

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Energy Return on Energy Investment (EROEI) :
Un éclairage sur l'intérêt et les écueils de cet indicateur-clé
dans l'analyse de la durabilité de systèmes énergétiques

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
VAN WETTER, July
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement
M-ENVIG

Année Académique : 2018-2019

Directeur : Prof. Michel Huart

Remerciements

Au terme de ce mémoire, mais aussi d'un an et demi d'un deuxième cursus universitaire vraiment enrichissant, je souhaiterais remercier mon promoteur M. Michel Huart, qui m'a transmis une véritable passion pour le domaine de l'énergie et qui m'a aiguillée dans ce sujet tortueux mais captivant qu'est l'EROEI.

Je remercie aussi affectueusement mon mari, Pierre, pour son support à toute épreuve dans un parcours qui n'était pas d'emblée évident et qui a nécessité une flexibilité à laquelle il s'est plié de bon gré.

Mille mercis également à mon fils, Thomas, qui m'a grandement soutenue avec ses encouragements tendres et admiratifs devant une maman devenue étudiante, comme lui.

Je dois aussi de chaleureux remerciements à mon chien, Maggy, toujours fidèle et attentive à me distraire et me sortir de mes longues heures passées devant l'ordinateur.

Enfin, je voudrais remercier tout particulièrement et sincèrement Charlotte et Adel, sans qui jamais je n'aurais changé de voie et pris ce chemin vers une nouvelle vie...

Résumé

L'énergie est un facteur fondamental pour le fonctionnement de nos sociétés. Dans le contexte actuel de l'épuisement de nos ressources énergétiques fossiles et de la nécessité d'une transition vers des sources plus propres et plus durables d'énergie, une attention particulière est accordée à la quantité d'énergie nette qu'il est possible d'obtenir des diverses alternatives énergétiques. Un indicateur est tout particulièrement utilisé pour appréhender ce point, il s'agit du TRE (Taux de Retour Énergétique), ou plus communément EROEI (*Energy Return on Energy Investment*).

L'indicateur EROEI se définit simplement comme le ratio de l'énergie délivrée sur l'énergie investie. Toutefois, dans la pratique, son application rencontre bien des difficultés, qui sont source de beaucoup de confusion. Dès lors, nous avons voulu, dans le présent travail, répertorier et analyser ces difficultés afin d'en dégager des recommandations et évaluer la pertinence réelle de l'EROEI comme indicateur de la durabilité de systèmes énergétiques.

Notre analyse a identifié deux types de problématiques, l'un d'ordre conceptuel, l'autre relatif aux données utilisées. Ainsi, les principaux problèmes rencontrés dans la conception de l'indicateur sont : la définition des limites du système, la conversion pour l'agrégation des différentes formes d'énergie et l'aspect temporel. Du point de vue des données, ce sont les sources et les manipulations de données ainsi que leur variabilité temporelle et selon le contexte qui peuvent être responsables de la confusion rencontrée.

Pour chacune des problématiques, nous avons émis des recommandations, qui se résument toutes, finalement, à s'assurer de la cohérence de l'approche méthodologique et des données utilisées avec l'objectif et le contexte de l'étude et à faire preuve de transparence dans la communication des données de l'analyse.

Nous avons ensuite exploité un cas d'étude appliqué à un système photovoltaïque (PV) pour y illustrer concrètement et quantitativement l'impact des choix méthodologiques et des données utilisées. Certains facteurs spécifiques ont ainsi montré qu'ils avaient un grand impact sur les valeurs d'EROEI des systèmes PV, notamment l'énergie incorporée (= énergie nécessaire aux étapes du cycle de vie du système) et l'insolation (= énergie solaire par unité de temps et de surface). Nous concluons de cette analyse l'importance d'une cohérence entre les valeurs de paramètres utilisées et le contexte de l'étude ainsi que la nécessité d'une transparence sur la méthodologie et les données considérées, conclusions qui sont en ligne donc avec nos recommandations issues de l'analyse théorique des difficultés.

Enfin, nous avons abordé quelques considérations sur les limitations de l'EROEI en tant qu'indicateur unique de la durabilité de systèmes énergétiques et quelques réflexions sur une perspective plus large de l'utilisation de l'EROEI. Dans ces dernières, nous évoquons comment l'analyse d'un EROEI dynamique systémique permettrait d'appréhender à l'échelle de réseaux entiers l'impact des scénarios de transition sur l'énergie nette.

Nous concluons finalement à la réelle utilité de l'EROEI en tant qu'indicateur dans l'analyse de la durabilité énergétique de systèmes de production d'énergie mais nous insistons sur le fait qu'il doit être utilisé avec la plus grande circonspection et avec toute la transparence requise. En outre, s'il peut être un outil précieux pour l'évaluation de scénarios de transition, il ne doit pas être l'unique indicateur à prendre en compte dans l'optique du développement de politiques énergétiques « soutenables ».

Table des matières

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. L'EROEI : Définition, historique et portée | 3 |
| 2.1. Définition | 3 |
| 2.2. Historique | 5 |
| 2.3. Portée de l'EROEI | 5 |
| 2.3.1. <i>Lien avec la biologie, l'histoire humaine et le développement de nos sociétés</i> | 5 |
| 2.3.2. <i>Applications</i> | 7 |
| 2.4. Conclusions du chapitre | 9 |
| 3. Difficultés pratiques de l'EROEI et recommandations | 11 |
| 3.1. Conception de l'indicateur | 11 |
| 3.1.1. <i>Limites du système</i> | 11 |
| 3.1.1.1. Numérateur | 11 |
| 3.1.1.2. Dénominateur | 12 |
| 3.1.1.3. Tentatives de standardisation des limites du système | 16 |
| 3.1.2. <i>Formes d'énergie</i> | 19 |
| 3.1.2.1. Equivalents thermiques | 19 |
| 3.1.2.2. Conversion en énergie primaire | 19 |
| 3.1.2.3. Méthode « économique » | 21 |
| 3.1.2.4. Autres méthodes de conversion | 22 |
| 3.1.2.5. Conclusions | 23 |
| 3.1.3. <i>Aspect temporel</i> | 23 |
| 3.2. Données utilisées | 24 |
| 3.2.1. <i>Origine et manipulation des données</i> | 24 |
| 3.2.2. <i>Contexte considéré</i> | 25 |
| 3.3. Conclusions du chapitre et recommandations | 27 |
| 4. Cas pratique d'une analyse d'EROEI – Etude d'un système photovoltaïque | 31 |
| 4.1. Technologie PV | 31 |
| 4.1.1. <i>Description de la technologie</i> | 31 |
| 4.1.2. <i>Paramètres</i> | 32 |
| 4.1.2.1. Irradiance et insolation | 32 |
| 4.1.2.2. Performance de l'installation | 32 |
| 4.1.2.3. Durée de vie de l'installation | 33 |
| 4.1.2.4. Energie incorporée | 33 |

| | |
|---|----|
| 4.2. Cas d'étude | 35 |
| 4.2.1. <i>Objectif</i> | 35 |
| 4.2.2. <i>Méthode</i> | 35 |
| 4.2.2.1. Sensibilité de l'EROEI aux choix conceptuels | 35 |
| 4.2.2.2. Sensibilité de l'EROEI aux données..... | 38 |
| 4.2.3. <i>Paramètres et fourchettes de variation prises en compte</i> | 39 |
| 4.2.4. <i>Résultats et discussion</i> | 41 |
| 4.2.4.1. EROEI _{simp, elec, PE-eq} et q_{corr} en conditions « standard » | 41 |
| 4.2.4.2. Sensibilité de l'EROEI _{PE-eq} aux valeurs des différents paramètres | 43 |
| 4.2.4.3. EROEI _{PE-eq} selon valeurs « recommandées » et « projetées » des paramètres..... | 48 |
| 4.2.4.4. Mise en perspective des valeurs d'EROEI..... | 49 |
| 4.3. Conclusions du chapitre | 50 |
| 5. Réflexions complémentaires | 53 |
| 5.1. EROEI comme indicateur de la durabilité de systèmes énergétiques | 53 |
| 5.2. EROEI dans les scénarios de transition énergétique | 54 |
| 6. Conclusion | 57 |
| Annexe : Données issues de la revue de littérature pour le cas d'étude PV | 59 |
| Bibliographie | 61 |

Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Représentation schématique d'un process et de ses composantes énergétiques | 3 |
| Figure 2 : Relation entre EROEI et énergie nette – « Net Energy cliff » | 4 |
| Figure 3 : Pyramide des besoins énergétiques | 9 |
| Figure 4 : Schéma du procédé de production des systèmes PV mc-Si et pc-Si | 34 |
| Figure 5 : Valeurs des différents types d'EROEI en conditions « standard » | 41 |
| Figure 6 : Valeurs de l'EROEI _{PE-eq} pour les paramètres min et max | 43 |
| Figure 7 : Positionnement des valeurs d'EROEI déterminées sur le « Net Energy Cliff » | 50 |

Table des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Cadre de classification des EROI adapté de Mulder et Hagens (2008)..... | 17 |
| Tableau 2 : Cadre de classification des EROI adapté de Murphy et al. (2011)..... | 17 |
| Tableau 3 : Cadre de classification des ERR adapté de Brandt et Dale (2011)..... | 18 |
| Tableau 4 : Valeurs min, max, médianes et moyennes des paramètres issues de la revue de littérature | 39 |
| Tableau 5 : Conditions « recommandées » et conditions « projetées » | 41 |
| Tableau 6 : Valeurs des différents types d'EROEI en conditions « standard »..... | 41 |
| Tableau 7 : Comparaison de l'EROEI _{PE-eq} calculé avec les valeurs d'EROEI _{PE-eq} moyenne et médiane des différentes études | 42 |
| Tableau 8 : Valeurs de l'EROEI _{PE-eq} pour les paramètres min et max | 43 |
| Tableau 9 : Valeurs d'EROEI _{PE-eq} extrêmes minimale et maximale..... | 48 |
| Tableau 10 : Valeurs de l'EROEI _{PE-eq} dans les conditions « recommandées » et les conditions « projetées »..... | 49 |

Liste des acronymes¹

AC : Alternating Current
a-Si : Silicium amorphe
BAPV : Building Adapted Photovoltaic
BIPV : Building Integrated Photovoltaic
BoS : Balance of System
CdTe : Tellurure de Cadmium
CED : Cumulative Energy Demand
CI(G)S : Cuivre Indium (Gallium) Sélénium
DC : Direct Current
DR : Degradation Rate
EPBT : Energy Payback Time
ER : Energie Renouvelable
ERO(E)I : Energy Return on (Energy) Investment
ERR : Energy Return Ratio
G(E)ER : Gross (External) Energy Ratio
GHI : Global Horizontal Insolation
IEA : International Energy Agency
I-O : Input-Output
LCA : Life Cycle Assessment
mc-Si : Silicium mono-cristallin
MG-Si : Silicium de grade métallurgique
NEA : Net Energy Analysis
N(E)ER : Net (External) Energy Ratio
nr-CED : non-renewable Cumulative Energy Demand
pc-Si : Silicium poly-cristallin
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur
PES : Primary Energy Source
PE-eq : Primary Energy equivalent
PIB : Produit Intérieur Brut
PR : Performance Ratio
PROPI : Power Return on Power Investment
PRR : Power Return Ratio
PV : Photovoltaïque
SoG-Si : Silicium de grade solaire

¹ Il est à noter que dans ce travail l'anglais sera largement utilisé aux fins de terminologie spécifique. Nous avons en effet opté pour la conservation de termes et acronymes tels qu'employés dans la littérature scientifique, très majoritairement anglophone sur le sujet.

1. Introduction

« L'énergie est le sang de notre civilisation moderne » (Mulder et Hagens, 2008). Bien plus que cela même, l'énergie est en réalité « le déterminant majeur de tout ce qui se passe sur Terre » ; elle « fait partie de tout ce que nous faisons » (Hall, 2017b, p. v et vi). Tout être vivant a besoin d'énergie pour survivre et se développer, tout mouvement a besoin d'énergie pour se produire, tout procédé a besoin d'énergie pour transformer des matières premières en ce que nous voulons... L'énergie est omniprésente, tellement que nous pourrions presque l'oublier.

Actuellement, nous avons à notre disposition des quantités incroyables d'énergie « facile », au point que cela nous semble « naturel ». Pourtant, cela n'a pas toujours été. Jusqu'à une période très récente, à l'échelle de l'histoire humaine, les seules formes d'énergie qui nous alimentaient étaient la nourriture et le bois de chauffage. Tout a basculé avec le développement de l'utilisation des ressources fossiles et de leur incroyable densité énergétique, nous procurant une énergie abondante et bon marché. Cette importante disponibilité d'énergie et l'efficacité croissante avec laquelle elle a été utilisée ont permis l'énorme expansion de la population humaine sur les cent dernières années et la grande amélioration de son confort et de sa longévité (Lambert *et al.*, 2014 ; Hall, 2017b, p95). La prospérité de nos sociétés en termes économiques apparaît également étroitement liée à l'énergie, une corrélation positive forte existant entre le niveau de dépense énergétique d'une nation et la croissance de son PIB (Dale *et al.*, 2012 ; Fizaine et Court, 2015).

