

MOTS CLÉS

Énergie nette

EROI

Système
énergétique

Transition
énergétique

Croissance
économique

ÉNERGIE NETTE ET EROI

(ENERGY-RETURN-ON-INVESTMENT)

Une approche biophysique de la transition énergétique

Victor Court

Résumé

Dans ce document les concepts d'énergie nette et de taux de retour énergétique ou Energy-Return-On-Investment (EROI en anglais) sont présentés. L'importance de l'énergie nette dans l'évolution des systèmes biologiques et humains est brièvement discutée avant de présenter l'intérêt du concept d'EROI pour évaluer l'accessibilité d'une ressource d'énergie donnée. Ensuite, des valeurs d'EROI représentatives de chaque type d'énergie utilisée par les sociétés contemporaines sont présentées. Ceci permet par conséquent de discuter de l'impact d'une transition énergétique vers les énergies dites renouvelables en termes de contrainte d'énergie nette, d'épuisement des ressources, de prix de l'énergie et de la relation d'interdépendance qui lie le secteur de l'énergie à celui de l'extraction des métaux. Le document conclut sur la nécessité d'améliorer les connaissances actuelles sur la relation dynamique qui existe entre le EROI, le progrès technologique et la croissance économique.

Chaire Economie
du Climat

Palais Brongniart,

4ème étage

28 place de la

bourse

75002 PARIS

Victor COURT est doctorant à l'Université Paris Ouest Nanterre la Défense, et à l'Institut du Pétrole et des Énergies Nouvelles (IFPEN). Il est chargé de recherche dans l'initiative Transition Énergétique de la Chaire Economie du Climat.

Introduction

L'énergie est d'une importance primordiale pour les sociétés humaines. Comme tout autre système physique, un système économique a besoin d'un apport d'énergie de haute qualité (donc de faible entropie) qui est utilisée dans différents processus physiques par lesquels elle est dégradée en énergie de faible qualité (chaleur de haute entropie) (Georgescu-Roegen, 1971; Odum, 1971; Daly, 1985). De nombreux auteurs ont insisté sur le fait que ce sont en priorité les combustibles fossiles qui ont permis aux sociétés humaines de prendre le chemin de l'industrialisation puis de s'orienter progressivement vers les services, grâce à leurs abondances, leurs hautes concentrations et donc leurs faibles coûts énergétiques d'extractions (Hall et Klitgaard, 2012; Stern et Kander, 2012; Ayres et Voudouris, 2014). Mais les combustibles fossiles sont par définition non renouvelables puisqu'ils représentent des stocks finis, sujet sur lequel de nombreux auteurs ne cessent d'attirer l'attention (Hubbert, 1956; Laherrère, 2004; Campbell, 2013, 2015). Les combustibles fossiles sont en outre une source de pollution, l'impact des émissions de gaz à effet de serre sur le climat monopolisant le plus l'attention des chercheurs, des médias et de la société civile en général. Pour ces différentes raisons, la résilience des sociétés industrielles est remise en question et la nécessité d'opérer une transition vers des énergies dites renouvelables apparaît évidente. Cette transition énergétique, telle que proposée et discutée par de nombreux experts, consiste en un abandon progressif de l'exploitation des stocks de charbon, de pétrole et de gaz au profit d'une utilisation grandissante du flux d'énergie solaire disponible à la surface de la terre qui doit être converti en énergie utilisable par le biais d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques ou d'autres systèmes de concentration (CSP, biocarburants, etc.). Le système énergétique de demain devra également s'appuyer sur des gisements non solaire d'énergie renouvelable aux potentiels inférieurs, à savoir l'énergie géothermique et l'énergie disponible dans les océans sous formes de vagues, de marées et de chaleur diffuse. Il est clair qu'il n'existe pas une transition énergétique idéale à appliquer à tous les pays puisque chaque nation devra composer avec les potentiels d'énergies renouvelables de son environnement. Par ailleurs, la question de la place de l'énergie nucléaire dans une telle transition est évidemment polémique. Certains plaident pour un abandon de l'énergie nucléaire au même titre que les énergies fossiles puisque les technologies nucléaires actuelles reposent sur l'utilisation de stocks de matière fissile nécessairement finis¹, et que par ailleurs elles génèrent des déchets radioactifs dont le traitement reste non résolu à l'heure actuelle. D'autres argumentent cependant que l'énergie nucléaire n'émet pas ou très peu de gaz à effets de serre, et que par conséquent son utilisation temporaire dans une transition qui viserait à terme un système énergétique entièrement renouvelable est souhaitable, compte tenu du besoin pressant de résultats dans la lutte contre le changement climatique. Enfin, une dernière catégorie d'expert annonce la possibilité d'une énergie nucléaire

¹ Les qualificatifs « fossile » et « non renouvelable » sont parfois confondus mais il est important de noter que seules les énergies reposant sur des stocks de matière organique qui ont évolués pendant des centaines de millions d'années pour aboutir à des stocks d'hydrocarbures non renouvelables à leur échelle de temps de consommation peuvent être qualifiés de fossiles. Cet adjectif qualifie donc les différentes formes de charbon, de pétrole et de gaz. L'énergie nucléaire en revanche provient de l'utilisation d'éléments radioactifs présents dans la croûte terrestre mais d'origine non organique. L'énergie nucléaire est donc non renouvelable car également consommée à une échelle de temps bien supérieure à celle de son renouvellement, mais elle n'est en aucun cas fossile.

renouvelable basé sur des surgénérateurs (projet ASTRID) capables de recycler une partie des déchets des générateurs actuels, ou d'une technologie nucléaire non pas de fission d'atomes lourds (comme l'uranium 235), mais de fusion d'atome légers de deutérium et de tritium supposée délivrer de l'énergie en très grande quantité. L'opérabilité de telles technologies à l'échelle industrielle est à l'heure actuelle hautement hypothétique puisque celle-ci commence tout juste à être réalisée à l'échelle du laboratoire (projet ITER). De plus, le tritium étant rare à l'état naturel, son usage à grande échelle impliquerait de le produire industriellement ce qui nécessiterait d'importantes consommations de lithium. A fortiori, la disponibilité de ces technologies dans 50 ou 100 ans est incompatible avec le besoin tout à fait actuel et urgent d'une transition vers un système énergétique renouvelable.

Pourtant, malgré une volonté apparente des dirigeants politiques de désengager les sociétés industrielles de leur dépendance aux combustibles fossiles, les pays industrialisés semblent jusqu'à présent être restés sur une tendance « business-as-usual »². Pour de nombreux auteurs la principale raison à cela vient du fait que comparé aux énergies renouvelables, la grande densité des combustibles fossiles impliquent qu'ils peuvent être extraits à un coût énergétique relativement faible et qu'ils délivrent donc de grandes quantités d'énergie nette au système économique. L'énergie nette est la quantité d'énergie qui atteint l'économie une fois que les besoins énergétiques propres au système énergétique ont été satisfaits. Ainsi, l'énergie nette est la part de l'énergie brute qui est utilisée pour soutenir les différentes activités (autres que l'extraction d'énergie) qui définissent une société. Dans ce document, ce concept sera plus précisément présenté, ainsi qu'un autre qui lui est étroitement lié : le taux de retour énergétique (TRE) pour lequel on conservera la dénomination anglophone d'Energy-Return-On-Investment (EROI). L'intérêt de cet indicateur sera présenté et des valeurs numériques représentatives seront présentées pour chaque type d'énergie que l'homme utilise actuellement. Enfin, la question de la transition des combustibles fossiles vers les énergies renouvelables en termes d'énergie nette et les conséquences que cela pourrait impliquer en termes d'épuisement des ressources énergétiques et métalliques, et de prix de l'énergie seront abordées.

² On notera toutefois les efforts réalisés par les pays industrialisés (membres de l'OCDE et de l'AIE) à la suite des chocs pétroliers des années soixante-dix en terme de baisse de leur dépendance au pétrole et d'efficacité énergétique. Ceci étant dit, les stratégies adoptées à l'époque ont surtout consistées à substituer du gaz et de l'énergie nucléaire au pétrole et non à opérer une transition vers les énergies renouvelables modernes (solaire, éolien, etc.).

1. Importance de l'énergie nette dans l'évolution des systèmes biologiques et humains

1.1 Énergie nette et évolution biologique

Le concept d'énergie nette a été énoncé par Howard Odum quand il souligna dans *Energy, ecology and economics* (1973), qu'il ne suffit pas de regarder les quantités d'énergie brutes qui sont disponibles, c.à.d. les stocks et les flux d'énergies primaires, puisque la variable déterminante pour un système thermodynamique quelconque (un être vivant, un écosystème, une société humaine, etc.) est en vérité la quantité d'énergie qui est vraiment disponible une fois que le besoin énergétique propre à son système d'extraction d'énergie a été satisfait. Pour Odum (1973) "la vraie valeur de l'énergie pour la société est l'énergie nette, qui est la part restante après que les coûts énergétiques d'obtention et de concentration de l'énergie ont été soustraits".

Dans une perspective biologique, il est en effet logique de penser que pour survivre chaque organisme a besoin de se procurer au moins autant d'énergie qu'elle n'en consomme. Par exemple, pour l'entretien et la réparation de son organisme, mais également la reproduction et la protection de sa progéniture, un prédateur a besoin d'obtenir d'une proie qu'il consomme beaucoup plus de calories qu'il n'en a dépensé pour la chasser. Cette quantité d'énergie qui reste une fois qu'on a retiré celle utilisée pour localiser, chasser, tuer, et assimiler le contenu en énergie brute de la proie est appelée énergie nette. Lotka (1922) puis Odum (1955, 1971) ont proposé que les pressions sélectives qui améliorent les rendements énergétiques nets des organismes vivants sont sûrement les principaux moteurs de l'évolution biologique. Seuls les organismes disposant de gains en puissance nette (c.à.d. d'énergie nette acquise par unité de temps) suffisamment élevés sont capables de survivre et de se reproduire. Pourtant, on peut penser que près de 99% (ou peut-être même plus) de toutes les espèces qui ont jamais vécu sur la Terre ont maintenant disparu, ce qui signifie que la "technologie" dont ils disposaient pour obtenir un excédent d'énergie est devenue obsolète à un moment donné, ce qui a impliqué une incapacité à équilibrer leurs gains et leurs pertes d'énergie dans un environnement changeant (Hall et al., 2009).

