants, comme des augmentations à long terme des prix de l'énergie et des prix généraux (King et Hall, 2011 ; Heun et de Wit, 2012) ainsi qu'une faible croissance du PIB (Jackson et Jackson, 2021). En d'autres termes, la transition énergétique pourrait devenir plus difficile à réaliser si elle n'est pas amorcée suffisamment tôt, ce qui pourrait être source de tensions géopolitiques qui elles-mêmes ralentiraient la transition (Delannoy *et al.*, 2021a).

La baisse de l'EROI au stade primaire a cependant peu d'impacts pour les scénarios de transition rapide, qui font eux face aux importants investissements énergétiques initiaux colossaux (Capellán-Pérez *et al.*, 2019) pouvant donner lieu à des taux d'emploi et d'inflation élevés (Jacques *et al.*, 2022). Il apparaît donc nécessaire qu'une fraction importante de l'énergie utilisée soit redirigée vers ces investissements essentiels. La faisabilité d'une transition énergétique rapide et juste est par conséquent tributaire de l'abandon de certains usages non essentiels de l'énergie (par exemple, les avions), le passage à des chaînes de conversion plus efficaces (par exemple, le remplacement d'une voiture à essence par une voiture électrique ou un vélo) et plus globalement la réduction de la consommation discrétionnaire d'énergie, nécessaire afin d'éviter que l'augmentation de l'efficacité énergétique se traduise en hausse de la consommation d'énergie *via* l'effet rebond. Ce dernier point semble majeur étant donné les hypothèses d'efficacité énergétique des scénarios existants, décorréélées des tendances historiques tout comme de leur potentiel effet rebond (Brockway *et al.*, 2021). En ce sens, nous appelons à développer des scénarios alternatifs qui réalisent une convergence Nord-Sud permettant des conditions de vie décentes pour toutes et tous (Vogel *et al.*, 2021 ; Millward-Hopkins *et al.*, 2020) et cohérente d'un point de vue énergétique et des ressources, tout en étant compatible avec les objectifs climatiques de l'accord de Paris.

RÉFÉRENCES

ARAMENDIA E., BROCKWAY P. E., PIZZOL M. & HEUN M. K. (2021), "Moving from final to useful stage in energy-economy analysis: A critical assessment", *Applied Energy*, vol. 283, p. 116194.

ARAMENDIA E., BROCKWAY P., TAYLOR P., NORMAN J. & HEUN M. (2023), "Chapter 4: Estimation of fossil fuels useful stage energy return on investment and implications for renewable energy systems" in *Exploring the useful energy implications of the global energy transition: a net energy perspective*, PhD thesis, University of Leeds.

ARAMENDIA E., HEUN M., BROCKWAY P. & TAYLOR P. (2022), "Developing a multi-regional physical supply use table framework to improve the accuracy and reliability of energy analysis", *Applied Energy*, vol. 310, p. 118413.

BRANDT A. R. (2011), "Oil Depletion and the energy efficiency of oil production: The case of California", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 1833-1854.

BROCKWAY P. E., OWEN A., BRAND-CORREA L. 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, issue 7, pp. 612-621.

BROCKWAY P. E., SORRELL S., SEMIENIUK G., HEUN M. K. & COURT V. (2021), "Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, p. 110781.

CALLAROTTI R. C. (2011), "Energy return on energy invested (EROI) for the electrical heating of methane hydrate reservoirs", *Sustainability*, vol. 3, issue 11, pp. 2105-2114.

CAPELLÁN-PÉREZ, I., DE CASTRO, C., MIGUEL GONZÁLEZ, L.J. (2019), "Dynamic energy return on investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies", *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, issue 7, pp. 100399.

CARBAJALES-DALE M., RAUGEI M., FTHENAKIS V. & BARNHART C. (2015), "Energy return on investment (EROI) of solar PV: An attempt at reconciliation [point of view]", *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 103, issue 7, pp. 995-999.

CLEVELAND C. J. (1992), "Energy quality and energy surplus in the extraction of fossil fuels" in *the U.S. Ecological Economics*, vol. 6, issue 2, pp. 139-162.

CLEVELAND C. J. (2005), "Net energy from the extraction of oil and gas in the United States", *Energy*, vol. 30, issue 5, pp. 769-782.

CLEVELAND C. J., COSTANZA R., HALL C.A.S. & KAUFMANN R. (1984), "Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective", *Science*, vol. 225, issue 4665, pp. 890-897.

CLEVELAND C. J. Jr. & COSTANZA R. (1984), "Net energy analysis of geopressed gas resources in the U.S. Gulf Coast Region", *Energy*, vol. 9, issue 1, pp. 35-51.

CLEVELAND C. J. & O'CONNOR P. A. (2011), "Energy return on investment (EROI) of oil shale", *Sustainability*, vol. 3, issue 11, pp. 2307-2322.

DELANNOY L., LONGARETTI P.-Y., MURPHY D. J. & PRADOS E. (2021a), "Peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective", *Applied Energy*, vol. 304, p. 117843.

DELANNOY L., LONGARETTI P.-Y., MURPHY D. J. & PRADOS E. (2021b), "Assessing global long-term EROI of gas: A net-energy perspective on the energy transition", *Energies*, vol. 14, issue 16, p. 5112.