Cependant, la situation pourrait bien changer... L'épuisement progressif de nos ressources fossiles et la diminution manifeste de la qualité des gisements exploités est une première alerte, mais l'alarme de loin la plus importante est celle sonnée par l'enclenchement de modifications climatiques sans précédents dans l'histoire de l'Humanité. La très large part qu'occupe la combustion de ressources fossiles dans l'énergie que nous utilisons est responsable d'émissions de quantités énormes de gaz à effet de serre, dont la concentration dans l'atmosphère a désormais dépassé de plus de 40% les concentrations que la Terre a connue sur le dernier million d'années. La nécessité d'une transition vers d'autres sources d'énergie plus durables est devenue manifeste.

Dans ce contexte, des questions importantes se posent : seront-nous encore en mesure de produire une énergie suffisante et à un coût abordable ? Coût financier mais aussi, et peut-être surtout, coût énergétique ; c'est-à-dire, l'énergie à investir dans les alternatives de production de vecteurs énergétiques utilisables par la société sera-t-elle suffisamment compensée par l'énergie que ces alternatives généreront ? Car ce qui importe réellement, ce n'est pas l'énergie totale que l'on peut produire mais l'énergie nette que nous avons à disposition, une fois que l'on s'est acquitté du tribut énergétique nécessaire à son acquisition.

Pour pouvoir répondre à ces questions, un indicateur est devenu très populaire. Il s'agit du taux de retour énergétique ou TRE, largement plus connu sous son acronyme anglais d'EROI, pour *Energy Return on Investment*. Cet indicateur, pour lequel nous préférons utiliser le terme d'EROEI (*Energy Return on Energy Investment*), plus explicite, possède une définition simplissime, qui est le ratio de l'énergie délivrée sur l'énergie investie. Aussi évidente qu'elle paraisse, toutefois, cette définition recèle dans la pratique bien des pièges et difficultés, qui peuvent venir obscurcir, voire anéantir, l'intérêt de l'indicateur et entacher sa crédibilité comme outil de décision dans les politiques énergétiques.

L'objectif de ce mémoire sera donc de tenter de cerner l'ampleur des problématiques liées à l'utilisation de l'EROEI et d'en dégager des recommandations afin de pouvoir défendre un indicateur

le mieux appréhendé possible comme outil incontournable de l'analyse de la durabilité de systèmes énergétiques.

Ce travail, principalement basé sur une revue de la littérature scientifique, sera structuré comme suit. Un premier chapitre abordera la définition théorique du concept d'EROEI, son historique et la portée qu'il peut avoir. Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous entrerons au cœur des difficultés rencontrées dans l'application pratique de l'indicateur, tant d'un point de vue conceptuel que du point de vue des données utilisées, et nous en dégagerons quelques recommandations. Puis, dans un troisième chapitre, plus appliqué, nous envisagerons un cas d'étude dans lequel nous illustrerons de manière quantitative les impacts engendrés sur les valeurs d'EROEI par les différents facteurs méthodologiques et relatifs aux données vus au chapitre précédent. Enfin, nous aborderons quelques réflexions dans une perspective plus large avant de terminer par une conclusion de l'ensemble du travail.

2. L'EROEI : Définition, historique et portée

2.1. Définition

L'*Energy Return on Energy Investment* (EROEI) se définit comme le ratio entre la quantité d'énergie délivrée par un procédé de production d'énergie (*energy returned* – E_{ret}) et la quantité d'énergie nécessaire, dite « investie » (*energy invested*, E_{inv}) pour générer cette énergie (Hall, 2017a). (Eq. 1)

$$EROEI = E_{ret} / E_{inv} \quad (\text{Eq. 1})$$

Le numérateur E_{ret} et le dénominateur E_{inv} sont généralement exprimés dans la même unité, de sorte que le ratio ainsi obtenu est adimensionnel (ex : 20:1²) (Hall *et al.*, 2009).

Bien que l'EROEI soit mathématiquement un calcul d'output divisé par un input, il ne calcule pas l'efficacité, au sens propre, de la conversion énergétique du procédé considéré et ne doit donc pas être confondu avec celle-ci. Il évalue plutôt le « coût » énergétique de la production d'énergie, c'est-à-dire quelle quantité d'énergie économiquement utile doit être investie pour obtenir l'énergie économiquement utile produite (Murphy *et al.*, 2016). Le dénominateur n'inclut donc pas l'énergie primaire E_{PES} contenue dans la ressource (PES – *Primary Energy Source*) qui est extraite et transformée par le procédé considéré. Ceci est représenté schématiquement à la Figure 1.

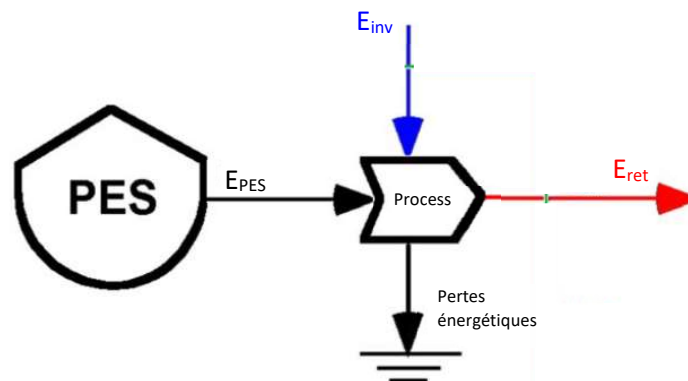


Figure 1 : Représentation schématique d'un process et de ses composantes énergétiques (d'après Raugei et al., 2016)

Le calcul de l'EROEI est généralement appliqué au cas d'un combustible en sortie de mine ou de puits (« *mine mouth* », « *well head* ») (Hall *et al.*, 2009). Toutefois, nous verrons dans la suite de ce travail les nombreuses subtilités qu'implique en réalité la définition simple de l'EROEI présentée ici et la grande variété existante d'interprétations de l'EROEI au-delà du « simple » $EROEI_{mine\ mouth}$.

Etroitement relié à l'EROEI, un autre terme est fréquemment utilisé. Il s'agit de l'énergie nette (*net energy*), également appelée excédent énergétique (*energy surplus*) (Hall *et al.*, 2009). Celle-ci est définie comme la quantité d'énergie restant de l'énergie brute d'une ressource exploitée après que

² Notons que cette formulation des valeurs d'EROEI sous le format x:1 est celle utilisée par Hall et d'autres auteurs comme Murphy. Toutefois, certains lui préfèrent une formulation constituée du simple chiffre x. Nous utiliserons indifféremment les 2 formulations, adoptant plutôt la première dans le présent chapitre mais utilisant par ailleurs la deuxième dans l'étude quantitative du chapitre 4.

l'énergie nécessaire au procédé a été soustraite (Chen *et al.*, 2017). Elle est donc égale à E_{ret} moins E_{inv} (Eq. 2)

$$E_{net} = E_{ret} - E_{inv} \quad (\text{Eq. 2})$$

L'EROEI et l'énergie nette donnent tous deux une indication sur l'« efficacité » (avec la remarque ci-dessus sur l'utilisation de ce terme !) de la production énergétique (Rye et Jackson, 2018). Toutefois, l'énergie nette est une quantité d'énergie, exprimée avec des unités, et non un ratio adimensionnel comme l'est l'EROEI. Sa valeur n'aura dès lors de pertinence qu'exprimée en regard d'autres valeurs, comme la quantité d'énergie brute produite (E_{ret}) ou la quantité d'énergie investie (E_{inv}).

L'équation (3), facilement dérivée des équations (1) et (2), relie l'énergie nette à l'EROEI et permet de montrer mathématiquement que lorsque l'EROEI est inférieur à 1, l'énergie nette est négative. Au-delà de cette observation un peu triviale, il est également intéressant de noter par cette équation, et nous reviendrons plus loin sur les implications de ce fait, que la relation entre énergie nette et EROEI est exponentielle, c'est-à-dire que l'énergie nette chute très rapidement aux faibles valeurs d'EROEI, comme visuellement évident dans la Figure 2. C'est pour cette raison que certains auteurs, comme Murphy et Hall (2010), ont qualifié cette relation de « *Net Energy Cliff* ».

$$E_{net} = E_{ret} (1 - \text{EROEI}^{-1}) \quad (\text{Eq. 3})$$

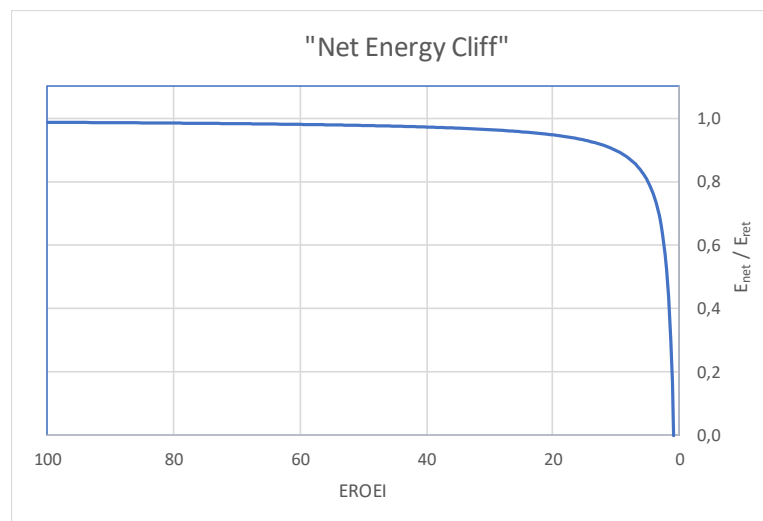


Figure 2 : Relation entre EROEI et énergie nette – « Net Energy Cliff » (d'après Murphy et Hall, 2010)

L'analyse de l'énergie nette, ou *Net Energy Analysis* (NEA), fait référence à une large catégorie de méthodes qui visent à déterminer l'EROEI ou d'autres ratios de retour énergétique (*Energy Return Ratios* – ERR) en lien avec l'énergie nette et qui comparent donc la quantité d'énergie consommée pour extraire et transformer une ressource énergétique à la quantité d'énergie fournie (Brandt et Dale, 2011). La NEA permet ainsi de quantifier dans quelle mesure une source d'énergie est une source nette ou un puits d'énergie (Arvesen et Hertwich, 2015).

Dans la section suivante, nous présentons un bref historique de l'approche NEA et de la notion d'EROEI.

2.2. Historique

Le concept d'énergie nette existe depuis une centaine d'années (Hall, 2017a). Il a été tout particulièrement associé à l'écologue Howard Odum, qui, au milieu du siècle dernier, a étudié les flux d'énergie dans les systèmes sociaux et environnementaux (Brandt et Dale, 2011). Dans ses travaux, il souligne qu'il ne suffit pas de regarder les volumes quantitatifs d'énergie disponible, c'est-à-dire le stock de ressources, mais que la variable la plus importante est la quantité d'énergie qui est réellement disponible pour la société, une fois que les besoins en énergie du système énergétique lui-même ont été remplis (Fizaine et Court, 2015, d'après Odum, 1973).

Le terme spécifique d'EROEI trouve, lui, son origine dans les années 1970, dans les études de Hall sur la migration des poissons (Hall, 2017a). Ce dernier a mis en évidence que les poissons qui migraient trouvaient dans les endroits qu'ils atteignaient des sources de nourriture leur fournissant une plus grande énergie nette même en tenant compte du coût énergétique de leur migration. Il a appréhendé cela à travers la notion d'*Energy Return On Investment* (Murphy *et al.*, 2016, référant Hall, 1972).

Le terme d'EROEI a été utilisé formellement pour la première fois en parlant des combustibles fossiles dans les années 1980 (Murphy et Hall, 2010, référant notamment Cleveland *et al.*, 1984 et Hall *et al.*, 1986). A la suite des deux chocs pétroliers de 1973 et 1979, l'approche d'analyse de l'énergie nette (NEA) a, en effet, rencontré un grand intérêt dans cette période. Par la suite, avec la baisse du prix du pétrole et la dissipation du souvenir des crises, le concept d'EROEI a été délaissé, souffrant également de critiques quant à ses difficultés méthodologiques et au peu d'informations complémentaires qu'il fournissait, selon certains, par rapport aux analyses économiques (Brandt et Dale, 2011 ; Murphy et Hall, 2010).