1.2 Énergie nette et évolution de la complexité sociétale

Le principe expliqué ci-dessus peut bien entendu s'appliquer aux systèmes humains. La nécessité de générer une quantité suffisante d'énergie nette pour se nourrir, se reproduire et s'adapter à un environnement en mutation ne viendra pas à l'esprit de la plupart des habitants des pays industrialisés. Mais pour une grande partie de la population mondiale d'aujourd'hui, obtenir assez de nourriture est encore une question cruciale du quotidien. La majorité de l'histoire de l'humanité et de sa préhistoire (environ 2 millions d'années en remontant aux premiers spécimens de la lignée *Homo*) s'est déroulée sous un mode de « chasseur-cueilleur » pour obtenir l'énergie nécessaire à la satisfaction de l'approvisionnement alimentaire et des autres activités humaines (Hall et al., 2009). La « technologie » telle que comprise dans son sens courant est vraiment très récente. C'est parce qu'ils ont générés des surplus suffisants d'énergie avec une efficacité grandissante (c.à.d. en des temps de plus en plus réduits) que nos ancêtres ont pu progressivement allouer leurs temps dans : la

construction d'abris, l'amélioration de l'organisation du camp, la protection des semblables, la socialisation, l'éducation, ou encore l'apport de soins aux enfants et à la narration orale (et à la complexification culturelle dans un sens plus large) (Hall et al., 2009). Suivant cette idée, Lambert et al., (2014) ont proposé une hiérarchie des besoins énergétiques (Figure 1) qui est analogue à la hiérarchie des besoins humains de Maslow (1943).

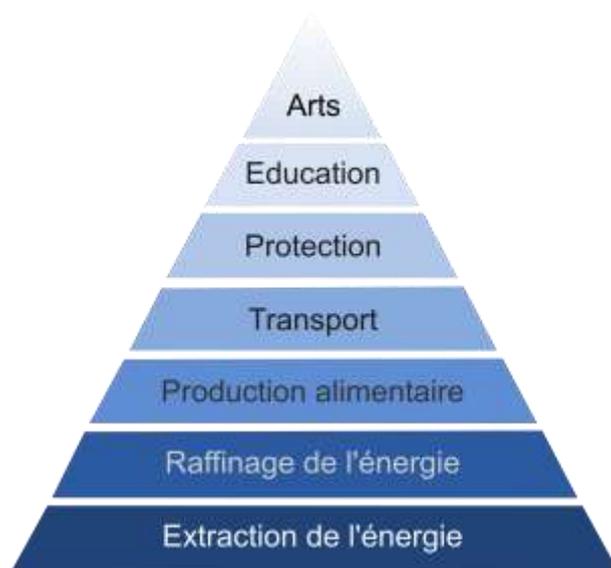


Figure 1. Hiérarchie des besoins énergétiques.
Source : traduit et adapté de Lambert et al., 2014.

Dans cette théorie, les besoins perçus comme « inférieurs » dans la hiérarchie, par exemple l'extraction et le raffinage de l'énergie brute, doivent être satisfaits pour que les besoins « supérieurs » dans la hiérarchie puissent devenir importants au niveau sociétal. En d'autres termes, la dissipation (c.à.d. la consommation) d'énergie pour les besoins les plus élevés, à savoir l'exécution des services sociaux et ultimement de l'art, ne sont perçus comme une nécessité énergétique sociétale qu'une fois que tous les besoins en dessous d'eux ont été au moins en partie satisfaits (Lambert et al, 2014). Par ailleurs, l'accès à un besoin énergétique « supérieur » nécessite que la source d'énergie utilisée génère suffisamment de surplus énergétique. Par exemple, on ne peut dépenser de l'énergie pour les soins de santé que s'il y a assez d'énergie nette restante après que les besoins énergétiques « inférieurs » (extraire, raffiner et transporter l'énergie et les aliments, construire des abris, éduquer un minimum la population) ont été satisfaits.

Certains événements clés de l'évolution humaine ont permis à ces derniers d'augmenter progressivement la quantité d'énergie extraite de leur environnement, ce qui a induit un accès à des besoins énergétiques de plus en plus élevés: (1) l'amélioration des pointes de lances et des lames de couteau afin d'exploiter des gammes de gibier plus diversifiées et plus importantes pour leurs contenus caloriques et de peaux; (2) la récupération de l'énergie contenue dans les liaisons des chaînes carbonées du bois et récupérées en brûlant ce dernier ; (3) la concentration de l'énergie solaire dans des plantes photosynthétiques à travers l'agriculture ; (4) l'exploitation plus récente du vent et des courants d'eau ; et (5) l'extraction et

l'utilisation plus tardives des combustibles fossiles (Hall et al., 2003, 2009)³. Il apparaît clairement que l'homme a continuellement augmenté sa consommation d'énergie (et de ressources naturelles non énergiques également) en cumulant les différents types de ressources exploitées plutôt qu'en effectuant des transitions de l'une à l'autre au sens strict. Par ailleurs, ce phénomène d'augmentation exponentielle c'est fait en allant vers un contenu en matière-énergie de qualité croissante (c.à.d. de teneur en entropie de plus en plus faible). Par exemple, en détournant l'énergie photosynthétique capturée à partir de multiples espèces dans un écosystème naturel aux quelques cultivars que les humains ont sélectionnés, on voit bien que le développement de l'agriculture est une amélioration du rendement énergétique net du système de production de l'homme. Au début de l'agriculture, l'augmentation massive de la production alimentaire par unité de terre n'a pas conduit à une augmentation de la consommation alimentaire par personne, mais plutôt à une légère augmentation de la population mondiale ce qui a ensuite permis d'initier le développement des villes, des bureaucraties, des systèmes de communications, etc. Néanmoins, cette augmentation démographique de la préhistoire reste minime comparée à ce que l'on a pu observer dans le monde durant le XIX^{ème} et le XX^{ème} siècles, et de fait la population humaine mondiale est restée relativement stable au cours de milliers d'années et a très peu augmenté avant 1900. Cela vient du fait que le surplus d'énergie dégagé par le système énergétique de l'homme est resté relativement faible durant la majorité de son histoire puisqu'en effet les humains devaient eux-mêmes réaliser la plupart du travail physique comme ouvriers ou plus sinistrement comme esclaves (Hall et al., 2009). Même avec des animaux de trait et la combustion du bois (et d'autres formes plus mineures de biomasses) comme sources d'énergie, toutes les sociétés humaines ont prospéré pendant plus ou moins de temps puis se sont inévitablement effondrées car elles rencontraient de trop nombreux rendements marginaux décroissants, en particulier au niveau de leur système d'approvisionnement énergétique (Tainter, 1988). Un plus grand surplus d'énergie était indispensable à l'homme pour accroître sa présence sur Terre. L'exploitation des énergies fossiles, et en particulier du pétrole, est clairement la raison pour laquelle une partie de l'humanité a pu augmenter considérablement ses gains d'énergie nette et entrer dans l'âge industriel par une révolution du même nom.

2. Le EROI: un concept dérivé de l'énergie nette

2.1 De l'énergie nette à l'EROI

Comme le montre la Figure 2, le secteur énergétique peut être considéré comme un secteur spécifique de l'économie dont le rôle est d'extraire l'énergie primaire **P** (charbon, pétrole, énergie solaire, etc.) de l'environnement pour la transformer en formes utilisables dites finales **F** (liquide, gaz, électricité, etc.). De toute

³ Il est important de noter que toutes les formes d'énergie utilisées par les humains (sauf la fission atomique récente, la géothermie et l'énergie des marées océaniques) proviennent directement ou indirectement du flux d'énergie de basse entropie fourni par le soleil à la Terre. Ceci est en conformité avec l'approche de l'Économie Biophysique qui postule qu'un flux d'énergie de basse entropie est nécessaire pour maintenir un système économique dans un état de déséquilibre thermodynamique avec l'environnement qui l'entoure (Daly, 1985, 1992; Ayres, 1998).

évidence, le secteur énergétique a besoin d'énergie pour faire fonctionner ses processus internes (forage, pompage, transport, etc.), de sorte qu'une partie S_1 de l'énergie raffinée est utilisée par le secteur de l'énergie lui-même. L'énergie finale F va au reste de l'économie et est utilisée dans différents secteurs (agricole, industriel, résidentiel, transport, service, et gouvernement) pour produire des biens et services et gérer l'économie. Pendant ce temps, une partie S_2 de la production de biens et services générée dans le passé par l'économie est investie dans le secteur de l'énergie puisque celui-ci a besoins de matières premières, de capital et de services pour fonctionner comme tout autre secteur (toute construction d'infrastructure énergétique, comme par exemple une raffinerie ou une éolienne, repose sur l'assemblage de métaux avec d'autres matériaux composites). S_2 représente l'énergie qui a été utilisée dans l'économie pour produire les biens d'équipements et les services qui sont utilisés dans le secteur énergétique. Ensuite, il est facile de définir **l'approvisionnement d'énergie nette de l'économie comme $F - (S_1 + S_2)$; et le retour sur investissement de l'énergie (le EROI) comme $F / (S_1 + S_2)$ qui est une mesure de l'accessibilité de la ressource énergétique** (Hall et al., 1986).

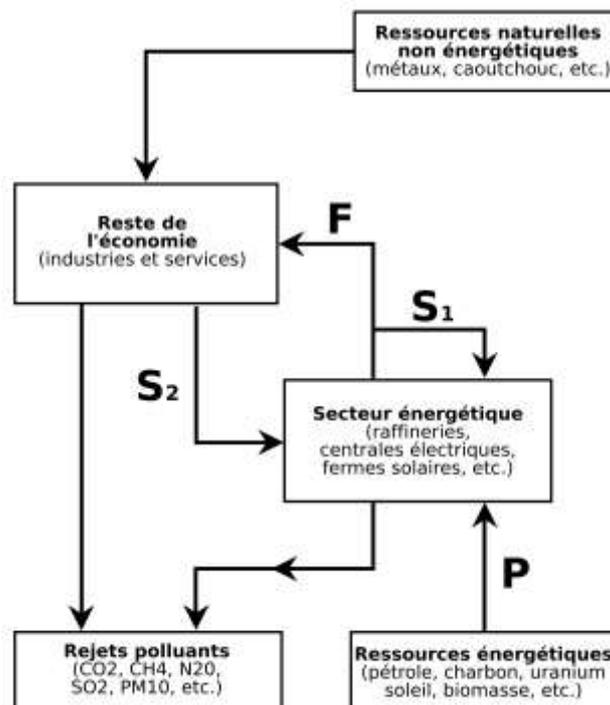


Figure 2. Relation entre le secteur énergétique et le reste de l'économie. Source : traduit et adapté de Dale, 2010.