DELANNOY L., AUZANNEAU M., ANDRIEU B., VIDAL O., LONGARETTI P.-Y., PRADOS E., MURPHY D.J., BENTLEY R.W., CARBAJALES-DALE M., RAUGEI M., HÖÖK M., COURT V., KING C.W., FIZAIN F., JACQUES P., HEUN M.K., JACKSON A., GUAY-BOUTET C., ARAMENDIA E., WANG J. & HALL C.A.S. (2023), "Emerging consensus on net energy paves the way for improved integrated assessment modeling", Soumis à *Energy and Environmental Science*.

FREISE J. (2011), "The EROI of conventional Canadian natural gas production", *Sustainability*, vol. 3, issue 11, pp. 2080-2104.

GAGNON N., HALL C.A.S. & BRINKER L. (2009), "A preliminary investigation of energy return on energy investment for global oil and gas production", *Energies*, vol. 2, issue 3, pp. 490-503.

GATELY M. (2007), "The EROI of U.S. offshore energy extraction: A net energy analysis of the Gulf of Mexico", *Ecological Economics*, vol. 63, issues 2-3, pp. 355-364.

GUAY-BOUTET C. (2023), "Estimating the disaggregated standard EROI of Canadian oil sands extracted via open-pit mining, 1997–2016", *Biophysical Economics and Sustainability*, vol. 8, issue 1.

GUILFORD M. C., HALL C.A.S., O'CONNOR P. & CLEVELAND C. J. (2011), "A new long-term assessment of energy return on investment (EROI) for U.S. oil and gas discovery and production", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 1866-1887.

GRANDELL L., HALL C.A.S. & HÖÖK M. (2011), "Energy return on investment for Norwegian oil and gas from 1991 to 2008", *Sustainability*, vol. 3, issue 11, pp. 2050-2070.

HALL C.A.S., POWERS R. & SCHOENBERG W. (s. d.), "Peak oil, EROI, investments and the economy in an uncertain future" in *Biofuels, solar and wind as renewable energy systems*, pp. 109-132.

HAMILTON J.D. (2009), "Causes and consequences of the oil shock of 2007-08", Brookings Papers on Economic Activity.

HEUN M. K. & DE WIT M. (2012), "Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions", *Energy Policy*, vol. 40, pp. 147-158.

HU Y., FENG L., HALL C.A.S. & TIAN D. (2011), "Analysis of the energy return on investment (EROI) of the huge daqing oil field in China", *Sustainability*, vol. 3, issue 12, pp. 2323-2338.

JACKSON A. & JACKSON T. (2021), "Modelling energy transition risk: The impact of declining energy return on investment (EROI) ", *Ecological Economics*, vol. 185, pp. 107023.

JACQUES P., DELANNOY L., ANDRIEU B., YILMAZ D., JEANMART H. & GODIN A. (2022), "Assessing the economic consequences of an energy transition through a biophysical stock-flow consistent model", *SSRN Electronic Journal*.

KING C. W. & HALL C.A.S. (2011), "Relating financial and energy return on investment", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 1810-1832.

MILLWARD-HOPKINS J., STEINBERGER J.K., RAO N. D. & OSWALD Y. (2020), "Providing decent living with minimum energy: A global scenario", *Global Environmental Change*, vol. 65, pp. 1-10.

MOERSCHBAECHER M. & DAY JR. J. W. (2011), "Ultra-deepwater Gulf of Mexico oil and gas: Energy return on financial investment and a preliminary assessment of energy return on energy investment", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 2009-2026.

MULDER K. & HAGENS N. J. (2008), "Energy return on investment: Toward a consistent framework", *Ambio*, vol. 37, issue 2, pp. 74-79.

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

LAHERRERE J., HALL C.A.S. & BENTLEY R. (2022), "How much oil remains for the world to produce? Comparing assessment methods, and separating fact from fiction", *Current Research in Environmental Sustainability*, vol. 4, pp. 1-19.

PAOLI L. & CULLEN J. (2020), "Technical limits for energy conversion efficiency", *Energy*, vol. 192, p. 116228.

RAUGEI M., CARBAJALES-DALE M., BARNHART C., FTHENAKIS V. (2015), "Rebuttal: "Comments on 'Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants' – Making clear of quite some confusion"", *Energy*, vol. 82, pp. 1088-1091.

RAUGEI M., LECCISI E. & FTHENAKIS V. M. (2020), "What are the energy and environmental impacts of adding battery storage to photovoltaics? A generalized life cycle assessment", *Energy Technology*, vol. 8, issue 11, p. 1901146.

SELL B., MURPHY D. & HALL C.A.S. (2011), "Energy return on energy invested for tight gas wells in the Appalachian Basin, United States of America", *Sustainability*, vol. 3, issue 10, pp. 1986-2008.

SLAMERŠAK A., KALLIS G. & O'NEILL D. W. (2022), "Energy requirements and carbon emissions for a low-carbon energy transition", *In Nature Communications*, vol. 13, issue 1.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (2015), "Bandwidth study on energy use and potential energy saving opportunities in the U.S. petroleum refining".

VOGEL J., STEINBERGER J. K., O'NEILL D. W., LAMB W. F. & KRISHNAKUMAR J. (2021), "Socio-economic conditions for satisfying human needs at low energy use: An international analysis of social provisioning", *Global Environmental Change*, vol. 69, p. 102287.

YÁÑEZ E., RAMÍREZ A., URIBE A., CASTILLO E. & FAALIJ A. (2018), "Unravelling the potential of energy efficiency in the Colombian oil industry", *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 604-628.