Ces dernières années toutefois, les préoccupations liées à l'épuisement des ressources fossiles et les questions relatives à la transition énergétique ont fait resurgir l'intérêt dans la NEA. L'EROEI a ainsi connu une nouvelle rentrée en grâce (Brandt et Dale, 2011).

La définition et l'origine de l'EROEI ainsi présentées, la section suivante aborde toute la portée de ce concept, en examinant son importance et ses implications pour nos sociétés ainsi que des applications concrètes de celui-ci.

2.3. Portée de l'EROEI

2.3.1. Lien avec la biologie, l'histoire humaine et le développement de nos sociétés

Comme l'énonce Hall dans son livre *"Energy Return on Investment – A Unifying Principle for Biology, Economics, and Sustainability"*, *"all of life is about making energy investments to gain more energy with the expectation of continuing their own life and sending genes into the future"* (Hall, 2017b, p.49). Si un organisme veut survivre, croître et se reproduire, il doit se procurer plus d'énergie qu'il n'en utilise à l'obtenir et à soutenir son propre métabolisme. Les espèces qui prospèrent à travers l'évolution sont dès lors celles capables d'acquérir une grande quantité d'énergie excédentaire qui leur permet de devenir abondantes et de se répandre (Hall *et al.*, 2009, Murphy *et al.*, 2016). Ainsi, la biologie et le fonctionnement-même des communautés vivantes sont directement basés sur l'énergie nette, l'énergie qu'un organisme peut consacrer à sa croissance après avoir payé les coûts énergétiques métaboliques (Murphy *et al.*, 2016).

De la même manière que l'histoire de la biologie et des espèces en général, l'histoire humaine en particulier est largement assujettie à l'énergie nette et au concept d'EROEI. Le développement de nos

sociétés dépend grandement de leur capacité à acquérir substantiellement plus d'énergie qu'elles n'en utilisent à obtenir cette énergie (Hall *et al.*, 2009). On peut même avancer, comme indiqué par Hall (2017b, p89), que la « civilisation est un produit de l'énergie excédentaire (*surplus energy*) ».

Au cours de la majeure partie de l'histoire de l'Humanité, l'énergie a été « chère » (Hall, 2017b, p4), c'est-à-dire qu'une grande part de l'activité humaine était dédiée à obtenir cette énergie. Selon Hall (2017a) d'après une étude de King *et al.* (2015), pendant la période 1300-1750 en Angleterre, environ un tiers à la moitié de toute l'activité économique était employée à l'obtention de l'énergie (à savoir, à cette époque, la nourriture, le bois de chauffage et le fourrage) nécessaire au fonctionnement de cette activité économique, ce qui signifie un EROEI d'environ 2-3:1. Mais, avec la récente (à l'échelle de l'histoire humaine) utilisation des combustibles fossiles et leur formidable densité énergétique, l'EROEI a considérablement augmenté pour atteindre des valeurs de 20:1 ou davantage. De ce fait, plus que quelques pourcents seulement de toute l'activité économique n'ont été nécessaires pour obtenir l'énergie et la société s'est enrichie considérablement, menant à une économie dont la croissance perpétuelle est devenue la « norme » (Hall, 2017a).

Une société dite « évoluée » se doit donc d'avoir un EROEI élevé (Dupont *et al.*, 2017). En effet, avec un EROEI bas, la faible quantité d'énergie nette disponible ne permet à la société que de satisfaire ses besoins de base. Avec un EROEI plus important, cette société peut entreprendre d'autres activités et consacrer de l'énergie, du capital et de la main-d'œuvre à autre chose que la génération d'énergie et d'alimentation, comme la production de biens et services et la mise en place d'un système éducatif, de soins de santé et de loisirs. Plus une société mobilise facilement de l'énergie (haute valeur de l'EROEI), plus elle peut consacrer de l'énergie à des activités moins essentielles (Dupont *et al.*, 2017). Des études ont permis de mettre en évidence un lien entre l'EROEI à l'échelle sociétale et le niveau de développement et de « bien-être ». Lambert *et al.* (2014), notamment, démontrent les corrélations fortes qui existent entre l'EROEI et des indicateurs de qualité de vie, tels que le Human Development Index des Nations-Unies (HDI).

Actuellement toutefois, depuis une ou deux décennies, l'EROEI de nos principaux combustibles, à savoir les combustibles fossiles, est en déclin (voir section 2.3.2) et il apparaît par ailleurs que la plupart des alternatives énergétiques renouvelables ainsi que les ressources fossiles non-conventionnelles (ex : gaz de schiste, sables bitumineux) soient caractérisées par des EROEI significativement inférieurs à ceux de nos combustibles fossiles conventionnels (Hall *et al.*, 2014). En conséquence, on peut dire que l'énergie nette disponible pour notre société est amenée à diminuer.

C'est ici qu'il est important de rappeler la relation entre EROEI et énergie nette et la notion de « *Net Energy Cliff* » abordée plus haut (section 2.1). Comme on peut le voir sur le graphique de la Figure 2 (dérivé de Murphy et Hall, 2010), à mesure que l'EROEI approche de 1:1, l'énergie nette décroît exponentiellement. Ainsi, d'importantes variations de l'EROEI lorsque celui-ci se situe à des valeurs élevées (ex : de 100 à 50 :1) peuvent n'avoir que peu ou pas d'impact sur la société alors que de faibles variations aux valeurs basses (ex : de 5 à 2.5:1) peuvent avoir de bien plus grands impacts. Ainsi, alors qu'il n'y avait, dans les premiers temps de l'exploitation de nos ressources fossiles, guère à se tracasser de l'EROEI et de ramifications politiques, économiques et sociales potentielles de son déclin, il y a lieu de prendre cela sérieusement en considération, à mesure que les valeurs d'EROEI chutent suite au déclin général des ressources fossiles de plus haute qualité (Lambert *et al.*, 2014). Pour Dupont *et al.* (2018), l'impact commence à se faire sentir en dessous d'un EROEI de 15 :1 et devient de plus en plus significatif lorsque les valeurs chutent sous le seuil de 10. Ainsi, selon Hall *et al.* (2014), le déclin de l'EROEI des combustibles fossiles a actuellement déjà un impact sur l'économie mondiale et sa poursuite aura probablement une myriade de conséquences négatives.

La pertinence du concept d'EROEI apparaît donc claire. Dans la section suivante, nous abordons plus concrètement ses applications.

2.3.2. Applications

Comme nous venons de l'exposer, l'énergie nette constitue la vraie valeur de l'énergie pour notre société (Chen *et al*, 2017) et l'EROEI est donc un indicateur de l'« utilité » réelle de l'énergie produite (Dale *et al*, 2012). L'EROEI offre dès lors diverses applications concrètes pour évaluer les ressources, systèmes et alternatives de production d'énergie ainsi que nos sociétés énergétiques à une échelle plus globale.

Nous développons ci-dessous comment l'EROEI nous permet d'appréhender la manière dont la qualité de nos ressources énergétiques évolue avec le temps et comment il offre la possibilité d'évaluer et de comparer différentes alternatives énergétiques. Nous exposons aussi comment un EROEI sociétal minimal peut être considéré, sachant le lien qui existe avec le développement de nos sociétés ainsi qu'évoqué ci-dessus.

- Analyse de l'évolution de la « qualité » de nos combustibles

L'exploitation massive des ressources fossiles mène à l'épuisement progressif de celles-ci. Historiquement, la vision des économistes a été que cet épuisement n'est pas un problème d'un point de vue économique car les prix plus élevés qui résulteront de la raréfaction inciteront à l'exploitation de ressources de qualité inférieure toujours abondantes (Hall, 2017a). Hall soutient que l'EROEI fournit une réponse indémontable contre cet argument des économistes que des ressources de qualité de plus en plus faible peuvent être utilisées indéfiniment. En effet, la qualité décroissante des ressources implique que davantage d'énergie doit être utilisée pour obtenir une unité d'énergie de cette ressource, c'est-à-dire que l'EROEI décroît, et les prix croissants ne peuvent continuer à fonctionner lorsque l'EROEI s'approche de la valeur de l'unité (Hall *et al*, 2014). En deçà d'un EROEI de 1:1, c'est-à-dire lorsque l'énergie obtenue est inférieure à l'énergie requise pour la produire (=énergie nette négative), une ressource n'est plus d'aucune façon « économique », excepté peut-être dans les cas où un combustible meilleur marché est utilisé pour obtenir un combustible plus cher (Hall, 2017a).

Les valeurs d'EROEI observées pour nos ressources énergétiques révèlent une tendance au déclin assez nette. L'EROEI global pour la production du pétrole et gaz conventionnel est ainsi passé de valeurs de l'ordre de 50:1 au milieu du XX^{ème} siècle à des valeurs inférieures à 10:1 en 2010 (Murphy *et al.*, 2016). Les alternatives aux combustibles fossiles conventionnels, comme les sables ou schistes bitumineux montrent des valeurs d'EROEI plus faibles encore, entre 4:1 et 7:1 en moyenne (Hall *et al.*, 2014). Pour le charbon, la situation semble toutefois moins claire et la production globale de ce combustible pourrait ne pas encore avoir atteint son pic d'EROEI (Court et Fizaine, 2017).

Les valeurs d'EROEI reflètent en réalité les effets antagonistes de l'épuisement des ressources et des progrès technologiques (Hall, 2017a). En effet, les progrès dans les procédés d'extraction et de transformation des combustibles fossiles permettent de réduire l'énergie qu'il est nécessaire d'investir dans ces procédés, augmentant ainsi l'EROEI. Toutefois, parallèlement, l'épuisement des ressources mène à l'exploitation de ressources de qualité sans cesse décroissante, ce qui augmente l'énergie requise et fait diminuer l'EROEI. Si l'EROEI baisse, on peut donc en conclure que l'effet de l'épuisement est plus important que celui des progrès technologiques (Murphy *et al.*, 2011). Ainsi, vu la tendance générale au déclin de l'EROEI de la majorité de nos combustibles fossiles, l'épuisement semble bel et bien l'emporter sur la technologie (Hall *et al.*, 2014).

- *Evaluation et comparaison de solutions et alternatives énergétiques*

Etant un indicateur de l'énergie nette délivrée, l'EROEI apparaît comme un bon moyen pour comparer et évaluer la viabilité de solutions énergétiques (ressource + technologie), en particulier d'alternatives aux combustibles fossiles. Seules pourront être jugées favorables et donc dignes d'investissements les solutions qui permettent, en effet, de fournir une énergie nette à la société. Murphy et Hall (2010) soutiennent ainsi que l'EROEI devrait être examiné systématiquement et de manière exhaustive pour chaque décision politique ou financière majeure concernant l'énergie car celui-ci offre une vision que les seules analyses économiques ne peuvent fournir. Toutefois, ainsi que nous le verrons au chapitre 3, il faut être conscient que les analyses d'EROEI comportent des difficultés qui peuvent rendre les comparaisons très délicates, voire illusoirs.

Le critère évident que doit rencontrer toute solution énergétique est donc celui de présenter un EROEI supérieur à 1.0:1.0, c'est-à-dire d'être une source d'énergie et non un puits. Cependant, si ce seuil de rentabilité énergétique suffit à écarter des candidats, il peut en réalité être insuffisant car, comme déjà indiqué, le but d'un système de production énergétique est bien de supporter l'entièreté du métabolisme énergétique d'une société moderne, et non pas seulement de fournir suffisamment d'énergie nette pour s'entretenir lui-même (Leccisi *et al.*, 2016). Le paragraphe suivant aborde la caractérisation d'un EROEI sociétal et des valeurs minimales requises.

- *Evaluation d'un EROEI sociétal et valeur minimale*

En raison de l'interaction qui apparaît exister entre EROEI et prospérité, on peut concevoir qu'il y a potentiellement une valeur minimale d'EROEI de nos systèmes énergétiques dans leur ensemble qui permette de maintenir nos sociétés modernes (Brandt, 2017). Certains auteurs ont tenté d'évaluer quelle pourrait être cette valeur minimale. Hall *et al.* (2009) déterminent ainsi un EROEI minimum pour le pétrole en sortie de mine (EROEI_{mm}) sur base d'une valeur d'EROEI « extended » (EROEI_{ext}) qui doit être supérieure à 1:1. Cet EROEI_{ext} prend en compte l'énergie requise pour fournir l'énergie à son point d'utilisation et pouvoir s'en servir (raffinage, transport, infrastructures, équipements, ...) en plus de la seule énergie nécessaire à l'obtenir que considère l'EROEI_{mm}. Hall *et al.* estiment ainsi que l'EROEI_{mm} du pétrole devrait avoir une valeur minimale de 3:1 pour un EROEI_{ext} minimal de 1:1 (en prenant l'exemple d'une utilisation à des fins de transport), précisant cependant qu'ils n'ont pas tenu compte du coût énergétique de la main-d'œuvre ou de compensations d'impacts environnementaux. Ils soulignent bien qu'il s'agirait donc là d'une valeur strictement minimale puisqu'en effet un EROEI_{ext} de 1:1 ne laisse aucun surplus pour les autres activités économiques ne contribuant pas directement à obtenir plus d'énergie ou de ressources. Ils supputent dès lors qu'il faudrait un EROEI_{mm} de l'ordre de 5:1 pour nos principaux combustibles pour pouvoir maintenir un tant soit peu ce qu'on appelle la civilisation.