Il est important de noter qu'en général, les discussions (de profane ou d'expert) sur la disponibilité de l'énergie se concentrent sur la production, qui est soit l'énergie primaire P , soit l'énergie finale F . Des questions ont été soulevées depuis des décennies sur les niveaux ultimes de ressources récupérables de pétrole, de gaz et d'autres sources d'énergies non renouvelables (débats sur le pic pétrolier ou le « peak everything »). En vérité, ces débats sur la disponibilité brute de l'énergie passent à côté du véritable problème puisque l'attention des décideurs politiques et des médias devrait plutôt se concentrer sur la disponibilité nette de l'énergie. La disponibilité de l'énergie nette est la véritable contrainte qui s'exerce sur la capacité des sociétés industrielles à se développer. En effet, même en faisant l'hypothèse de valeurs constantes pour P et F (ce qui revient à dire que la consommation sociétale

d'énergie se stabilise), il faut quand même augmenter les valeurs des investissements S_1 et S_2 pour compenser la baisse du rendement marginal associée au processus d'extraction de l'énergie⁴. Cela signifie que lorsqu'on se place dans un contexte de croissance de P et de F , ce qui est le cas depuis la Révolution Industrielle pour les sociétés dites industrialisées qui cherchent à répondre à la demande croissante d'énergie de leur population, il faut alors forcément augmenter les valeurs de S_1 et S_2 dans une mesure encore plus importante puisque la diminution des rendements marginaux d'extraction s'applique toujours. Dans une telle situation, on fait face à une augmentation des quantités d'énergie raffiné S_1 et de production de capital S_2 qui sont détournés de l'économie vers le secteur énergétique.

2.2 Définition du EROI

Gain d'énergie, rendement énergétique net, surplus d'énergie sont des termes plus ou moins équivalents qui sont plus rigoureusement définis par le terme de taux de retour énergétique (TRE) en français pour lequel on préférera l'abréviation anglaise plus usuelle d'Energy-Return-On-Investment (EROI). Le EROI exprimé en équation (1) est un concept dérivé de l'énergie nette et a été officiellement présenté par Charles Hall (1972) avec la définition suivante:

$$EROI = \frac{\text{Energie brute produite}}{\text{Energie investie pour récupérer l'énergie brute produite}} \quad (1)$$

L'énergie nette et le EROI sont logiquement liés selon l'équation (2):

$$\text{Energie nette} = \text{Energie brute produite} * \left(1 - \frac{1}{EROI}\right) \quad (2)$$

Contrairement à l'énergie nette, le EROI est un ratio sans unité utilisé pour comparer la production à l'investissement d'énergie d'un système énergétique (Murphy et Hall, 2011). Un EROI de « 20:1 » doit être lu « vingt pour un » et implique qu'une ressource ou un processus énergétique particulier génère 20 joules pour un investissement de 1 joule (c.à.d. qu'il génère 19 joules d'énergie nette). Un EROI est caractéristique d'un couple « ressource énergétique/technologie d'extraction » et bien sûr plus il est élevé plus ce couple « ressource énergétique/technologie d'extraction » génère facilement de l'énergie nette pour la société. Ainsi, on cherchera à avoir un système énergétique avec un EROI le plus élevé possible. Le numérateur et le dénominateur de l'EROI doivent englober la même frontière afin de représenter un ratio énergétique d'un système énergétique bien précis. La plupart des controverses entourant les analyses d'EROI entre différents carburants, comme par exemple l'essence et l'éthanol à base de maïs, sont biaisées parce qu'elles font rarement référence à des systèmes aux frontières semblables (Murphy et al., 2011).

⁴ L'apparition de rendements marginaux décroissants dans les processus d'extraction est associée à la diminution de la qualité des ressources énergétiques à mesure qu'on les exploite puisque la rationalité économique pousse les producteurs à toujours commencer leur exploitation par les meilleures ressources avant de se tourner vers les moins bonnes (plus éloignées, plus profondes, etc.). Ce phénomène vaut aussi bien pour les ressources non renouvelables que renouvelables.

Le EROI d'une énergie primaire sera calculé à la sortie de la mine (charbon), de la tête de puits (pétrole et gaz), ou de la ferme (biocarburant). Dans ce cas, on se référera à un $EROI_{mm}$ (« mm » pour « mine-mouth » en anglais), qui comprend l'énergie pour trouver et produire le combustible, comme décrit dans l'équation (3).

$$EROI_{mm} = \frac{\text{Énergie brute produite}}{\text{Énergie requise pour trouver et produire l'énergie brute}} \quad (3)$$

Même si cet $EROI_{mm}$ est celui qui est le plus souvent analysé, il est également intéressant de calculer le $EROI_{pou}$ jusqu'au point d'utilisation. Dans ce cas, on se réfère plutôt à une forme d'énergie finale et le dénominateur comprend l'énergie pour trouver, produire, raffiner et transporter l'énergie jusqu'à son point d'utilisation:

$$EROI_{pou} = \frac{\text{Énergie finale produite}}{\text{Énergie requise pour trouver et délivrer l'énergie finale}} \quad (4)$$

Une étape supplémentaire est de prendre en compte non seulement l'énergie pour obtenir et délivrer, mais aussi pour utiliser l'énergie, y compris l'énergie indirecte nécessaire pour maintenir les infrastructures comme par exemple les ponts, les autoroutes, les voitures, etc. qui sont nécessaires pour utiliser de l'essence ou d'autres carburants. Cet EROI étendu ("extended" en anglais) est défini par l'équation (5):

$$EROI_{ext} = \frac{\text{Énergie finale produite}}{\text{Énergie requise pour trouver, délivrer et utiliser l'énergie finale}} \quad (5)$$

Une représentation graphique de ces différents EROI est donnée en Figure 3.

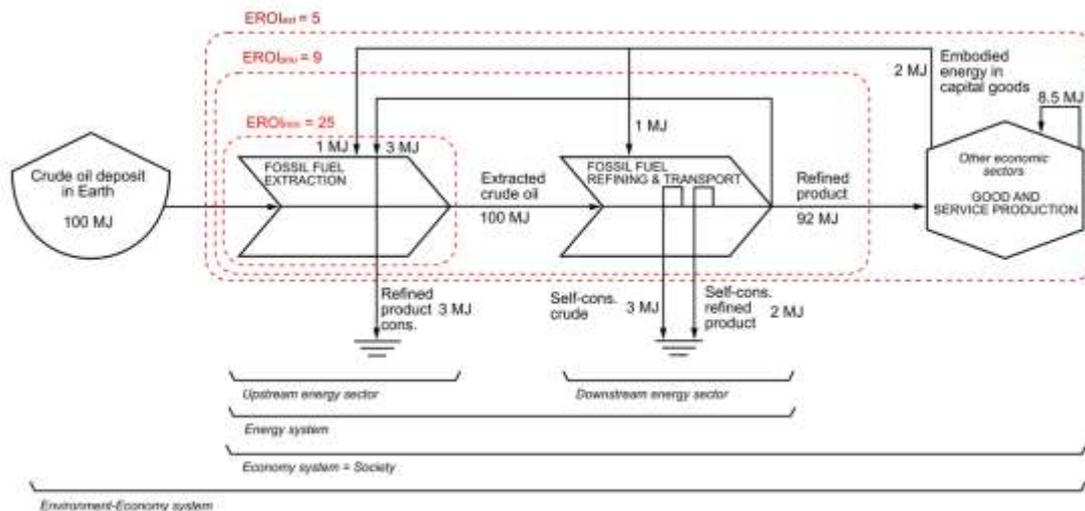


Figure 3. Frontières de différents EROI associés à l'exemple de l'extraction et du raffinage de 100 MJ de pétrole brut. Source : auteur.

Dans cet exemple on considère l'extraction (secteur amont ou « upstream ») d'une quantité donnée (100 MJ⁵) de pétrole brut qui est ensuite converti par un

⁵ MJ signifie mégajoule, soit 10⁶ joules. Une joule représente le travail d'une force motrice d'un newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force. On retiendra comme ordre de grandeur qu'un baril de pétrole brut (soit 159 litres) représente à peu près 5860 MJ.

secteur énergétique aval (« downstream ») en différents produits raffinés (diesel, électricité, etc.). Une fois que les deux secteurs énergétiques (amont et aval) ont récupérés l'énergie *directe* nécessaire pour leurs propres fonctionnements, l'énergie restante va au reste de l'économie pour produire des biens et services. Une partie de cette production industrielle est investi dans le secteur énergétique sous la forme de biens d'équipement (on parle aussi de capital au sens large). Cet investissement en capital représente un investissement d'énergie *indirecte* dans le secteur de l'énergie (sous la forme d'énergie incorporé ou « embodied » en anglais qu'on appelle parfois aussi énergie grise) qui doit être prise en compte quand on veut calculer un EROI. Dans cet exemple numérique l'extraction de 100 MJ de pétrole brut exige 3 MJ d'énergie directe (sous la forme de produits raffinés du secteur aval comme du diesel ou de l'électricité) et 1 MJ d'énergie indirecte incorporée dans du capital. Ainsi, la production de 100 MJ à la tête de puits a nécessité un total de 4 MJ d'investissement d'énergie, de sorte que le $EROI_{mm}$ est égale à 25:1 ($100/4 = 25$). Chaque unité d'énergie investie dans le champ de pétrole sous forme d'équipement et de consommation directe d'énergie génère 25 unités d'énergie. Le raffinage de 100 MJ de pétrole brut exige 3 MJ d'autoconsommation de pétrole brut, ainsi que l'investissement de 2 MJ d'énergie directe raffinée (électricité par exemple) et l'utilisation de capital qui représente 1 MJ d'énergie indirecte. Ainsi, afin de fournir 92 MJ d'énergie à la société, il est en fait nécessaire de produire 97 MJ d'énergie raffinée pour un investissement énergétique total de $1 + 3 + 1 + 3 + 2 = 10$ MJ. D'où un $EROI_{pou}$ égale à 9:1 ($92/10 = 9,2$). Enfin, si l'on tient compte des 8.5 MJ d'énergie nécessaire pour construire et entretenir toutes les infrastructures et les équipements (routes, ponts, voitures, etc.) qui permettent l'utilisation des 92 MJ d'énergie fossile finale, l' $EROI_{ext}$ tombe à 5:1 ($92 / (10 + 8,5) = 5$).

Murphy et Hall (2011) et d'autres chercheurs (par exemple Cleveland, 2005) ont également souligné la nécessité de tenir compte de la qualité des différentes formes d'énergie qui rentrent en compte dans la formulation d'un EROI⁶. En outre, comme les coûts énergétiques indirects (capital) ne sont pour la plupart du temps pas enregistrées par les entreprises en terme de MJ mais plutôt de devises (dollars ou euros par exemple), ces investissements financiers doivent être traduit en quantités d'énergie à l'aide de facteurs d'intensité énergétique (exprimés en MJ/\$ ou MJ/€). Les détails de la méthodologie utilisée pour calculer un EROI peuvent être trouvée dans la littérature suivante: Herendeen, 2004; Cleveland, 2005; Mulder et Hagens, 2008; Coughlin, 2011; Murphy et al., 2011; Brandt et Dale, 2011; Brandt et al., 2013a.

2.3 Intérêts multiples du EROI

L'analyse du EROI d'une ressource d'énergie fournit de multiples informations :

- Premièrement, comme le EROI est une valeur numérique issue d'un calcul standardisé, il permet une comparaison entre les différents types d'énergie sur leur capacité à fournir de l'énergie nette à la société.