Weißbach *et al.* (2013) suggèrent, quant à eux, un EROEI minimum de 7:1 pour les pays de l'OCDE, calculé sur base de l'intensité énergétique de l'économie sans toutefois d'explication claire sur le calcul sous-jacent. Par ailleurs, Lambert *et al.* (2014) proposent une vue intéressante sous la forme d'une pyramide des besoins énergétiques, similaire à la pyramide des besoins de Maslow. Cette pyramide, reprise par Dupont *et al.* (2017), représente la hiérarchie des besoins énergétiques requis pour le maintien et vraisemblablement la croissance d'une société occidentale typique (Figure 3). Dans cette pyramide, chaque niveau successif de besoins nécessite des valeurs d'EROEI plus élevées et doit être rempli avant que le suivant ne puisse l'être. Les usages « moins essentiels » de l'énergie, comme l'art ou les soins de santé, ne peuvent être envisagés que lorsque tous les niveaux inférieurs sont remplis (Lambert *et al.*, 2014). Les valeurs reprises en Figure 3 sont celles que devrait avoir l'EROEI_{mm} du pétrole

conventionnel ; elles ne sont qu'indicatives et de plus en plus spéculatives à mesure qu'on monte dans la pyramide.

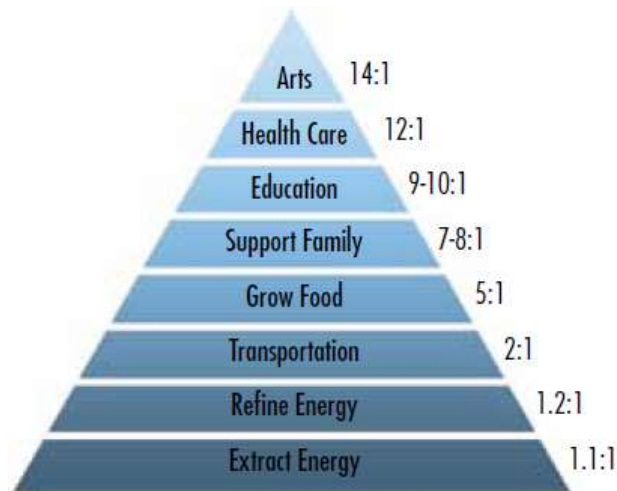


Figure 3 : Pyramide des besoins énergétiques (Dupont et al., 2017, d'après Lambert et al., 2014)

Fizaine et Court (2016) proposent encore une approche basée sur l'intensité énergétique et suggèrent, pour les US, une valeur minimale requise de l'EROEI de 11:1 pour garantir la croissance économique (valeur correspondant à 11% du PIB, qu'ils estiment être le maximum qui puisse être consacré au secteur énergétique pour encore permettre la croissance).

Il n'y a donc actuellement pas de méthode ni de valeurs consensuelles pour un EROEI à l'échelle sociétale. Ainsi que le soulignent Raugei et Leccisi (2016), le concept d'EROEI sociétal minimal reste confus et doit, dans tous les cas, nécessairement être contextualisé clairement en fonction du vecteur énergétique spécifique considéré et en fonction de la demande dictée par le « métabolisme » de la société considérée.

Dès lors, malgré l'intérêt évident que pourrait avoir un tel type de démarche, la comparaison des valeurs d'EROEI de différentes solutions énergétiques avec un EROEI sociétal minimal comme seuil de viabilité des solutions envisagées reste actuellement fort périlleuse (Fizaine et Court, 2016).

2.4. Conclusions du chapitre

L'EROEI se définit comme le rapport entre la quantité d'énergie délivrée par un procédé de production d'énergie et la quantité d'énergie nécessaire à la produire. Etroitement lié à la notion d'énergie nette, il joue un rôle fondamental dans nos sociétés énergétiques et a été déterminant pour leur développement. Nos sociétés « évoluées » requièrent des valeurs d'EROEI élevées afin d'assurer un surplus d'énergie suffisant pour permettre le fonctionnement de leur économie productive de biens et services et la réalisation d'activités moins essentielles mais précieuses pour leur qualité de vie (éducation, soins de santé, arts, ...).

La détermination de l'EROEI dans le cadre de l'évaluation de solutions et alternatives de production d'énergie est dès lors essentielle et peut-être plus pertinente qu'une analyse purement économique. En outre, l'examen de l'EROEI de nos principales ressources énergétiques actuelles (fossiles) et de son évolution permet de mettre en évidence la tendance au déclin et d'en envisager les conséquences sur

l'énergie nette disponible pour la société. Ces conséquences seront d'autant plus marquées que l'EROEI sera bas, du fait de la relation exponentielle entre énergie nette et EROEI. Un EROEI minimal étant nécessaire pour maintenir nos sociétés, même si l'évaluation précise de ce dernier est hasardeuse, il est essentiel d'en tenir compte lorsque des solutions énergétiques sont envisagées.

Malgré l'importance du concept d'EROEI démontrée dans ce chapitre, il apparaît qu'encore peu de programmes soient financés par les gouvernements ou d'autres organismes pour réaliser ce type d'analyses de manière scientifique et objective ou pour assurer l'obtention des données appropriées (Murphy et Hall, 2010 ; Hall, 2017b, p138). Or, ainsi que nous l'abordons dans le chapitre qui suit, de nombreuses difficultés sont rencontrées dans l'appréhension du concept d'EROEI et mériteraient davantage d'efforts pour aboutir à une méthode plus standardisée et objective sur laquelle devrait reposer toute politique énergétique.

3. Difficultés pratiques de l'EROEI et recommandations

La définition du concept d'EROEI, telle que développée au chapitre précédent, apparaît simple. Toutefois, dans la pratique, il s'avère que son application se heurte à d'importantes difficultés, menant, au sein de la littérature traitant du sujet, à beaucoup de confusion, de divergences ou parfois même à des débats hargneux (Murphy *et al.*, 2011). Utilisé pour défendre ou décrier une solution énergétique plutôt que comme une évaluation objective de différentes alternatives, l'EROEI, en l'absence d'une application cohérente et transparente, est ainsi susceptible d'être manipulé (Mulder et Hagens, 2008 ; Zhang et Colosi, 2013).

Comme exposé dans le chapitre précédent (section 2.1), l'EROEI est constitué du rapport entre 2 facteurs (Eq. 1) : la quantité d'énergie délivrée (E_{ret}) et la quantité d'énergie investie pour l'obtenir (E_{inv}). Nous allons voir comment la quantification pratique de ces deux facteurs constitutifs de l'EROEI se révèle en réalité problématique et source de confusion, et cela sous deux aspects. Le premier est la conception-même que l'on peut avoir de ces deux termes, à savoir ce que l'on considère que chacun doit comprendre et de quelle manière. Le deuxième est, lui, relatif à l'accessibilité, la manipulation et la stabilité des données chiffrées qui permettent de les calculer. Nous verrons aussi, au fil des difficultés, certaines des tentatives de les résoudre.

3.1. Conception de l'indicateur

3.1.1. Limites du système

La difficulté de loin la plus soulignée dans la littérature concernant l'EROEI est celle de la définition des limites du système utilisées pour réaliser l'analyse (Murphy et Hall, 2010). Par limites du système on entend l'étendue de ce qui est pris en compte pour déterminer l'énergie investie (= dénominateur) et l'énergie délivrée (= numérateur). Si le dénominateur semble être l'élément du ratio le plus problématique à délimiter (Hall *et al.*, 2009), le numérateur n'en est pas pour autant totalement évident.

3.1.1.1. Numérateur

La manière dont la limite du système considérée affecte le numérateur est relativement évidente : elle est en lien avec l'étape de la chaîne énergétique à laquelle l'énergie délivrée est envisagée (Raugei *et al.*, 2016). Ainsi, pour l'EROEI le plus communément appliqué aux combustibles, l'étape considérée est la sortie de la mine (*mine mouth*), du puits (*well head*), ou encore, dans le cas de bio-carburants, de la ferme (*farm gate*). Dans ce cas, l'énergie prise en compte au numérateur de l'EROEI est l'énergie contenue dans le combustible après l'étape d'extraction ou de récolte. Bien que selon des auteurs comme Hall (2017b, p121), l'EROEI ne devrait théoriquement être appliqué qu'à cette étape d'extraction d'énergie de la nature pour évaluer l'énergie nette fournie à la société, dans la pratique l'EROEI peut être déterminé à une étape subséquente de la chaîne énergétique, comme après raffinage, transformation, conversion ou encore au point d'utilisation de l'énergie (incluant donc notamment son transport). A mesure que l'on avance dans la chaîne, l'énergie obtenue pour une quantité initiale déterminée de ressource énergétique primaire (PES) deviendra de plus en plus faible, de par les nombreuses pertes qui ont lieu tout au long de cette chaîne (rendements de transformation, conversion, pertes de matière, ...). Parallèlement, l'énergie investie, elle, augmentera au fur et à mesure du nombre d'étapes considérées, faisant donc augmenter le dénominateur (que nous détaillerons dans la section suivante).

Dès lors, il est évident que l'EROEI sera d'autant plus faible qu'il est considéré à une étape de la chaîne plus éloignée de la PES. Il convient dès lors de toujours être clair sur l'étape à laquelle l'EROEI est déterminé.

Outre cette première considération assez évidente mais pouvant mener à une certaine confusion en l'absence d'une transparence suffisante, d'autres difficultés se présentent dans l'appréhension des limites du système pour la détermination du numérateur de l'EROEI.

L'une de ces difficultés apparaît dans le cas de procédés multi-produits, c'est-à-dire de procédés générant, outre le vecteur énergétique d'intérêt, d'autres produits auxquels une valeur énergétique peut être attribuée. C'est typiquement le cas, par exemple, des procédés de fabrication de biocarburants, qui génèrent, en plus du carburant, des co-produits sous la forme de résidus utilisés notamment comme fertilisants ou comme nourriture pour le bétail (Hall *et al.*, 2011 ; Zhang et Colosi, 2013). Il peut en effet être attribué à ces co-produits un certain crédit énergétique, étant donné qu'ils remplacent d'autres produits (fertilisants, nourriture) qui auraient sinon dû être fabriqués et auraient donc nécessité de l'énergie. La question est alors d'attribuer un poids énergétique à ces co-produits pour pouvoir répartir entre ceux-ci et le produit énergétique d'intérêt l'énergie investie dans le procédé. Ce type de question, largement rencontré et traité dans la discipline d'analyse de cycle de vie (Life Cycle Assessment – LCA), est connu sous le nom de problème d'allocation mais n'a pas toujours reçu l'attention suffisante des praticiens de la NEA (Murphy *et al.*, 2016).

Une autre difficulté dans l'appréhension du numérateur de l'EROEI, relevée notamment par Hall (2017b, p130), est celle de définir si l'énergie produite inclut ou non l'énergie qui est directement réinvestie dans le procédé de production d'énergie, à savoir donc si l'on considère l'énergie produite brute ou nette (par énergie nette, on entend l'énergie brute produite moins la part de cette énergie utilisée directement par le procédé). Selon Hall, ce point n'a pas toujours été traité suffisamment explicitement dans la littérature mais il avance que, vraisemblablement mais de manière non-explicite donc, les valeurs d'EROEI des combustibles sont généralement présentées comme si le numérateur était l'énergie nette obtenue (Hall, 2017b, p130). Quelques auteurs ont voulu rendre ce point plus clair en étant plus précis dans la terminologie utilisée pour leur indicateur. Ainsi, Brandt et Dale (2011) définissent plusieurs ERR (*Energy Return Ratios*), qui font notamment cette distinction entre un numérateur exprimé en termes d'énergie nette (ERR appelé NER, pour *Net Energy Ratio*) ou en termes d'énergie brute (ERR appelé GER, pour *Gross Energy Ratio*). Selon eux, les EROEI déterminés dans la littérature, en particulier pour les systèmes de génération électrique, sont majoritairement des GER (dans certains cas des NER), mais souvent la méthode de calcul n'est pas explicitement définie. Ils estiment, pour leur part, que le GER est un indicateur plus en ligne avec l'objectif d'une analyse d'EROEI.

Il apparaît donc à travers cette revue des difficultés associées aux limites du numérateur qu'il convient d'être très clair et transparent sur ce que l'on considère lorsque l'on prétend analyser un EROEI. Ce même point vaut assurément aussi pour le deuxième facteur constitutif de l'EROEI qu'est le dénominateur. Nous en venons donc aux difficultés que pose également sa délimitation et qui s'avèrent plus épineuses encore.

3.1.1.2. Dénominateur

Ainsi que développé déjà pour le numérateur, toute analyse d'EROEI doit préciser l'étape de la chaîne énergétique à laquelle elle est réalisée. D'emblée, il va donc de soi que l'étape considérée pour la

détermination des limites du dénominateur doit être identique à celle considérée pour la détermination des limites du numérateur.

Un autre point d'attention préliminaire mérite aussi d'être mentionné concernant la définition de l'énergie investie qui constitue le dénominateur de l'EROEI. Nous le détaillons ci-dessous pour lever d'entrée toute ambiguïté avant d'aborder ensuite le nœud véritable des difficultés affectant la délimitation du dénominateur.

a) *Remarque préliminaire sur l'énergie « investie » au dénominateur*

Ainsi qu'aborder plus haut lorsque nous avons défini le concept (section 2.1), l'essence de l'EROEI est de pouvoir appréhender quelle quantité d'énergie économiquement utile doit être investie pour obtenir l'énergie économiquement utile qui est produite (Murphy *et al.*, 2016). Ce terme d'« investie » est important à souligner car l'énergie à considérer au dénominateur ne comprend donc pas l'énergie de la PES qui est extraite par le procédé mais bien uniquement l'énergie qui est investie pour la rendre utilisable par la société.

Il est ainsi utile d'insister ici sur la distinction qui existe entre cette énergie investie et un autre indicateur, souvent utilisé dans l'approche LCA, qu'est la demande cumulée en énergie ou CED (*Cumulative Energy Demand*). La CED est l'énergie primaire totale qui doit être récoltée de l'environnement pour produire une quantité donnée d'un vecteur énergétique utilisable (Raugei *et al.*, 2016). Celle-ci inclut donc, elle, l'énergie primaire contenue dans la PES. Si on reprend la Figure 1 en section 2.1, la CED peut ainsi s'exprimer par l'équation (4).

$$CED = (PE + E_{inv}) / E_{ret} \quad (\text{Eq. 4})$$

Certains auteurs, comme Weißbach *et al.* (2013), ont notablement fait l'erreur de dire que l'énergie investie de l'EROEI « est aussi appelée *cumulated energy demand* » et que l'EROEI décrit « l'efficacité globale d'un procédé de production énergétique sur son cycle de vie ». Cette erreur, source de confusion dans une problématique déjà compliquée sans cela, a été sévèrement relevée par Raugei (2013), qui résume de manière claire la distinction qui existe entre NEA et son indicateur EROEI et LCA et son indicateur CED.

La NEA cherche à savoir combien d'énergie nette est obtenue d'une énergie brute extraite d'une PES après soustraction de l'énergie nécessaire au procédé. Elle permet ainsi d'analyser l'« efficacité » d'une technologie à exploiter et transformer stocks et flux d'énergie primaire en vecteurs énergétiques directement utilisables (Raugei et Leccisi, 2016). Son indicateur principal, l'EROEI, est donc le ratio de l'énergie fournie à la société par le système considéré sur la somme des inputs énergétiques détournés des autres usages sociétaux et investis dans la chaîne et toutes les étapes du cycle de vie du système (Raugei *et al.*, 2018a).

La LCA, elle, s'intéresse à l'impact environnemental total et donc à l'énergie primaire totale (CED) qui doit être extraite de l'environnement pour fournir un produit ou réaliser un process (Raugei, 2013).

Cette clarification préalable réalisée, nous pouvons maintenant entrer dans le vif des difficultés rencontrées dans la fixation des limites du dénominateur de l'EROEI.

b) Limites du dénominateur

La question des limites du dénominateur, c'est-à-dire décider de quels coûts énergétiques prendre en compte, est considérée comme la difficulté principale dans la détermination de l'EROEI (Henshaw *et al.*, 2011). En théorie, le dénominateur se résume par la quantité totale d'énergie investie dans les différentes étapes considérées du cycle de vie du procédé, mais, dans la pratique, l'évaluation exhaustive de cette énergie se heurte à des obstacles.

Il est presque universellement admis que l'EROEI devrait inclure au dénominateur l'énergie qui est utilisée directement dans le procédé considéré ainsi que l'énergie incorporée dans les équipements nécessaires à ce procédé (Hall *et al.*, 2011). Toutefois, au-delà de ces inputs directs d'énergie et de matériel (converti en énergie incorporée), d'autres inputs plus indirects d'énergie et de matériel peuvent être considérés, comme les machines qui ont servi à la construction des équipements utilisés dans le procédé et l'énergie nécessaire à faire fonctionner ces machines ; ensuite aussi, les autres machines et l'énergie qui ont servi à la fabrication des machines qui ont construit les équipements, et ainsi de suite. La chaîne d'éléments à prendre en compte peut dès lors très vite se révéler sans fin, menant à la presque-impossibilité d'une comptabilité totalement exhaustive des dépenses énergétiques. En outre, en plus des éléments physiques entrant dans cette chaîne quasi infinie de production, d'autres éléments peuvent également être considérés, comme la main-d'œuvre et les services soutenant le procédé, auxquels sont aussi associés des coûts énergétiques. Ce dernier point est fortement sujet à débat entre analystes (Hall *et al.*, 2014). Notamment, dans le cadre de l'analyse de systèmes photovoltaïques (PV), Prieto et Hall (2013) sont allés très loin dans les coûts énergétiques considérés, incluant les services (y compris, par exemple, la surveillance des sites de production !), les routes, les réunions des ingénieurs, ..., ce qu'ont critiqué Carbajales-Dale *et al.* (2015), dénonçant une fixation de limites inconsistante et arbitraire. Des coûts énergétiques associés aux externalités environnementales pourraient également encore être pris en compte (par exemple, le coût d'un système de capture et stockage du CO₂ pour une centrale à charbon que l'on voudrait comparer à une éolienne qui ne produit pas de CO₂) mais, dans la pratique, ces externalités sont rarement considérées dans les analyses d'EROEI (Hall *et al.*, 2014).

Additionner exhaustivement tous les inputs, sur base d'une analyse du process, relève ainsi de la mission quasi impossible. Cela nécessite dès lors une simplification, qui est réalisée en procédant à un *cut-off* dans l'imbrication des éléments entrants. Ne sont ainsi considérés que les inputs jugés significativement intensifs en énergie, toute la difficulté résidant toutefois dans l'estimation de cette significativité sans en faire le calcul précis. Cette approche de *cut-off*, bien connue de la discipline LCA et difficilement évitable lorsqu'on réalise une analyse basée ainsi sur une dissection du process, constitue un compromis entre l'exhaustivité et le temps et ressources consacrés à l'étude (Murphy *et al.*, 2016). Il est probable dès lors, avancent Murphy et Hall (2010) ou encore Hall (2017b, p140), qu'une importante part des valeurs d'EROEI qui sont rapportées soient surestimées par rapport à ce qu'elles seraient si l'information complète pouvait être prise en compte.

Cependant, une autre méthode, alternative à cette première méthode « *process-based* » ou « *bottom-up* », existe. Il s'agit de la méthode « *top-down* ». Cette méthode, basée sur des tableaux économiques d'entrée-sortie (*input-output* – I-O), utilise le coût financier des échanges entre secteurs économiques et les convertit en énergie. L'avantage par rapport à la méthode *bottom-up* est que les échanges répertoriés dans les tableaux I-O s'étendent sur toute l'économie et ne se heurtent donc pas au problème de *cut-off*. Ils incluent notamment les services et investissements long terme. Toutefois, ce qu'elle gagne en exhaustivité, cette méthode le perd en spécificité car elle utilise des valeurs moyennes de secteurs économiques grossiers (Brandt *et al.*, 2013). Dès lors, une approche hybride peut aussi

être utilisée, dans laquelle les coûts énergétiques directs sont évalués par la méthode *process-based (bottom-up)* et les coûts indirects via les tableaux I-O (*top-down*).

Au final, le choix entre les méthodes est un compromis entre exhaustivité et précision des données et dépend d'où les limites du système sont tracées et de la disponibilité des données (Murphy *et al.*, 2011).

Un point encore concernant l'énergie investie au dénominateur de l'EROEI a fait fortement débat dans les analyses évaluant la mise en œuvre de systèmes énergétiques impliquant des sources d'énergie renouvelable (ER). Il s'agit de la prise en compte du coût énergétique associé à la gestion de l'intermittence de l'énergie produite. En effet, dans le cas de systèmes basés sur des ressources renouvelables de flux, comme le sont l'éolien et le solaire, la production de l'énergie utilisable, sous forme d'électricité, est fluctuante en fonction de la disponibilité de la ressource (soleil ou vent). Cette variabilité doit être prise en compte et gérée afin que la quantité d'électricité produite rencontre à tout moment la demande, elle-même variable aussi. Plusieurs moyens existent à l'échelle du réseau pour gérer cette intermittence des ER. Premièrement, la connexion au réseau de systèmes renouvelables de différentes sources (éolien vs. solaire) ou de différents systèmes de même source mais localisés dans des endroits différents ne subissant pas les mêmes conditions (ensoleillement, vent) au même moment permet aux systèmes de se compléter. Cette complémentarité et l'atténuation de la variabilité qui en résulte seront d'autant plus grandes qu'il y aura une interconnexion importante entre systèmes et entre réseaux de régions différentes sur une large échelle. Deuxièmement, des mesures de gestion de la demande pour la rendre autant que possible en adéquation avec la variabilité de l'offre peuvent être mises en place. Ensuite, on peut également prévoir une surcapacité de systèmes renouvelables (palliant la faible disponibilité de la ressource lorsque les conditions météorologiques sont défavorables mais étant donc inutilisés lorsque les conditions sont favorables (bridage de la production)), des systèmes back-up thermiques de pointe (ex : turbines au gaz) et des installations de stockage, notamment chimique (ex : batteries, gaz de synthèse) et mécanique (ex : stockage par pompage hydraulique, stockage par air comprimé). Ces différentes mesures peuvent dès lors requérir des investissements énergétiques plus ou moins conséquents.

Ainsi, dans certaines études évaluant l'EROEI de systèmes basés sur des flux d'ER, ces coûts énergétiques liés à la gestion de l'intermittence (back-up, stockage, surcapacité³, développement du réseau) ont été pris en compte, faisant fortement chuter les valeurs d'EROEI comparativement aux valeurs déterminées pour des systèmes isolés en l'absence de ces éléments. Weißbach *et al.* (2013), notamment, ont considéré dans leur étude la nécessité d'une capacité de stockage (10 jours d'électricité pleine charge) et des facteurs de surcapacité (1,5 pour l'éolien et 2 pour le PV) qu'ils ont inclus dans leur calcul d'EROEI des systèmes renouvelables. Ils aboutissent ainsi à des valeurs d'EROEI environ 2 fois inférieures à ce qu'elles seraient si ces éléments n'étaient pas pris en compte. Toutefois, si le calcul de cet « EROEI buffered », ainsi que ces auteurs l'appellent, est intéressant, dans la mesure où il constitue un EROEI minimum qui peut être attendu de ces systèmes renouvelables, celui-ci, comme argumenté à juste titre par Raugei et d'autres auteurs (Raugei, 2013 ; Raugei *et al.*, 2015 ; Carbajales-Dale *et al.*, 2015 ; Raugei et Leccisi, 2016 ; Trainer, 2018), n'a pas réellement de sens à l'échelle d'un système individuel. Lorsque ce type de calcul est entrepris, il doit, en effet, s'envisager à l'échelle beaucoup plus globale du réseau d'un pays ou d'une région, qui inclut l'ensemble des éléments (complémentarité des sources, gestion de la demande, ...). Il est certain qu'à mesure que la

³ A noter que la surcapacité impacte le numérateur de l'EROEI en diminuant le facteur d'utilisation global des systèmes renouvelables du réseau.

part des ER viendra à croître dans le mix du réseau, l'énergie à investir dans les systèmes de gestion de l'intermittence sera amenée à augmenter mais il n'est pas pertinent de considérer l'EROEI d'un système renouvelable qui devrait assurer seul à 100% la gestion de sa propre intermittence, tel que l'envisage l'EROEI *buffered* calculé par Weißbach et *al.* En outre, la comparaison que ces auteurs font entre leurs EROEI *buffered* de l'éolien et du PV et, par exemple, l'EROEI de l'électricité nucléaire n'est pas équitable car, étant une technologie de génération d'électricité assurant une charge de base, le nucléaire ne pourrait pas davantage répondre seul à une demande fluctuante.

Ainsi, la prise en compte d'un coût énergétique de l'intermittence dans une analyse d'EROEI n'est cohérente que dans le cadre d'une approche systémique globale. Ce type d'approche a notamment été entrepris de manière intéressante par Raugei et d'autres co-auteurs dans le cadre de transitions énergétiques à l'échelle de pays (Chili – Raugei *et al.*, 2018a ; UK – Raugei *et al.*, 2018b).