⁶ En effet, on comprend facilement que 1 MJ de charbon n'a pas la même qualité, c.à.d. au sens large la même capacité à soutenir la croissance économique, que 1 MJ de pétrole. La qualité d'une énergie varie selon sa densité volumique ou massique, sa capacité à délivrer du travail utile (c.à.d. son contenu exergétique), sa flexibilité de stockage et de transport, sa propreté, etc. Suivant cette idée, quand un EROI est calculé, les investissements énergétiques directs et indirects du dénominateur et les quantités produites du numérateur doivent être corrigées par leur qualité et non pas simplement exprimées en unités équivalentes de chaleur.

- Deuxièmement, le EROI est une mesure de la qualité d'une ressource, où la qualité est définie ici comme la capacité d'une ressource énergétique à soutenir le système économique. Cela signifie en termes simples que lorsque le EROI d'une ressource donnée est à la baisse au fil du temps, une plus grande partie de l'énergie normalement disponible pour la société doit être détournée pour extraire cette ressource de qualité décroissante.
- Troisièmement, en combinant des EROI avec des mesures de quantité plus standard comme les réserves d'une ressource énergétique, on peut avoir une meilleure idée sur les capacités réelles d'une ressource énergétique à fournir de l'énergie nette. Par exemple, on dit que les sables bitumineux du Canada représentent 170 mbep (milliards de barils équivalents pétrole), mais avec une EROI de 4:1 (Poisson et Hall, 2013), seuls les trois quarts de ces 170 mbep représentent de l'énergie nette disponible pour la société (Murphy et al., 2011).
- Quatrièmement, le EROI est une représentation numérique de la lutte qui s'opère entre l'épuisement physique naturel qui tend à diminuer le rendement énergétique de la ressource et le progrès technologique qui permet d'améliorer les quantités d'énergies extraites avec la meilleure efficacité énergétique possible. Une diminution du EROI au cours du temps indique que la ressource d'énergie associée à cet EROI donne moins d'énergie nette pour la société, soit parce que les quantités d'énergie investi dans le processus d'extraction ont augmentées sans une augmentation équivalente de la production, soit parce que les gains d'énergie provenant de l'extraction ont diminués avec un effort d'investissement en énergie constant. Les séries temporelles d'EROI sont des outils puissants pour mesurer les effets relatifs opposés de la technologie et de l'épuisement que ce soit au niveau d'un gisement énergétique particulier, d'un état, d'un pays ou même du monde entier.

3. Valeurs d'EROI pour différents systèmes énergétiques

3.1 Revue de la littérature des valeurs actuelles d'EROI

Malgré des débats toujours en cours sur la méthodologie de calcul d'un EROI, un grand nombre d'études ont été menées pour estimer le EROI de différentes ressources énergétiques. La présentation de ces différentes études ne sera pas détaillée dans ce document, même si cela aurait été utile pour voir leurs différences méthodologiques. Au lieu de cela, le Tableau 1 donne les estimations d'EROI que l'on considère comme représentatives des systèmes énergétiques aujourd'hui dans la littérature. Ainsi, dans ce tableau seul les valeurs moyennes sont présentées pour des raisons de clarté, d'autant que les analyses de sensibilité ne sont pas effectuées dans toutes les études.

Table 1 EROI représentatif pour différentes formes d'énergies. Source: traduit et adapté de Hall et al. 2014.

Type d'énergie	Année	Pays	EROI (X:1)*	Source
<i>Charbon</i>				
Charbon	1950	USA	80	Cleveland et al., 1984
Charbon	2007	USA	60	Balogh et al., 2012
Charbon	1995	Chine	35	Hu et al., 2011
Charbon	2010	Chine	27	Hu et al., 2011
Production d'électricité à partir de charbon	n/a	n/a	30	Weißbach et al., 2013
<i>Pétrole et gaz conventionnels (production combinés)</i>				
Pétrole et gaz	1999	Monde	35	Gagnon et al., 2009
Pétrole et gaz	2006	Monde	18	Gagnon et al., 2009
Pétrole et gaz (exploration)	1970	USA	8	Cleveland et al., 1984; Hall et al., 1986
Pétrole et gaz (exploration)	1970	USA	20	Cleveland et al., 1984; Hall et al., 1986
Pétrole et gaz	1955	USA	22.5	Guilford et al., 2011
Pétrole et gaz	2000	USA	15	Guilford et al., 2011
Pétrole et gaz	2007	USA	11	Guilford et al., 2011
Pétrole et gaz	2007	USA	12	Guilford et al., 2011
Pétrole et gaz	1970	Canada	65	Freise, 2011
Pétrole, gaz et sables bitumineux	2010	Canada	11	Poisson et Hall, 2013
Pétrole et gaz	2008	Norvège	40	Grandell, 2011
Pétrole et gaz	2009	Mexique	45	Ramirez et Hall, 2013
Pétrole et gaz	2010	China	10	Hu et al., 2011
<i>Pétrole conventionnel seul</i>				
Pétrole	2008	Norvège	21	Grandell, 2011
<i>Gaz naturel conventionnel seul</i>				
Gaz naturel	2005	USA	67	Sell et al., 2011
Gaz naturel	1993	Canada	38	Freise, 2011
Gaz naturel	2000	Canada	26	Freise, 2011
Gaz naturel	2009	Canada	20	Freise, 2011
Production d'électricité à partir de gaz	n/a	n/a	28	Weißbach et al., 2013
<i>Combustibles fossiles non conventionnels</i>				
Pétrole off-shore ultra profond	2009	Golfe du Mexique	5.5	Moerschbaeher et Day, 2011
Pétrole lourd	2005	Californie	5	Brandt, 2011
Sables bitumineux	2010	Canada	6	Brandt et al., 2013b

Sables bitumineux	1994 to 2008	Canada	4	Poisson et Hall, 2013
Pétrole et gaz de roches mères	n/a	n/a	n/a	Malgré leurs productions croissantes aux USA, il n’y a pour l’instant aucune étude disponible.
Schistes kerobitumineux				
technologie “in situ” ou “retorting”	2008		1.8	Brandt, 2008
technologie “ex situ” ou “mining”	2009		2.2	Brandt, 2009
<i>Nucleaire</i>				
Production d’électricité par fission d’un combustible à base d’Uranium 235	n/a	n/a	75	Weißbach et al., 2013
<i>Renouvelables**</i>				
Hydroélectricité	n/a	n/a	50	Weißbach et al., 2013
Eolien sans back-up	n/a	n/a	20 ; 16	Kubiszewski et al., 2010; Weißbach et al., 2013
Eolien avec back-up	n/a	n/a	4	Weißbach et al., 2013
Geothermie (électricité)	n/a	n/a	7.5 ; 30	Halloran, 2008a; Atlason et Unnthorsson, 2014.
Energie houlomotrice (projet Pelamis)	n/a	n/a	15	Halloran, 2008b
Solaire à concentration (CSP)				
Parabolic trough sans back-up	n/a	n/a	20	Weißbach et al., 2013
Parabolic trough avec back-up	n/a	n/a	9.6	Weißbach et al., 2013
Fresnel plant sans back-up	n/a	n/a	17	Weißbach et al., 2013
Fresnel plant avec back-up	n/a	n/a	8.2	Weißbach et al., 2013
Solaire photovoltaïque sans back-up	n/a	n/a	4 à 12	Raugei et al., 2012; Weißbach et al., 2013
Solaire photovoltaïque avec back-up	n/a	n/a	2.5	Weißbach et al., 2013
Biomass (matière première)				
Ethanol (sugarcane)	n/a	n/a	0.8 à 10	Goldemberg, 2007
Ethanol (corn)	n/a	USA	0.8 à 1.6	Patzek, 2004; Farrel et al., 2006
Ethanol (Beetroot)	n/a	n/a	2	Woods, 2003
Biodiesel (rapeseed)	n/a	USA	1.3	Pimentel et Patzek, 2005, 2006

* Les valeurs d'EROI supérieures à 5:1 ont été arrondies à l'entier supérieur.

** Les valeurs d'EROI pour les renouvelables ne sont pas spécifiquement attribués à une région ou un pays puisque les conditions géographiques et climatiques propres à ces entités tendent à introduire un niveau de variabilité qui défavoriserait l'analyse simple faite dans le présent rapport.

Le Tableau 1 montre clairement les éléments suivants : les EROI des combustibles fossiles conventionnels (charbon, pétrole, gaz) ont diminués depuis le début de leur exploitation, les fossiles non conventionnels (sables bitumineux, pétrole lourds, etc.) présentent des EROI sensiblement plus faibles, et les technologies dites “renouvelables” vers lesquels une transition complète est envisagée présentent à

l'heure actuelle des EROI faibles en particulier compte tenu du caractère intermittent de ces énergies diffuses et donc de la nécessité de disposer d'installations électriques de réserve (« back-up ») et de procéder à un renforcement des réseaux électriques.

3.2 Séries temporelles d'EROI

Analyser des valeurs d'EROI représentatives de chaque type d'énergie est en soit une source d'information, mais l'analyse de l'évolution dans le temps de ces mêmes EROI apporte beaucoup plus de connaissances sur la résilience des sociétés industrielles. Malheureusement, en raison d'un manque de recul concernant les énergies renouvelables et les énergies fossiles non conventionnels, les tendances des EROI sont exclusivement connues pour les combustibles fossiles conventionnels. Des analyses de séries chronologiques ont été réalisées pour la production mondiale de pétrole (Gagnon et al, 2009) ; mais également pour diverses productions nationales : pétrole et gaz américain (Cleveland et al., 1984; et Hall et al., 1986; Guilford et al., 2011), pétrole et gaz canadien (Freise, 2011; Poisson et Hall, 2013), pétrole et gaz norvégien (Grandell et al., 2011), pétrole et gaz mexicain (Ramirez et Hall, 2013), pétrole, gaz et charbon chinois (Hu et al., 2011), gaz sec américain (Sell et al., 2011) et gaz sec canadien (Freise, 2011). Dans un souci de simplicité, seul le cas de la production de pétrole américain sera détaillé ci-dessous, mais le lecteur doit comprendre que toutes les études précédemment cités sur les séries chronologiques d'EROI fossiles présentent les mêmes résultats : des tendances à la baisse au cours des dernières décennies avec des maximum d'EROI déjà passés.

Détail de la tendance de l'EROI de la production jointe de pétrole et de gaz américain

Guilford et al. (2011) ont réalisé la plus grande analyse d'EROI de la production jointe de pétrole et de gaz américain, donnant des estimations de 1919 à 2007. Ces résultats sont présentés dans la Figure 4, avec les résultats des études précédentes de Cleveland et al. (1984) et Hall et al. (1986). Après la crise pétrolière de 1973, les États-Unis ont tenté d'améliorer leur indépendance énergétique et en particulier leur indépendance pétrolière. Ils ont donc augmenté leurs efforts de forage domestique. En conséquence, l'investissement énergétique pour obtenir du pétrole a augmenté, mais cela n'a pas conduit à une augmentation de la production de pétrole et de gaz ce qui a engendré une baisse du EROI de la production pétrolière et gazière américaine comme le montre la Figure 4.