Pour conclure ce paragraphe, il est donc important de reconnaître, comme le notent Raugei *et al.* (2017), qu'« en étendant les limites de l'EROEI au-delà de l'inclusion des inputs physiques nécessaires à la production de l'énergie par le système, on déplace graduellement la portée de l'analyse depuis une évaluation de la performance d'énergie nette intrinsèque du système (comparativement éventuellement à celle d'une technologie alternative) vers l'évaluation de la capacité du système à soutenir l'entièreté de la demande sociétale pour le type de vecteur énergétique qu'il produit, ou parfois même pour toutes les formes d'énergie nette ». En résumé et à nouveau donc, il convient d'être clair et transparent sur chaque analyse réalisée et d'indiquer de façon explicite les limites considérées. Celles-ci doivent être en adéquation avec les objectifs et l'échelle de l'analyse. Jamais non plus il ne faut s'aventurer dans des comparaisons de valeurs d'EROEI définies selon des limites qui n'auraient pas préalablement été vérifiées comme étant identiques.

3.1.1.3. Tentatives de standardisation des limites du système

Puisque, ainsi que montré ci-dessus, l'énoncé explicite des limites du système considérées est nécessaire à toute analyse d'EROEI pour éviter des comparaisons trompeuses (Murphy et Hall, 2010), plusieurs auteurs ont voulu tenter d'uniformiser les limites utilisées et d'y associer une nomenclature spécifique et claire, particularisant différents variants de l'EROEI en fonction des limites prises en compte.

De manière non-exhaustive, nous relèverons ici trois de ces tentatives, qui nous paraissent contribuer à une vision de la notion plurielle et relative qu'est l'EROEI en fonction des limites considérées. Les 3 approches aboutissent chacune sur un cadre bi-dimensionnel de classification de variants de l'EROEI, cadre qui diffère d'une approche à l'autre mais dont les grandes lignes sont communes et ont donc trait aux limites du système pour le numérateur et le dénominateur.

La première approche est celle de Mulder et Hagens (2008). Leur cadre de classification, adapté au Tableau 1, se caractérise sur l'axe vertical par l'étendue des inputs (dénominateur) et output (numérateur) considérés et sur l'axe horizontal par la manière d'intégrer les ressources non-énergétiques et les externalités dans les inputs.

Tableau 1 : Cadre de classification des EROI adapté de Mulder et Hagens (2008)

| | EROI | EROI total | EROI multi-critères |
|------------------------|------|------------|---------------------|
| 1 ^{er} ordre | X | X | X |
| 2 ^{ème} ordre | X | X | X |
| 3 ^{ème} ordre | | X | X |

Ainsi, la classification selon l'axe vertical donne des lignes d'EROI⁴ de 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} ordre : le 1^{er} ordre considère les inputs (énergétiques et non énergétiques) directs et l'output d'énergie direct ; le 2^{ème} ordre considère, en plus des éléments pris en compte au 1^{er} ordre, les inputs (énergétiques et non énergétiques) indirects et les crédits accordés aux co-produits dans l'output ; le 3^{ème} ordre enfin considère, en plus des éléments du 2^{ème} ordre, les externalités comme « coûts » dans les inputs.

La classification selon l'axe horizontal distingue, elle, des colonnes d'EROI appelés « EROI », « EROI total » et « EROI multi-critères ». Dans la 1^{ère} colonne « EROI », les ressources non-énergétiques⁵ et externalités sont ignorées ; dans la 2^{ème} colonne « EROI total », elles sont converties en équivalents énergétiques⁶ ; dans la 3^{ème} colonne, elles sont traitées séparément comme des composantes distinctes (pour donner lieu donc à plusieurs indicateurs distincts, EROI_x, en fonction de chaque ressource x).

La deuxième approche a été développée par Murphy *et al.* (2011) pour les combustibles. Leur cadre bi-dimensionnel, adapté au Tableau 2, comporte 5 niveaux (lignes) pour les inputs (dénominateur) et 3 niveaux (colonnes) pour l'output (numérateur) en fonction également donc des limites prises en compte.

Tableau 2 : Cadre de classification des EROI adapté de Murphy et al. (2011)

| Limites pour inputs | Limites pour output | | |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| | 1. Extraction | 2. Transformation | 3. Utilisation |
| Energie et matériel directs | EROI _{1, d} | EROI _{2, d} | EROI _{3, d} |
| Energie et matériel indirects | EROI_{std} | EROI _{2, i} | EROI _{3, i} |
| Main-d'œuvre (<i>labour</i>) | EROI _{1, lab} | EROI _{2, lab} | EROI _{3, lab} |
| Services auxiliaires | EROI _{1, aux} | EROI _{2, aux} | EROI _{3, aux} |
| Externalités environnementales | EROI _{1, env} | EROI _{2, env} | EROI _{3, env} |

Pour les inputs (lignes) : au niveau 1, ne sont considérés que les inputs énergétiques et matériels directs, c'est-à-dire entrant directement dans le procédé ; au niveau 2, sont considérés en plus les inputs énergétiques et matériels indirects, c'est-à-dire nécessaires à la production des inputs directs ;

⁴ Nous avons préféré ici conserver l'appellation originale d'EROI (Energy Return on Investment) des auteurs de l'article plutôt que de la transcrire en EROEI (Energy Return on Energy Investment). Nous avons de même conservé telles quelles les appellations d'origine des indicateurs pour les 2 autres classifications présentées.

⁵ Dans ces ressources non-énergétiques entrant en inputs sont considérés des éléments aussi variés que les terres, les eaux de surface et souterraines, le temps, ... (qui sont donc gardés distincts dans l'« EROI multicritères »)

⁶ A noter que cette conversion peut être chargée de jugements de valeur, ainsi que nous le verrons en section 3.1.2.

au niveau 3, est ajoutée l'énergie associée à la main-d'œuvre ; au niveau 4, est encore additionnée l'énergie nécessaire aux services auxiliaires ; au niveau 5 enfin, est ajoutée l'énergie associée aux externalités environnementales.

Pour l'output : la 1^{ère} colonne le considère après l'étape d'extraction, la 2^{ème} colonne le considère après l'étape de transformation et la 3^{ème} colonne finalement le considère au point d'utilisation.

En outre, le cadre de Murphy *et al.* indique également (cellules grisées) les EROI dont les limites favorisent une approche *top-down* à une approche *bottom-up* et montre aussi où se situe l'EROI_{std}, c'est-à-dire l'EROI « standard » qui est généralement appliqué pour les combustibles.

La troisième et dernière approche est celle proposée par Brandt et Dale (2011). Ils préconisent une approche *bottom-up* et considèrent systématiquement leurs ERR à l'étape de l'énergie prête à l'emploi pour la société. Dans leur cadre, adapté au Tableau 3, ils présentent sur l'axe vertical 3 limites pour le dénominateur et sur l'axe horizontal une distinction, d'une part au numérateur entre énergie brute ou énergie nette (énergie nette = énergie brute – partie de cette énergie brute qui est directement réinjectée dans le procédé), et d'autre part au dénominateur, entre énergie totale ou seulement énergie externe (c'est-à-dire énergie extérieure non issue de la chaîne énergétique considérée).

Tableau 3 : Cadre de classification des ERR adapté de Brandt et Dale (2011)

| Limite pour inputs | Type d'ERR | | | |
|-------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| | NER | GER | NEER | GEER |
| Consumptive (β) | NER $_{\beta}$ | GER $_{\beta}$ | ∞ | ∞ |
| External (γ) | NER $_{\gamma}$ | GER $_{\gamma}$ | NEER $_{\gamma}$ | GEER $_{\gamma}$ |
| Life cycle (δ) | NER $_{\delta}$ | GER $_{\delta}$ | NEER $_{\delta}$ | GEER $_{\delta}$ |

Ainsi, sur l'axe vertical (lignes), la 1^{ère} limite β (consumptive) ne prend en compte au dénominateur que l'énergie consommée provenant de la chaîne considérée, la 2^{ème} limite γ (external) ajoute la consommation directe d'énergie externe et la 3^{ème} limite δ (life cycle) enfin inclut la consommation indirecte d'énergie qui est due à la consommation d'énergie externe et à l'énergie incorporée dans les matériaux.

Sur l'axe horizontal (colonnes) : les indicateurs NER et NEER considèrent l'énergie nette au numérateur et, respectivement, l'énergie totale ou l'énergie externe seulement au dénominateur ; les indicateurs GER et GEER considèrent, eux, l'énergie brute au numérateur et, respectivement également, l'énergie totale ou l'énergie externe seulement au dénominateur.

Brandt et Dale expliquent que ces différents indicateurs ont chacun leur utilité propre. Ainsi, un NEER sera indicateur de la capacité d'un procédé à augmenter l'énergie disponible pour la société alors qu'un NER sera plus exhaustif et plus étroitement relié aux impacts environnementaux de ce procédé.

Finalement, on peut donc voir que, si chacune des 3 classifications présentées permet de distinguer de manière intéressante et formalisée différentes notions d'EROEI sur base d'une approche globalement commune de précision des limites considérées, elles mènent toutefois chacune à une vision assez différente et à des variants d'EROEI qui sont dès lors eux aussi fort différents et finalement peu réconciliables entre eux facilement. Une véritable uniformisation des variants possibles de l'EROEI et de leur nomenclature n'existe donc malheureusement pas encore. En conclusion, l'on peut donc dire qu'il reste nécessaire pour chaque analyse d'EROEI réalisée de préciser exactement les limites prises

en compte et de ne jamais se contenter d'une simple appellation d'EROEI, ou même de variant d'EROEI, dont la signification ne pourra, à l'heure actuelle, être universelle et sans équivoque.

3.1.2. Formes d'énergie

Après la question des limites du système, nous abordons maintenant la deuxième grosse difficulté à laquelle se heurtent les analyses d'EROEI. Il s'agit de la manière de comparer et d'agrèger des quantités d'énergie de formes différentes. En effet, l'énergie se présente sous la forme de vecteurs énergétiques très variés (combustibles et carburants de différents types, électricité), qui n'ont pas la même valeur aux yeux de la société. Ainsi, par exemple, il serait *a priori* inapproprié de considérer un Joule de charbon comme strictement équivalent à un Joule d'électricité, étant donné que chacun de ces deux Joules n'a pas été obtenu de la même manière et n'a pas non plus la même utilité économique, de par ses caractéristiques intrinsèques (propreté, facilité de stockage, flexibilité d'usage, ...) (Murphy *et al.*, 2011).

Dès lors, deux problèmes se posent pour la détermination de l'EROEI : Comment agréger ces formes d'énergie différentes dans l'énergie investie du dénominateur ? Comment aussi comparer des EROEI comportant respectivement au numérateur des énergies aussi différentes que le seraient un Joule de charbon et un Joule d'électricité ? Plusieurs positions existent dans la littérature sur la manière de résoudre ces points. Nous allons les explorer et aborder les avantages et limitations de chacune.

3.1.2.1. Equivalents thermiques

Un certain nombre d'études ont déterminé des EROEI de technologies variées en prenant le parti de simplement utiliser des « équivalents thermiques », c'est-à-dire que les valeurs d'énergie sont simplement reprises en termes de leur capacité à amener une quantité d'eau à augmenter sa température, sans correction pour la « qualité » de l'énergie (Hall, 2017b, p134). Dans ce cas, un Joule de charbon est donc effectivement considéré équivalent à un Joule d'électricité. Les quantités d'énergie investie au dénominateur de l'EROEI sont donc simplement sommées en équivalents thermiques, indépendamment du vecteur énergétique utilisé, et l'énergie délivrée du numérateur reste elle aussi exprimée en équivalents thermiques, quel que soit le vecteur énergétique fourni.

Ceci a mené toutefois à certaines comparaisons-« raccourcis » d'EROEI, notamment sous la forme de graphiques qui se voulaient résumer une vue globale des valeurs de différentes technologies mais comparaient en réalité des pommes et des poires et ont dès lors été lourdement critiqués pour cela (Raugei et Leccisi, 2016).

Ainsi, utiliser de simples équivalents thermiques pour la détermination de valeurs d'EROEI apparaît une méthode peu appropriée, présentant le risque de mener à des comparaisons trompeuses. D'autres méthodes ont donc été proposées.