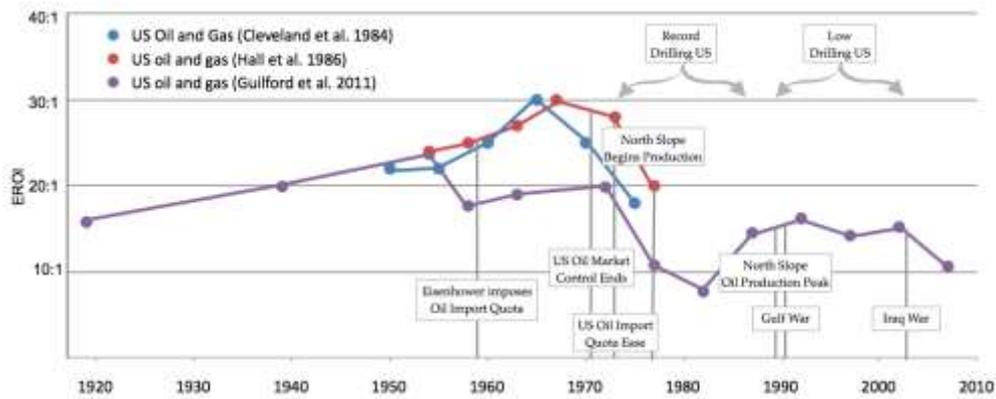


Figure 4. Estimations du EROI de la production jointe de pétrole et de gaz américain dans trois études : Cleveland et al., 1984; Hall et al., 1986; Guilford et al., 2011. Source du graphique : Hall et al., 2014.

Même si l'effort de forage sur le territoire américain a ralenti au début des années 90, le EROI de la production de pétrole et de gaz n'a pas augmenté pour autant parce que la production nationale de pétrole et de gaz conventionnels a continué de diminuer. La Figure 5 présente plus précisément les résultats de Guilford et al. (2011) sur la période 1992-2007. On observe alors encore mieux la diminution du EROI de la production de pétrole et de gaz aux États-Unis qui se situe actuellement à un niveau estimé à 11:1. Le passage de ressources facile à trouver et à exploiter à des ressources plus profondes et plus difficiles à extraire explique en grande partie ce phénomène. Les coûts énergétiques directs et indirects ont augmenté, mais la production est restée stable ou a diminué, de sorte que le EROI a logiquement diminué. L'idée intuitive que les cycles économiques (« business cycles ») dans lesquels une demande de pétrole croissante amène à une augmentation du prix de ce dernier qui encourage l'augmentation des forages pour accroître la production de pétrole et conduit ainsi à une baisse du prix du pétrole ne fonctionne pas en réalité parce qu'une intensité croissante de forage ne donne pas toujours plus de pétrole disponible sur le marché en raison des contraintes géologiques réelles.

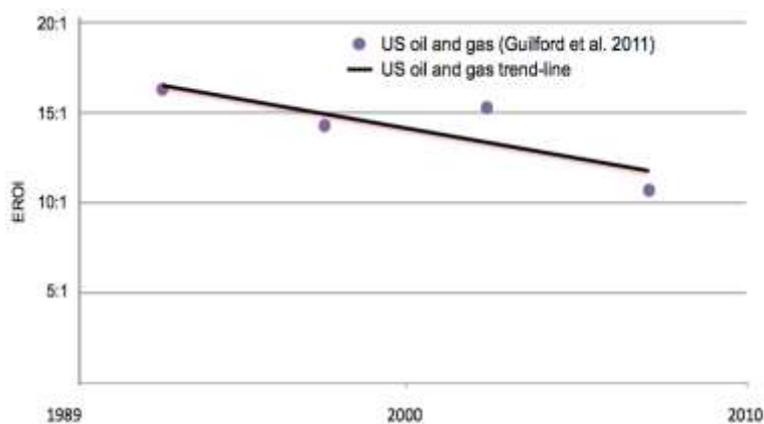


Figure 5. Estimations de l'EROI du pétrole et gaz américain entre 1992 et 2007 réalisés par Guilford et al., 2011. Source du graphique : Hall et al., 2014.

Ces tendances soulèvent nécessairement de sérieuses préoccupations puisque les sociétés industrialisées ont été construites sur l'utilisation de ressources énergétiques fossiles de haute qualité, en particulier le pétrole, qui délivraient

auparavant de grandes quantités d'énergie nette et qui connaissent maintenant une baisse de leurs rendements marginaux. À mesure que la qualité des combustibles fossiles conventionnels baisse et que la part des combustibles non conventionnels augmente dans l'approvisionnement énergétique total, de plus en plus d'énergie est investie dans le système d'extraction d'énergie du système économique. Dans un tel contexte, pour un niveau équivalent de production brute, la quantité d'énergie nette qui délivrée au système économique diminue nécessairement.

Mais c'est plutôt pour d'autres raisons, notamment l'instabilité géopolitique de certaines grandes régions productrices de pétroles, que de plus en plus d'attention est accordée aux sources d'énergie renouvelable. Comme il a été vu dans cette section (Tableau 1), ces formes d'énergie ne génèrent pas (encore) autant d'énergie nette que les énergies fossiles. Une transition énergétique, telle que celle imaginé actuellement, semble donc synonyme d'un approvisionnement énergétique de plus faible EROI. Ce fait aura des conséquences multiples pour le système économique et il est indispensable de tenter de les anticiper au maximum.

4. Les conséquences possibles de la transition énergétique en terme d'énergie nette

4.1 Des difficultés croissantes d'extractions de ressources

Comme vu précédemment, le EROI des énergies fossiles est en baisse parce que l'approvisionnement en énergie se fait de plus en plus par des ressources de qualités décroissantes, plus profondes, plus éloignées et plus difficiles à extraire. Cela signifie simplement que plus d'investissement énergétique est nécessaire pour obtenir de l'énergie et que par conséquent moins d'énergie nette est disponible pour le système énergétique. On peut se représenter ce phénomène en comparant deux sociétés (ou systèmes économiques) hypothétiques différents. La société A extrait de l'énergie avec un EROI de 20, alors que la société B le fait avec un EROI de 5. Les sociétés A et B peuvent être deux sociétés distinctes ou bien la même à deux périodes différentes. Considérons d'abord que les deux sociétés extraient 100 unités d'énergie brute. En raison de la différence entre leurs EROI respectifs, lorsque la société A ne doit investir que 5 unités d'énergie pour maintenir sa production énergétique, la société B a besoin d'investir 20 unités d'énergie dans son système d'extraction. En conséquence, 95 unités d'énergie nette sont fournis à la société A et peuvent être utilisées par différents processus économiques pour créer des biens et des services, alors que la société B ne reçoit que 80 unités d'énergie nette et réalise donc moins de croissance économique (Figure 6). Un autre point de vue consiste à calculer combien d'énergie brute doit être extrait pour maintenir un approvisionnement constant de 100 unités d'énergie nette pour la société. Avec un EROI de 20, la société A doit extraire 105 unités d'énergie brute, dont 5 sont en fait utilisées comme investissement énergétique. Pour ce même approvisionnement de 100 unités d'énergies nette à la société B, 125 unités d'énergie brute doivent être extraites puisque 25 sont « cannibalisées » par son secteur énergétique (Figure 7).

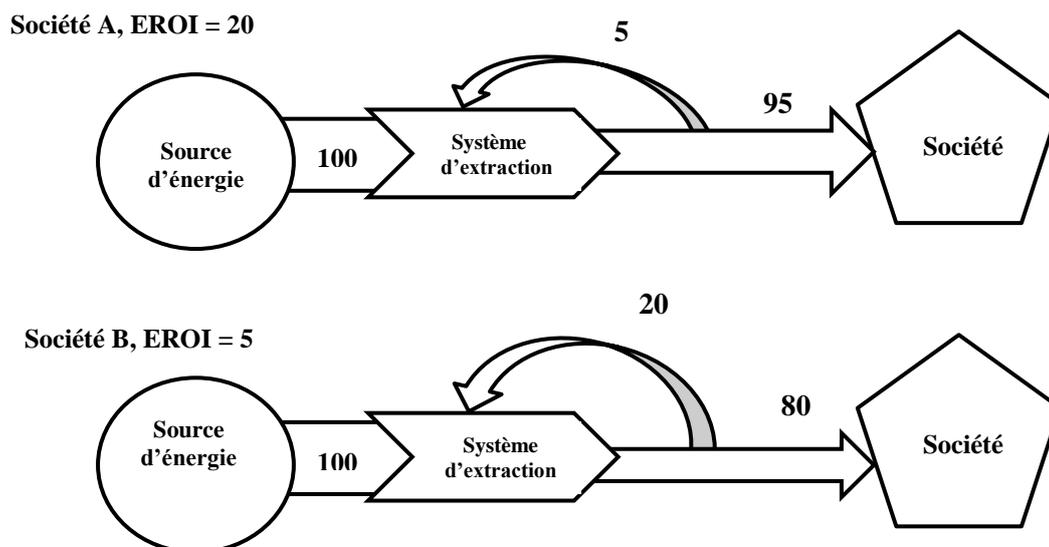


Figure 6. Comparaison de deux sociétés hypothétiques, A (EROI = 20) et B (EROI=5) qui extraient chacune 100 unités d'énergie brute de leur environnement. Source : traduit et adapté de Murphy et Hall, 2010.

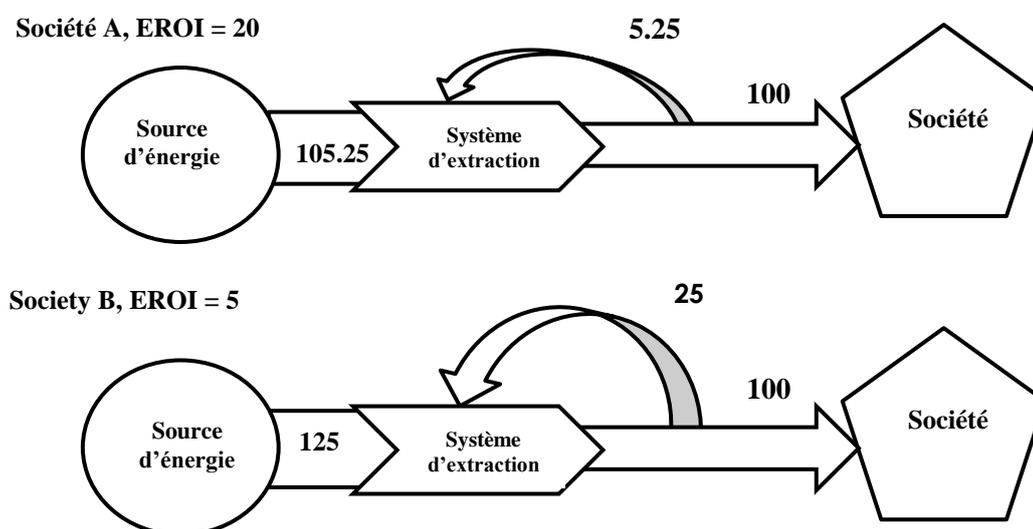


Figure 7. Comparaison de deux sociétés hypothétiques, A (EROI = 20) et B (EROI=5) qui extraient chacune 100 unités d'énergie nette de leur environnement. Source : traduit et adapté de Murphy et Hall, 2010.