3.1.2.2. Conversion en énergie primaire

Raugei et Leccisi (2016) estiment que sommer simplement en termes d'équivalents thermiques les quantités individuelles d'énergie de chaque vecteur énergétique investi au dénominateur de l'EROEI correspondrait en réalité à ne prendre en compte que les investissements énergétiques qui seraient qualifiés d'« avant-plan » (*foreground*) en LCA. Dès lors, une autre approche qui est défendue par ces auteurs et d'autres est que chaque terme de l'énergie investie (E_{inv}) au dénominateur doit être converti en équivalents d'énergie primaire (PE-eq) sur base de la chaîne énergétique spécifique dont est issu le

vecteur énergétique sous forme duquel ce terme est fourni. Toutefois, la détermination de cette équivalence en énergie primaire pour différents vecteurs énergétiques fait l'objet d'une série de conventions qui peuvent diverger entre différentes bases de données (Palmer et Floyd, 2017). Nous présentons ci-dessous les informations de Frischknecht *et al.* (2015) à ce sujet :

Concernant les ressources d'énergie chimique (combustibles fossiles et biomasse), leur valeur énergétique est généralement dérivée de leur pouvoir calorifique, soit inférieur (PCI), soit supérieur (PCS). Pour l'énergie nucléaire, les choses sont plus compliquées : généralement les différentes approches déterminent la quantité d'uranium extraite et la multiplient par un facteur énergétique. L'approche de Frischknecht *et al.*, par exemple, considère la quantité d'uranium extraite excluant la quantité d'uranium appauvri sortant du procédé d'enrichissement et la quantité d'uranium fissile restant dans le combustible éliminé après utilisation et elle multiplie cette quantité par l'énergie qui peut être obtenue de l'uranium fissile dans les réacteurs à eau pressurisée actuels (560 000 MJ/kg). Dans d'autres approches, la valeur du facteur énergétique considéré peut être différente. Pour les énergies renouvelables, quant à elles, deux approches peuvent essentiellement être adoptées : celle de l'« énergie récoltée » (*energy harvested approach*) ou celle de l'« énergie récoltable » (*energy harvestable approach*). Dans la première, l'énergie primaire considérée est la quantité d'énergie délivrée par le système de collecte de l'énergie (ex : énergie électrique courant continu générée par un module PV). Dans la deuxième, l'énergie primaire considérée est la quantité d'énergie renouvelable nécessaire pour produire la quantité d'énergie délivrée par le système de collecte de l'énergie en fonction de l'efficacité de conversion de ce dernier. (ex : énergie cinétique du vent pour une éolienne). Les valeurs d'énergie primaire déterminées selon chacune des 2 approches différeront donc en fonction de la valeur de l'efficacité de conversion, selon un facteur allant donc d'environ 0.15 pour l'hydroélectricité à 3-4 pour l'éolien et jusqu'à plus de 6 pour le PV. L'*energy harvested approach* est celle qui est préconisée notamment par la guidance de l'IEA pour l'analyse NEA des systèmes PV (Raugei *et al.*, 2016) et est celle qui est implémentée dans la base de données LCA Ecoinvent (Palmer et Floyd, 2017). Toutefois, cette approche n'est donc pas universelle et peut ainsi faire l'objet de divergences entre bases de données et études associées, auxquelles il faut donc être attentif

En ce qui concerne maintenant l'énergie du numérateur, qui est, elle aussi, délivrée sous la forme d'un vecteur énergétique spécifique, celle-ci peut également être convertie en PE-eq. Pour ce faire, une logique LCA dite de « substitution » est appliquée ; celle-ci réalise la conversion sur base de la quantité d'énergie primaire qui serait requise en moyenne pour produire une unité de ce vecteur énergétique, si l'on utilisait le mix moyen de technologies de sa chaîne de production (Raugei *et al.*, 2018a). La logique de substitution suppose ainsi en réalité que l'énergie produite par le système étudié remplace de l'énergie qui aurait sinon dû être produite par ailleurs et donc par le mix technologique moyen actuel. Ainsi, si l'on prend l'exemple d'un système PV, le numérateur de l'EROEI devrait être divisé par un facteur η_{grid} , qui est donc l'efficacité de conversion globale du réseau électrique dans lequel le système considéré injecte son électricité. Cet η_{grid} est fonction du mix de technologies constituant ce réseau spécifique.

Particulièrement, pour les systèmes de production électrique, Raugei *et al.* (2016), dans la guidance de l'IEA sur la méthodologie des analyses NEA pour les systèmes PV, suggèrent en réalité de rapporter deux EROEI, en les identifiant clairement et distinctement, le premier, appelé EROEI_{elec}, dans lequel le numérateur est conservé en termes d'énergie électrique délivrée par le système (Eq. 5) et le deuxième, appelé EROEI_{PE-eq}, dans lequel le numérateur est converti en énergie primaire sur la base du η_{grid} (Eq.6).

$$EROEI_{elec} = E_{ret\ elec} / E_{inv} \quad (Eq. 5)$$

$$\text{EROEI}_{\text{PE-eq}} = E_{\text{ret PE-eq}} / E_{\text{inv}} = (E_{\text{ret elec}} / \eta_{\text{grid}}) / E_{\text{inv}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Raugei et Leccisi (2016) relèvent en outre un point important concernant ces deux indicateurs. La « règle » que l'EROEI doit être supérieur à 1:1 pour avoir une source d'énergie nette ne vaut que pour l'indicateur $\text{EROEI}_{\text{PE-eq}}$, dans lequel le numérateur et le dénominateur sont bien exprimés dans la même unité d'énergie primaire. Pour l' $\text{EROEI}_{\text{elec}}$, étant donné que numérateur et dénominateur sont mesurés différemment, on perd cette règle intuitive d'un EROEI supérieur à 1:1 pour avoir une source d'énergie nette. Ces auteurs font par ailleurs remarquer que l' $\text{EROEI}_{\text{elec}}$ est un indicateur « absolu » de la performance de la technologie analysée, alors que l' $\text{EROEI}_{\text{PE-eq}}$ est, lui, un indicateur « relatif » car on suppose un mix défini du réseau. L'on pourrait toutefois objecter, concernant l' $\text{EROEI}_{\text{elec}}$, qu'il ne s'agit pas non plus d'un indicateur réellement absolu. En effet, l'énergie investie au dénominateur de cet indicateur est également ramenée en énergie primaire sur base de l'efficacité du mix de technologies fournissant chacun des vecteurs. Or, cette efficacité dépend aussi de la localisation géographique dans laquelle est envisagée la production de chaque vecteur considéré.

Dans le prolongement de ces considérations, l'on peut notablement faire remarquer qu'une transition vers un mix énergétique augmentant l'efficacité de conversion globale d'un réseau peut ainsi à elle seule avoir un impact sur les valeurs d' $\text{EROEI}_{\text{PE-eq}}$ (mais aussi d' $\text{EROEI}_{\text{elec}}$ si de l'électricité est utilisée dans l'énergie investie) déterminées pour un système de génération électrique particulier, et cela en l'absence même de toute modification intrinsèque de la performance de ce système. Nous détaillerons davantage ce type de considérations en section 4.

Finalement, pour clôturer ce point sur l'équivalence en énergie primaire des différentes formes d'énergie, ajoutons que, malgré l'harmonisation relative que peut apporter l'expression des valeurs d'EROEI en PE-eq, il n'en serait pas pour autant approprié de comparer l' $\text{EROEI}_{\text{PE-eq}}$ d'un système de génération électrique comme le PV avec celui du pétrole par exemple. Une comparaison entre EROEI ne devrait être réalisée que pour des vecteurs énergétiques équivalents d'un point de vue fonctionnel et à une étape équivalente de leur chaîne d'approvisionnement (Raugei et Leccisi, 2016). Si l'on souhaitait malgré tout réaliser une comparaison d'EROEI de vecteurs aussi différents par exemple que de l'électricité PV et de l'essence, il faudrait le faire en les ramenant plutôt à une unité fonctionnelle d'énergie utile dans une application spécifique équivalente. Par exemple, l'on pourrait envisager de comparer l' $\text{EROEI}_{\text{point of use}}$ d'une unité d'énergie mécanique de déplacement d'un véhicule électrique alimenté en électricité PV avec celui d'une unité d'énergie mécanique de déplacement d'un véhicule thermique alimenté par de l'essence.

3.1.2.3. Méthode « économique »

D'autres méthodes que la conversion en énergie primaire ont été proposées pour prendre en compte les différentes formes d'énergie. Celle préconisée par Murphy *et al.* (2011), par exemple, se base de manière plus nette sans doute sur la considération déjà évoquée que chaque forme d'énergie n'a pas la même utilité économique et que donc un certain facteur de « qualité » de l'énergie doit être pris en considération. Ainsi, ils préconisent une conversion des différentes formes d'énergie intervenant au numérateur et au dénominateur de l'EROEI sur la base d'un facteur de correction qui est fonction du prix relatif du vecteur correspondant par rapport à un vecteur de référence. La quantité d'énergie de chaque vecteur i est donc convertie en la multipliant par un facteur $f_{i,t}$ défini selon l'équation (7) où $P_{i,t}$ est le prix du vecteur i au temps t et où $P_{1,t}$ est le prix du vecteur de référence à ce même temps t .

$$f_{i,t} = P_{i,t} / P_{1,t} \quad (\text{Eq. 7})$$

La limitation de cette méthode est toutefois qu'elle suppose une substituabilité parfaite des vecteurs et qu'elle est également sensible à des changements rapides de prix du vecteur de référence (Murphy *et al.*, 2011). Dès lors, une méthode alternative est proposée par les mêmes auteurs. Celle-ci, appelée « Divisia-Index », prend en compte à la fois le prix des différents vecteurs (combustibles dans son étude) et leurs parts de marché, pour pouvoir réaliser la pondération de chaque vecteur. Cette méthode, que nous ne développerons pas, permet une substitution partielle entre différents types de vecteurs et élimine la sur-dépendance au type de vecteur choisi comme référence (Murphy *et al.*, 2011).

En conclusion, l'on peut dire que cette approche basée sur les prix relève d'une vision qu'on pourrait qualifier de plus « classique » et « économique » de l'EROEI, reflétant d'une certaine manière, peut-être assez à propos, sa définition d'énergie fournie à la société rapportée à l'énergie qui en est détournée, avec toute la considération que la société a de cette énergie. En effet, il peut apparaître approprié, dans une telle vision, de conserver les inputs et output en termes de l'énergie des vecteurs énergétiques, qui est en réalité l'énergie telle qu'elle intéresse la société, et en leur attribuant une pondération liée à leur utilité économique telle que vue par cette société à travers les prix.

En revanche, avec sa vision différente, la méthode de conversion en énergie primaire présentée dans la section précédente pourrait, elle, être considérée comme une approche peut-être davantage « environnementale », étant donné qu'elle ramène toute l'énergie à l'énergie primaire récoltée de l'environnement. Toutefois, elle reste malgré tout également abordée sous un angle de vue de la société, étant donné que ce qu'on y calcule est en fait la quantité d'énergie primaire qui est virtuellement « retournée » à la société (c'est-à-dire préservée pour d'autres usages) par unité d'énergie primaire investie⁷ (Raugei *et al.*, 2012).

3.1.2.4. Autres méthodes de conversion

D'autres méthodes encore ont été utilisées pour prendre en compte les différentes formes d'énergie. Parmi celles-ci, nous citerons celle basée sur l'emergie, qui a notamment été employée par Chen *et al.* (2017) pour calculer des EROEI (appelés EmEROEI) de champs pétroliers chinois et les comparer aux EROEI de ces mêmes champs déterminés avec des méthodes de correction de l'énergie plus classiques telles qu'exposées ci-dessus. Nous expliquons succinctement le principe de cette approche « emergie », selon les informations de l'article de ces auteurs.

L'emergie permet de prendre en compte toutes les formes d'énergie en les ramenant à l'énergie initiale dont elles sont originaires, à savoir l'énergie solaire pour la quasi-totalité de l'énergie terrestre. L'emergie est exprimée en emJoules et donc généralement en emJoules solaires (seJ). Toutes les formes d'énergie, y compris les matériaux, la main-d'œuvre ou encore les impacts environnementaux, peuvent ainsi être ramenées en unités communes de seJ, sur base de valeurs de « transformité ». L'approche de considérer l'énergie en termes d'emergie a donc l'avantage d'être très exhaustive, même si elle est tributaire de nombreux facteurs d'incertitude (valeurs de transformité considérées, impacts environnementaux pris en compte et mesures de ceux-ci, ...). Bien qu'actuellement encore peu considérée, cette approche, qui étend donc les frontières de l'EROEI standard, peut dès lors constituer une méthode puissante pour inclure l'environnement de manière bien plus complète dans

⁷ Rappelons qu'il est donc bien toujours ici question d'énergie primaire investie, à ne pas confondre avec la CED qui inclut en plus l'énergie de la PES (cf. section 3.1.1.1)

les analyses énergétiques (Hall, 2017b, p26) et pour accéder à une valeur limite supérieure utile des inputs énergétiques (Murphy *et al.*, 2011).