Cet exemple montre que pour assurer un approvisionnement constant d'énergie à la société, la baisse du EROI exacerbe l'épuisement des ressources en exigeant une augmentation des quantités extraites. Plus le EROI d'une énergie fossile diminue, plus les réserves de cette énergie seront vite épuisées. Si par ailleurs la consommation d'énergie fossile continue d'augmenter, ce phénomène s'accélère encore plus. En d'autres termes, cela signifie aussi que lorsqu'on souhaite garder un flux net constant d'énergie nette pour la société, de nouvelles sources d'énergie fossiles et renouvelables doivent être trouvées avec de meilleurs EROI, simplement pour compenser la diminution du EROI des ressources énergétiques fossiles actuels. Malheureusement, comme cela a été exposé précédemment à la section 3, c'est plutôt le contraire qui semble se dérouler aujourd'hui. Premièrement, on observe dans l'approvisionnement total une augmentation de la part des combustibles fossiles non conventionnels (pétrole extra lourd, sables bitumineux, pétrole de roches mères, etc.) ayant des EROI faibles. Par exemple en 2005, près de

60% des découvertes concernaient des champs de pétrole en eau profonde contre moins de 20% dans les années 90 (Jackson, 2009). Deuxièmement, les sources d'énergie renouvelables ne peuvent pas (pour l'instant du moins) fournir autant d'énergie nette qu'un système énergétique reposant les énergies fossiles.

4.2 La possibilité d'une "falaise d'énergie nette"

Si l'abandon des combustibles fossiles ne se fait pas par des ressources énergétiques à EROI plus élevés mais plutôt par des ressources renouvelables avec des EROI plus faibles dont par ailleurs le comportement intermittent génère des besoins croissants de capacité de stockage et de renforcements des réseaux; ou si un approvisionnement en énergie renouvelable à EROI élevé est possible grâce au progrès technique mais arrive trop tard, alors les sociétés industrielles pourraient être confrontés à une "falaise d'énergie nette". Le terme « falaise d'énergie nette » a été introduit par Euan Mearns qui a construit le graphique présenté en Figure 8 en se basant sur l'équation (2) de la section 2.2. Ce graphique montre à quel point la relation entre le EROI et la disponibilité de l'énergie nette délivrée à la société est fortement non-linéaire. Par exemple, si le EROI d'une société passe de 80:1 à 20:1 (soit une réduction de 75%), la part de l'énergie brute produite que la société consacre au secteur énergétique sous forme d'investissement direct et indirecte passe de 1,25% à 5% (en d'autres termes l'énergie nette passe de 98,75% à 95% de la production d'énergie brute). Ce changement est important mais il est probablement gérable par n'importe quelle société. Toutefois, si le EROI passe de 20:1 à 5:1 (une nouvelle réduction de 75%), alors l'énergie « cannibalisée » par le secteur énergétique représente maintenant 20% (et non plus 5%) de la production d'énergie brute, tandis que seulement 80 % (et non plus 95%) de cette production représente de l'énergie nette disponible pour la société. Si le EROI de cette société connaît une nouvelle baisse en dessous de 5, la quantité d'énergie détournée vers le secteur énergétique augmente de façon exponentielle et au delà d'un certain seuil il ne reste même presque plus d'énergie nette disponible pour le reste de la société pour faire autre chose qu'extraire de l'énergie.

Présenté de cette façon, l'importance de l'énergie nette pour le système énergétique semble évidente, tout comme l'est la nécessité d'anticiper correctement comment les EROI des différentes ressources énergétiques vont évoluer dans le futur. Il est aussi vraiment important de comprendre comment les EROI des ressources énergétiques peuvent être augmentés pour contrecarrer les baisses de rendements marginaux d'extraction. Certains diront en effet que le progrès technologique permettra d'augmenter les rendements énergétiques des technologies renouvelables et que donc le même raisonnement conduit à penser que les EROI des ressources énergétiques fossiles non conventionnelles vont également augmenter dans l'avenir. Pour ces personnes, le "pic d'énergie nette" n'exercera pas plus de contrainte que le "pic pétrolier" sur le système économique. Malheureusement, la suite de ce document et sa conclusion montreront que beaucoup d'interrogations demeurent sur ce sujet.

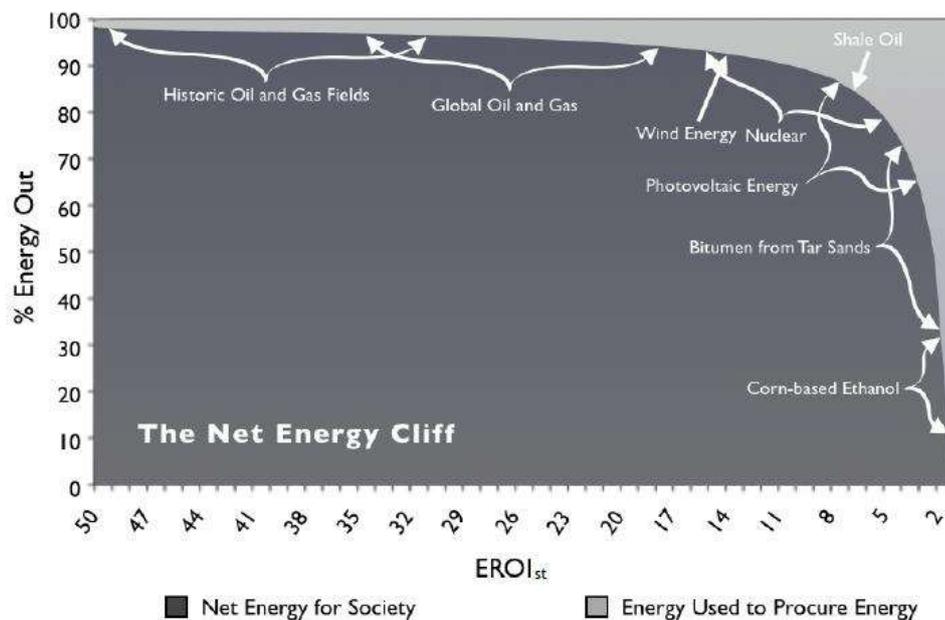


Figure 8. La falaise d'énergie nette de E. Mearns. Source : Lambert et al., 2012.

Avant cela, il est nécessaire de faire le lien entre le concept d'EROI et un indicateur que les économistes affectionnent bien plus pour traiter de la rareté de l'énergie: son prix.

4.3 Des prix de l'énergie plus importants

L'économie conventionnelle postule que les prix sont primordiaux pour déclencher les comportements de décision, même s'il est reconnu que ces signaux-prix sont souvent faussés par l'instabilité intrinsèque des marchés, la spéculation, ou encore la présence de subventions (Victor, 2009). Pourtant, jusqu'à présent dans ce document la notion de prix de l'énergie n'avait pas été mentionnée. Dans un sens ce n'est pas une réelle surprise puisque les partisans de l'Economie Biophysique (Hall et al., 2001; Hall et Klitgaard, 2006), l'école de pensée économique à l'origine des concepts d'énergie nette et d'EROI, émettent clairement des doutes sur l'efficacité du système de prix à orienter correctement (c.à.d. notamment à temps) les sociétés industrielles vers une transition énergétique pourtant nécessaire (Hall et al., 2009). Mais ces dernières années la question du lien entre EROI et prix de l'énergie a été récurrente dans la littérature et dans les débats informels qu'il fallait y trouver une réponse. Jusqu'à présent, trois articles académiques ont étudiés cette question: King et Hall, 2011; Heun et de Wit, 2012; et Herendeen, 2015. King et Hall (2011) ont développé une expression mathématique qui relie le *EROI* d'une ressource d'énergie exploitable, aux conditions économiques qui rendent cette exploitation possible, à savoir le taux de retour financier (c.à.d. le rapport financier bénéfice/coût du producteur) ou Monetary-Return-On-Investment (*MROI*), et le prix unitaire de l'énergie produite p vendus sur le marché. En outre, cette équation dépend aussi de deux autres paramètres : l'intensité énergétique des capitaux d'investissement, $e_{investment}$ (c.à.d. la quantité d'énergie dépensé pour produire le capital physique nécessaire à l'exploitation de la ressource énergétique), et le contenu énergétique d'une unité d'énergie produite e_{out} .

$$p = \frac{MROI}{EROI} \frac{e_{out}}{e_{investment}} \quad (6)$$

Il est possible de générer une représentation graphique de cette équation (6), telle que celle de la Figure 9 où on représente l'évolution du prix du baril de pétrole p (\$/bl) en fonction de son EROI et en testant trois intensités énergétiques différentes pour l'investissement en capital $e_{investment}$ de 10, 20 ou 30 MJ/\$. Pour cela, il a été de plus postulé : un MROI de 1,1 (soit une marge annuelle nette de 10% pour l'industrie du pétrole) et un contenu énergétique e_{out} de 5860 MJ par baril. Les résultats montrent que, comme le suggère la forme de l'équation (6), la relation entre le prix de l'énergie et son EROI est de type inverse. Cette relation est assez sensible à l'intensité énergétique de l'investissement en capital. Les deux autres papiers de Heun et de Wit (2012) et Herendeen (2015) arrivent à la même conclusion : un EROI décroissant, soit pour une ressource énergétique spécifique, soit pour toute l'économie, implique une augmentation des prix de l'énergie.

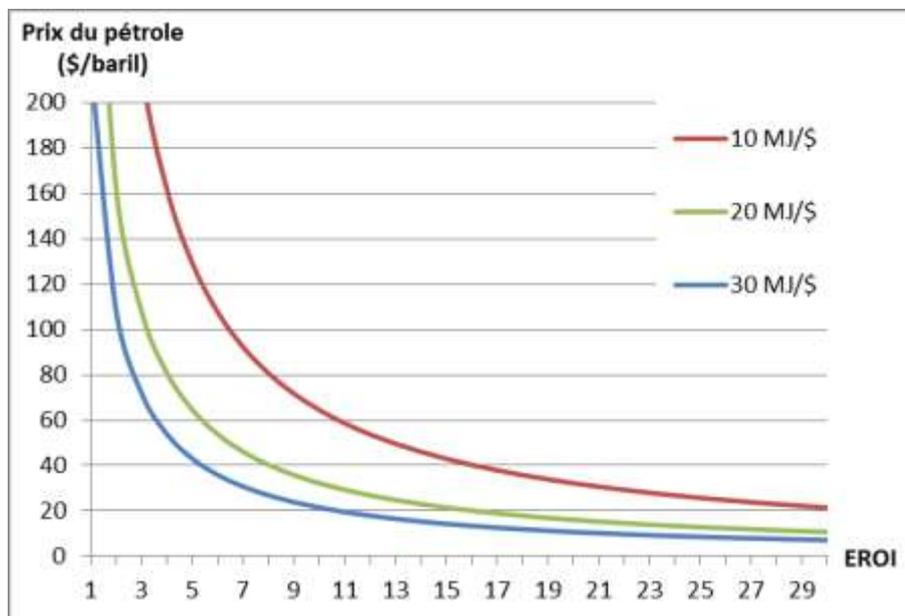


Figure 9. Prix du pétrole brut (\$/bbl) en fonction de son EROI pour différentes intensités énergétiques du capital (10, 20 et 30 MJ/\$). Source : auteur, d'après King et Hall (2011).

La question restante est de comprendre s'il est possible d'anticiper l'évolution future du EROI des différentes ressources énergétiques. Faire ceci implique d'avoir une vision dynamique du EROI, sujet sur lequel la conclusion de ce document reviendra. Avant cela, un point crucial qui n'a pas encore été soulevé doit être adressé : la relation entre l'énergie nette et la rareté des métaux.

4.4 L'interconnexion des secteurs d'extraction de l'énergie et des métaux

Comme pour toute infrastructure, différents métaux rentrent dans la composition des technologies fossiles et renouvelables. Mais certains chercheurs ont mis en évidence que les quantités de métaux nécessaires pour produire une unité d'énergie renouvelable sont plus importantes par rapport aux technologies fossiles. Cela semble vrai pour les métaux rares et communs, et également pour les minéraux communs (Pihl et al., 2012; Kleijn et al., 2011; Elshkaki et Graedel, 2013). D'autre part, les étapes d'extraction de ces métaux depuis des gisements dédiés, puis leurs concentrations en des formes utilisables par l'industrie sont nécessairement consommatrices d'énergie. Or des études ont montrés que le coût énergétique d'extraction des métaux augmente à mesure que leurs concentrations dans les gisements diminuent en suivant une relation de type puissance inverse (Norgate et Jahanshahi, 2010; Northey et al., 2013 ; Fizaine et Court, 2015). On voit ainsi qu'il existe une interdépendance complexe entre les secteurs de l'énergie et des métaux⁷. Dans un article académique récent, Fizaine et Court (2015) ont étudiés cette relation par le biais du EROI. Plus précisément, ils ont analysés la sensibilité du EROI de différentes technologies de production d'électricité renouvelable et nucléaire à l'accroissement du coût énergétique d'extraction de différents métaux. Cet exercice a montré que la demande d'énergie associée à l'extraction des métaux pourrait avoir un impact significatif sur la capacité des technologies dites « vertes » à fournir de l'énergie nette pour la société. Bien sûr, la question de la vitesse de dégradation de la teneur moyenne du minerai d'un métal donné reste sans réponse pour l'instant. Cette évolution sera différente pour chaque type de métal, mais aura finalement un impact négatif sur le EROI des technologies renouvelables (et fossile également, bien que moindre).

À mesure que les consommations en différents métaux augmentent, leurs approvisionnements se tournent progressivement vers des gisements de moins en moins concentrés qui présentent donc des coûts énergétiques d'extraction de plus en plus élevés. Dans le contexte d'une transition vers les énergies renouvelables modernes (éolien, photovoltaïque, etc.), toutes choses égales par ailleurs, la demande croissante d'énergie du secteur des métaux due à la dégradation progressive de la qualité des minerais engendre une demande supplémentaire d'énergie. En outre, l'intermittence des technologies renouvelables implique d'élargir et de renforcer les réseaux de transport et de distribution d'électricité, ce qui génère une demande encore plus importante de métaux. En conséquence, dans la perspective d'une transition énergétique complète vers les technologies d'énergies renouvelables modernes, un cercle vicieux potentiel tel que celui représenté en Figure 10 pourrait se développer entre les secteurs de l'énergie et des métaux. Bien sûr, cette relation auto-entretenu entre les secteurs de l'énergie et des métaux pourrait être atténuée grâce à différents leviers (recyclage des métaux, dématérialisation de l'économie, gains d'efficacité énergétique, substitution technique des métaux, etc.) discutés par Fizaine et Court (2015).

⁷ Pour une analyse plus détaillée de ce sujet passionnant, voir les livres « *L'Âge des Low-Techs* » de Philippe Bihouix et « *Les Métaux rares : opportunité ou menace ?* » de Florian Fizaine.

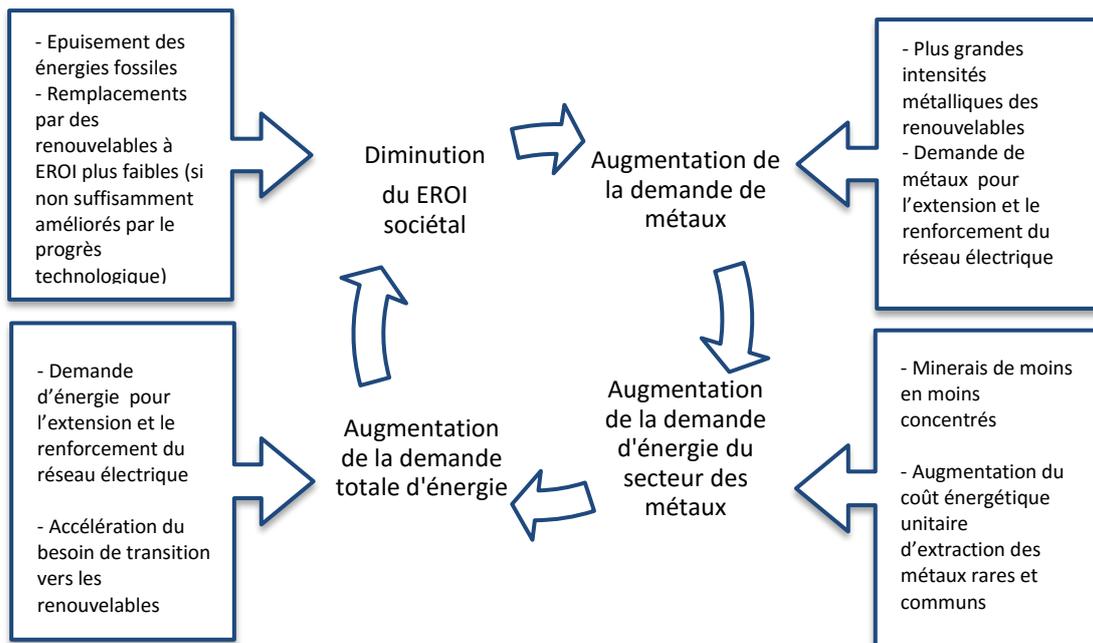


Figure 10. Cercle vicieux potentiel entre les secteurs de l'énergie et des métaux dans le contexte d'une transition complète vers les renouvelables. Source : traduit et adapté de Fizaine et Court, 2015.

Conclusions et perspectives de recherche

Dans la première partie de ce document le concept d'énergie nette et son importance pour comprendre l'évolution des systèmes biologiques et humains plus récents a été présenté. Ensuite, la notion d'EROI a été présentée comme un outil plus pratique pour l'analyse de la contrainte d'énergie nette. Sans présenter en détail la méthodologie à l'origine d'un calcul d'EROI pour conserver une approche simple, l'intérêt de cet indicateur pour évaluer l'accessibilité et la qualité (en termes de capacité à délivrer de l'énergie nette) d'une ressource énergétique a été mise en évidence. Il a été vu que globalement le EROI des combustibles fossiles conventionnels semble être en baisse alors que les combustibles fossiles non conventionnels, comme les sables bitumineux ou les pétroles de roches mères, présentent (pour le moment) des EROI encore plus faibles. Certaines formes d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne semble présenter des EROI relativement élevés par rapport aux formes de production d'électricité fossiles, tandis que d'autres tels que les biocarburants de première génération ont un EROI si faible que l'intérêt même de leur production peut clairement être remis en question. Ceci étant dit, si on considère une caractéristique très importante et propre aux énergies renouvelables, à savoir leur intermittence et donc la nécessité d'une production énergétique de back-up, mais également le besoin de renforcement du réseau électrique, et finalement les quantités plus élevées de métaux communs et rares nécessaires par unité d'énergie renouvelable produite, il semble que les sociétés industrielles se dirigent pour l'instant vers un avenir défini par un EROI inférieur à celui du passé. Ceci impliquerait a priori une accélération de l'épuisement des ressources énergétiques, mais également une hausse du prix de l'énergie. Bien sûr, de futurs progrès technologiques auront tendance à améliorer le EROI des énergies renouvelables. Pour toutes ces raisons il est impératif d'avoir une meilleure compréhension de l'impact de la dynamique du EROI sur le potentiel de croissance économique au niveau sociétal, analyse qui paraît primordiale au vu du présent document et qui a en vérité été très peu explorée jusqu'à présent. De plus, dans un contexte de transition énergétique, cette réflexion demande de tenir également compte des impacts sur le climat des émissions de gaz à effet de serres des énergies fossiles. Pour ces différentes raisons, les recherches futures sur le EROI devraient se concentrer sur la relation dynamique qui existe entre le EROI, le progrès technologique, et la croissance économique. Cela nécessite la construction de modèles dynamiques qui intègrent correctement les multiples boucles de rétroaction qui existent entre les différents éléments du système énergie-environnement-économie⁸.

⁸ L'auteur du présent document poursuit personnellement ce type de recherche à l'heure actuelle. Ses efforts devraient se matérialiser par quatre publications à venir. Une première qui estimera le EROI du système énergétique fossile au niveau mondiale de 1800 à 2010. Une deuxième qui reliera ce EROI de long terme des énergies fossiles à la croissance économique mondiale sur la même période. Dans cet article, un autre objectif sera de définir ce que pourrait être le EROI minimum qu'une société doit avoir pour présenter un niveau positif de croissance économique. Une troisième étude portera sur l'élaboration d'un modèle théorique de croissance économique endogène prenant en compte la problématique du EROI. Un quatrième article intégrera la dynamique du EROI dans un modèle d'évaluation intégré plus large et plus à même de traiter de la question du changement climatique.

References

- Ayres, R. U., 1998. Eco-thermodynamics: economics and the second law. *Ecological Economics*, 26, 189 – 209.
- Ayres, R., and V., Voudouris, 2014. The economic growth enigma: Capital, labour and useful energy? *Energy Policy*, 64, 16-28.
- Balogh, S.; Guilford, M.; Arnold, S.; Hall, C. 2012. EROI of US coal. Unpublished but accessed through personal communication.
- Bihouix, P. L'Âge des Low-Techs : Vers une civilisation techniquement soutenable. Seuil, collection Anthropocène, 2014.
- Brandt, A.R., 2008. Converting oil shale to liquid fuels: Energy inputs and greenhouse gas emissions of the shell in situ conversion process. *Environmental Science & Technology*, 42, 7489-7495.
- Brandt, A.R., 2009. Converting oil shale to liquid fuels with the alberta taciuk processor: Energy inputs and greenhouse gas emissions. *Energy & Fuels*, 23, 6253-6258.
- Brandt, A.R., 2011. Oil Depletion and the Energy Efficiency of Oil Production: The Case of California. *Sustainability*, 3, 1833-1854.
- Brandt A.R., 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*, 4 (8), 1211-1245.
- Brandt A.R, Dale, M., Barnhart, C.J., 2013a. Calculating systems-scale energy efficiency and net energy returns: A bottom-up matrix-based approach. *Energy*, 62, 235-247.
- Brandt A.R., Englander, J., Bharadwaj, S., 2013b. The energy efficiency of oil sands extraction: Energy return ratios from 1970 to 2010. *Energy*, 53, 693–702.
- Campbell, C.J. *Campbell's Atlas of Oil and Gas Depletion*. Springer New York, Second Edition, 411 pp., 2013.
- Campbell, C.J., 2015. Oil Age: Energy in Transition. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Second Edition, 165-171.
- Cleveland, C.J., 2005. Net energy from the extraction of oil and gas in the United States. *Energy* 30, 769–782.
- Cleveland, C.J., Costanza, R., Hall, C.A.S., Kaufmann, R., 1984. Energy and the U.S. economy: a biophysical perspective. *Science*, 225, 890-897.
- Coughlin, K., 2012. A mathematical analysis of full fuel cycle energy use. *Energy* 37, 698–708.
- Dale, M.. *Global Energy Modeling: A Biophysical Approach (GEMBA)*. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering in the University of Canterbury. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2010.
- Daly, H.E., 1985. The circular flow of exchange value and the linear throughput of matter-energy: a case of misplaced concreteness. *Review of Social Economy*, Vol. 43, Issue 3, 279-297.
- Daly, H. E. 1992. Is the entropy law relevant to the economics of natural resource scarcity? - Yes, of course it is! *Journal of Environmental Economics and Management*, 23: 91-95.
- Elshkaki, A., Graedel, T. E., 2013. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 59, 260-273.

- Fizaine, F., and Court, V., 2015. Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI. *Ecological Economics*, 110, 106–118.
- Fizaine, F. Les Métaux rares : opportunité ou menace ? Enjeux et perspectives associés à la transition énergétique. Editions Technip, 2015, 192 pp.
- Freise, J., 2011. The EROI of Conventional Canadian Natural Gas Production. *Sustainability*, 3, 2080-2104.
- Gagnon, N., Hall, C.A.S., Brinker, L., 2009. A preliminary investigation of the energy return on energy invested for global oil and gas extraction. *Energies*, 2, 490–503.
- Georgescu-Roegen, N., 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Grandell, L., C.A.S. Hall, and M. Höök, 2011. EROI for Norwegian Oil and Gas from 1991 to 2008. *Sustainability* 2011, 3, 2050-2070.
- 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*, 3, 1866-1887.
- Hall, C.A.S. 1972. Migration and metabolism in a temperate stream ecosystem. *Ecology* 53 (4): 585-604. (Ph.D. Thesis, University of North Carolina, Chapel Hill, 1970)
- Hall C. A. S., C. J. Cleveland, and R. K. Kaufmann, 1986. *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*, Wiley Interscience, New York.
- Hall, C.A.S., D. Lindenberger, R. Kümmel, T. Kroeger, and W. Eichhorn, 2001. The need to reintegrate the natural sciences with economics. *BioScience*, 51(8): 663-673.
- Hall, C.A.S., Tharakan, P., Hallock, J., Cleveland, C., Jefferson, M., 2003. Hydrocarbons and the evolution of human culture. *Nature*, Vol. 426, 318-322.
- Hall, C.A.S., and Klitgaard, K.A., 2012. *Energy and the Wealth of Nations: Understanding the Biophysical Economy*. Springer, 407 pp., ISBN 978-1-4419-9397-7.
- Hall, C.A.S, and Klitgaard, K.A., 2006. The need for a new, biophysical-based paradigm in economics for the second half of the age of oil. *International Journal of Transdisciplinary Research*, Vol. 1, No. 1, 4-22.
- Hall, C.A.S., and Day, J.W., 2009. Revisiting the limits to growth after peak oil. *American Scientist*, 97, 230–237.
- Hall, C.A.S., Balogh, S., and Murphy, D.J., 2009. What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies* 2009, 2, 25-47.
- Hall, C.A.S., and Klitgaard, K.A., 2012. *Energy and the Wealth of Nations: Understanding the Biophysical Economy*, Springer, 407 pp., ISBN 978-1-4419-9397-7.
- Hall, C.A.S, Lambert, J., and Balogh, S., 2014. EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, Vol. 64 (2014), pp.141–152.
- Herendeen, R.A., 2004. Net Energy Analysis: Concepts and Methods. In: Cleveland, C.J. (Ed.), *Encyclopedia of Energy*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands 4, pp. 283–289.
- Herendeen, R.A., 2015. Connecting net energy with the price of energy and other goods and services. *Ecological Economics*, 109, 142–149.
- Heun, M., De Wit, M., (2012). Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions. *Energy Policy*, 40, 147-158.

- Hu, Y., Feng, L., Hall, C.C., Tian, D., 2011. Analysis of the Energy Return on Investment (EROI) of the Huge Daqing Oil Field in China. *Sustainability*, 3, 2323-2338.
- Hubbert, K., 1956. Nuclear energy and the fossil fuels. Drilling and Production Practices, American Petroleum Institute. Conference paper originally presented before the Spring Meeting of the Southern District Division of Production, American Petroleum Institute, Plaza Hotel, San Antonio, Texas March 7-8-9, 1956.
- Jackson, P.M., 2009. The Future of Global Oil Supply. Energy Research Associates, Cambridge.
- King, C. W., Hall, C. A. S., (2011). Relating Financial and Energy Return on Investment. *Sustainability*, 3, 1810-1832.
- Kleijn, R., Van der Voet, E., Kramer, G. J., Van Oers, L., Van der Giesen, C., 2011. Metal requirements of low-carbon power generation. *Energy*, 36 (9), 5640-5648.
- Laherrère, J., 2004. Oil and Natural Gas Resource Assessment: Production Growth Cycle Models. *Encyclopedia of Energy*, 617-631.
- Lambert, J., Hall, C., Balogh, S., Poisson, A., Gupta, A., 2012. EROI of Global Energy Resources: Preliminary Status and Trends, Report 1 of 2. UK-DFID 59717, 2 November 2012.
- Lambert, J., Hall, C., Balogh, S., Gupta, A., Arnold, M., 2014. Energy, EROI and Quality of Life. *Energy Policy*, Vol. 64, 153-167.
- Lotka, A.J., 1922. Contributions to the energetics of evolution. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 8: 147-151.
- Maslow, A., 1943. A theory of human motivation. *Psychological Review* 50, 370–396.
- Moerschbaeche, M., and 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*, 3, 2009-2026.
- Mulder, K., Hagens, N., 2008. Energy return on investment: towards a consistent framework. *Ambio* 39, 74–79.
- Murphy, D.J. and Hall, C.A.S., 2010. Year in review – EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1185, 102-118.
- Murphy, D.J. and Hall, C.A.S., 2011. Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth in "Ecological Economics Reviews." Robert Costanza, Karin Limburg & Ida Kubiszewski, Eds. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1219: 52–72.
- Murphy, D.J; Hall, C.A.S.; Dale, M.; Cleveland, C.J., 2011. Order from chaos: A preliminary protocol for determining the EROI of fuels. *Sustainability*, 3, 1888-1907.
- Norgate, T., and Jahanshahi, S., 2010. Low grade ores - Smelt, leach or concentrate? *Minerals Engineering*, 23 (2), 65-73.
- Northey, S., Haque, N., Mudd, G., 2013. Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining, *Journal of Cleaner Production*, 40, 118-128.
- Odum, H. T., and R. C. Pinkerton. 1955. Time's speed regulator: The optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems. *American Scientist* 43:331–343.
- Odum, H.T., 1971. *Environment, Power, and Society*. Wiley-Interscience, New York, 331 pp.
- Odum, H.T.; 1973. Energy, ecology and economics. *AMBIO*, Vol.2, No.6, In *Energy in Society: A Special Issue*, pp. 220-227.

- Pihl, E., Kushnir, D., Sandén, B., Johnsson, F., 2012. Material constraints for concentrating solar thermal power. *Energy*, 44, 944-954.
- Poisson, A., and Hall, C.A.S., 2013. Time series EROI for Canadian oil and gas. *Energies*, 6, 5940-5959.
- Ramirez, P., and Hall, C.A.S., 2013. The relation of oil to the Mexican economy: past, present and future. In: Yáñez-Avancibia, A., Dávalos-Sotelo, R., Day, J.W., Reyes, E. (Eds.), *Ecological dimensions for sustainable socioeconomic development*, WIT Press, p. 628.
- Sell, B., Murphy, D., Hall, C.A., 2011. Energy Return on Energy Invested for Tight Gas Wells in the Appalachian Basin, United States of America. *Sustainability*, 3, 1986-2008.
- Stern, D. I., Kander, A., 2012. The Role of Energy in the Industrial Revolution and Modern Economic Growth. *Energy Journal*, 33 (3), 125-152.
- Tainter, Joseph A. *The Collapse of Complex Societies*, New York & Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1988.
- Victor, D., 2009. *The Politics of Fossil-Fuel Subsidies*. Global Subsidies Initiative, IISD, Geneva.
- Weißbach, D., G. Ruprecht, A. Huke, K. Czernski, S. Gottlieb, A. Hussein., 2013. Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. *Energy*, 52, 210-221.

DERNIERES PARUTIONS

Les risques de contre-productivité à l'usage des innovations vertes dans le bâtiment n°39

Vincent Renaud-Giard

Taxer l'achat et/ou l'usage du véhicule n°38

Bénédicte MEURISSE

Une Analyse Contrefactuelle du développement des énergies Renouvelables n°37

Marc BAUDRY et Clément BONNET

Les flottes de véhicules : Quelles stratégies privées et publiques pour quels enjeux économiques et environnementaux ? n°36

Bénédicte MEURISSE avec Hugo BOIS

Climate Change Mitigation in Temperate Forests : The Case of The French Forest Sector n°35

Sylvain CAURLA et Philippe DELACOTE

Comparing Biomass-Based and Conventional Heating Systems with Costly CO2 Emissions: Heat Cost Estimations and CO2 Breakeven Prices n°34

Lilian CARPENÈ, Vincent BERTRAND et Timothée OLLIVIER

Nos publications sont disponibles sur le site chaireconomieduclimat.org

Directeur des publications Information et Débats : Marc BAUDRY

Les opinions exposées ici n'engagent que les auteurs. Ceux-ci assument la responsabilité de toute erreur ou omission