3.1.2.5. Conclusions

Nous avons donc vu qu'il existe plusieurs manières différentes d'aborder le fait que l'EROEI inclut des termes énergétiques de formes variées. Par conséquent, dans la pratique, les analystes ne sont pas toujours alignés sur les facteurs de correction appliqués dans leurs calculs d'EROEI. Il convient dès lors, pour chaque étude, que ces facteurs soient mentionnés et justifiés de manière claire et transparente, au risque, dans le cas contraire, de permettre des comparaisons erronées de valeurs basées sur des approches différentes, comme cela a pu être le cas pour le PV par exemple (Hall, 2017a).

3.1.3. Aspect temporel

Après la revue extensive des deux difficultés conceptuelles majeures de l'EROEI que sont les limites du système et la manière de prendre en compte les différentes formes d'énergie, nous abordons un autre point qui mérite encore d'être relevé. Il s'agit de l'aspect temporel.

L'EROEI, dans son sens propre, intègre normalement l'énergie délivrée et l'énergie investie sur l'entièreté de la durée de vie du système considéré (Hall, 2017b, p 130). Il s'agit donc traditionnellement d'un indicateur « intégratif » (Raugei *et al.*, 2018a). Toutefois, s'il est facile de considérer cet EROEI intégratif pour un système isolé possédant sa durée de vie propre, il peut devenir plus compliqué d'établir une période avec une date de début et de fin si l'on veut déterminer un EROEI à l'échelle d'un réseau électrique entier par exemple. Si l'on fixe arbitrairement une période de temps finie précise, il est probable qu'on ne capturera pas le vrai retour énergétique car la production actuelle résulte d'investissements dans le passé et des investissements présents peuvent être faits pour des retours dans le futur (Brandt et Dale, 2011).

Dans le même ordre d'idées, certains auteurs font ainsi la distinction entre les ERR (*Energy Return Ratios*), déterminés sur la durée de vie complète du système considéré et dont fait donc partie l'EROEI au sens propre, et ce qu'ils appellent les PRR (*Power Return Ratios*), déterminés par exemple sur base annuelle (Fizaine et Court, 2016). Plutôt que d'être calculés en fonction de l'énergie délivrée et de l'énergie investie sur la durée de vie totale du système, ces PRR se basent dès lors plutôt sur des valeurs de flux (annuels par exemple donc). L'on peut faire remarquer que les valeurs d'ERR différeront des valeurs des PRR correspondants de manière d'autant plus significative que le système considéré s'écarte de l'état stationnaire, c'est-à-dire de l'état où investissements et retour se font sur la même période (Murphy *et al.*, 2011). En effet, pour un système global, son PRR peut éventuellement être égal à son ERR quand ce système est en phase stationnaire mais il sera par contre beaucoup plus faible pendant les périodes de gros investissements et à l'inverse plus élevé quand les investissements porteront leurs fruits. Les PRR constituent donc une approche « dynamique », par opposition à l'approche intégrative des ERR, comme l'EROEI.

Il peut être intéressant d'envisager une telle approche dynamique et donc de considérer un « PROPI » (*Power Return On Power Investment*)⁸ dans le cas de systèmes complets globaux, en analysant par

⁸ En réalité, c'est le terme de « PROI » (*Power Return On Investment*) qui a été utilisé par Raugei *et al.* (2018b). Toutefois, bien qu'il n'ait jamais été référencé à notre connaissance, nous utilisons l'acronyme « PROPI » (*Power Return On Power Investment*) car il est le pendant plus exact à la terminologie d'EROEI (vs. EROI) que nous avons adoptée dans ce travail.

exemple l'énergie délivrée à la société sur une année donnée comparée à la somme des investissements énergétiques de la même année (Raugei *et al.*, 2018b). En effet, cette approche permet d'appréhender l'énergie nette « instantanée » (annuelle) dont dispose la société plutôt qu'une valeur intégrative de cette énergie sur la durée de vie du système, durée de vie par ailleurs complexe à délimiter pour un système global. Ce type d'étude dynamique a notamment été réalisé par Dale et Benson (2013) qui ont ainsi analysé l'industrie PV dans son ensemble. Sachant que, selon eux, plus de 90% des coûts énergétiques du PV ont lieu à la fabrication et installation des systèmes, le secteur se révèle au départ un consommateur net d'énergie, même si chaque équipement installé rembourse largement sur sa durée de vie l'énergie qui doit être investie au départ. On peut donc dire que le PV est, dans sa phase initiale de déploiement, « subsidié » par de l'énergie d'autres sources. Considérant la vitesse très élevée de déploiement du PV, Dale et Benson ont voulu évaluer à partir de quel moment le PV pris dans son ensemble est devenu (ou deviendrait) un producteur net d'électricité. Ils montrent ainsi dans leur analyse que jusqu'au plus récemment que 2010, l'industrie PV a été un consommateur net d'énergie.

En résumé, concernant l'influence du facteur temporel dans le concept d'EROEI, l'on peut dire qu'aborder l'EROEI dans sa définition classique intégrative, qui couvre la durée de vie du système considéré, est très pertinente à l'échelle de systèmes énergétiques individuels. Toutefois, à l'échelle de réseaux énergétiques globaux, il peut également être pertinent de déterminer un PROPI sur base de flux annuels.

3.2. Données utilisées

Nous venons de voir longuement les difficultés qui sont liées à la conception-même de l'indicateur EROEI et qu'une description claire et transparente de la méthodologie utilisée est donc requise dans chaque étude afin d'assurer que l'appréhension qui sera faite de l'EROEI spécifique qui a été étudié soit toujours correcte. Toutefois, même avec une méthodologie claire et explicite, il est encore possible d'aboutir à des désalignements de valeurs de l'EROEI entre études, suite aux données chiffrées qui sont utilisées pour le calculer et aux variations auxquelles celles-ci sont sujettes.

3.2.1. Origine et manipulation des données

La première difficulté liée aux données a trait à la disponibilité et origine de celles-ci et aux manipulations qui peuvent être requises pour pouvoir les utiliser.

Nous avons vu dans la section relative aux limites du système (3.1.1) la complexité de relever exhaustivement l'énergie totale investie dans un procédé et le risque associé au *cut-off*. Heureusement, à l'heure actuelle, les bases de données LCA s'avèrent des sources précieuses d'informations. Ainsi, elles permettent d'accéder aux inputs énergétiques primaires de nombreux procédés et sont largement utilisées par les analystes de la NEA. Toutefois, des mises en garde doivent être faites sur l'utilisation de ces bases de données dans les analyses d'EROEI. Premièrement, ainsi que nous l'avons vu en section 3.1.2.2, différentes bases de données peuvent adopter des conventions différentes quant à la conversion en énergie primaire. En outre, Arvesen et Hertwich (2015) ont notablement mis en évidence d'autres points problématiques relatifs à l'utilisation de la CED des bases de données LCA pour en déduire l'énergie investie.

Comme déjà vu plus haut (Eq. 4), la CED inclut non seulement l'énergie investie dans le process mais aussi l'énergie qui est contenue dans la PES extraite par le procédé. Celle-ci ne doit pas entrer au dénominateur de l'EROEI. Dès lors, il est nécessaire de pouvoir retrancher de la CED cette énergie contenue dans la PES pour déterminer l'énergie investie. Mais il ne suffit pas simplement de soustraire des valeurs de CED issues des bases de données LCA le contenu énergétique du combustible lui-même (pour lequel il faut d'ailleurs déjà être attentif de savoir comment a été exprimée son énergie primaire). En effet, la CED est un indicateur de l'utilisation des ressources naturelles et prend en compte l'énergie primaire totale extraite de la nature ; elle inclut donc aussi toutes les pertes au long de la chaîne (ex : fuites de CH₄ des puits de pétrole, pertes de pouvoir calorifique du charbon dans le transport et stockage, ...). Or, ainsi que le soulignent Arvesen et Hertwich, celles-ci ne doivent pas être prises en compte dans le dénominateur de l'EROEI car elles ne sont pas des formes d'énergie « appropriées » par la société ; ce ne sont pas des « investissements » qui doivent être « remboursés » pour que la ressource soit une source d'énergie nette. Cette énergie « perdue » n'a jamais été disponible sous la forme d'un vecteur énergétique utilisable par la société et, dès lors, ce n'est pas un « investissement » énergétique qui est « détourné » d'autres usages possibles pour la société. Ces auteurs argumentent encore ainsi par un exemple : il ne serait pas logique de ne pas considérer les pertes de conversion entre charbon et électricité comme énergie investie si par ailleurs on considère les pertes énergétiques du charbon pendant son transport comme telle. Ils notent que ceci est malheureusement indirectement fait dans beaucoup d'études, qui ne considèrent pas l'utilisation des valeurs de CED avec suffisamment de précaution. Toutefois, ils admettent que déduire ces pertes pour pouvoir les retrancher des valeurs de CED des bases de données LCA n'est vraiment pas une tâche facile.

Même si les bases de données LCA constituent donc une mine d'informations (avec les précautions que nous venons de voir), il reste malgré tout de nombreux process dont les valeurs d'énergie et de matériaux investis ne sont pas accessibles. Dans ce cas, des données financières, qui sont très souvent bien plus exhaustivement enregistrées par les business, gouvernements et entités de toutes sortes, peuvent être utilisées pour remplacer les données énergétiques manquantes (Murphy *et al.*, 2011). Pour convertir les coûts économiques issus de ces données en coûts énergétiques, des facteurs d'intensité énergétique sont utilisés et doivent donc au préalable être déterminés. La méthode la plus générale et simple pour ce faire consiste à diviser la consommation énergétique nationale totale par le PIB. Cependant, cette valeur moyenne nationale n'est qu'une mesure très grossière car elle moyennise des valeurs d'intensité énergétiques à travers des secteurs fort différents. Des valeurs plus spécifiques par secteur peuvent dès lors devoir être utilisées. Murphy *et al.* (2011) insistent qu'il convient d'ajuster le degré de précision (spécificité par secteur) au niveau de précision général de l'analyse d'EROEI que l'on prétend réaliser.

L'on peut ainsi conclure que la disponibilité des données et les manipulations qui en sont faites peuvent être à l'origine de valeurs discordantes d'EROEI. Dès lors, une nouvelle fois, la transparence s'impose sur les sources utilisées dans l'analyse ainsi que sur les hypothèses qui sont prises en compte pour les manipuler.

3.2.2. Contexte considéré

Un autre élément important relatif aux données utilisées mérite d'être développé. Il s'agit des hypothèses que l'on prend relativement au contexte dans lequel le système analysé est installé.

Un premier point dans cette problématique concerne les valeurs considérées pour la détermination de l'énergie délivrée au numérateur de l'EROEI et la différence qui peut être observée entre des valeurs théoriques supposées et les valeurs réelles effectives. Ainsi, par exemple, pour un système PV, de nombreuses études se basent sur des spécifications théoriques du système et des paramètres d'insolation pour réaliser leurs calculs d'EROEI. Or, comme le relèvent différents auteurs (ex : Prieto et Hall, 2013), l'output énergétique déterminé de cette façon peut s'avérer significativement supérieur à ce qu'il sera dans les conditions réelles de l'environnement où le système est effectivement placé (nuages, ombrages, accumulation de poussière et de salissures d'oiseaux, dégradation de l'équipement, pannes, ...). En outre, ces mêmes auteurs soulignent que les durées de vie généralement prises en compte dans les analyses des systèmes PV (de 25 à 30 ans) sont aussi des durées théoriques et que le recul que l'on a sur les technologies impliquées peut ne pas être suffisant pour garantir que les durées de vie effectives moyennes atteindront effectivement ces valeurs. Dès lors, l'output considéré sur la durée de vie du système pourrait également être réduit dans la pratique, si ces durées de vie s'avèrent effectivement plus faibles que les durées théoriques prises en compte.

La variabilité des paramètres selon le contexte local effectif dans lequel se trouve le système considéré peut également affecter les données utilisées au dénominateur. Ainsi, par exemple, les distances et modes de transport des combustibles (ex : pipeline de gaz vs. gaz liquéfié transporté par bateau) ou les rendements des technologies locales utilisées pour la production de l'électricité peuvent grandement impacter les valeurs de l'énergie investie (Kis *et al.*, 2018).

Sous un angle plus dynamique, d'autres éléments liés au contexte peuvent encore affecter les valeurs des paramètres utilisés dans les calculs d'EROEI. Ainsi, il faut être attentif à l'obsolescence possible des données. En effet, lorsque l'on évalue des technologies qui sont encore en pleine phase d'évolution, les données utilisées peuvent très vite ne plus refléter la réalité actuelle concernant la performance et l'intensité énergétique des équipements. C'est particulièrement le cas pour le PV dont les progrès technologiques ont été assez fulgurants et sont toujours à l'œuvre. Ceci peut dès lors mener à des valeurs d'EROEI sous-estimées par rapport à la réalité du moment. Koppelaar (2017), par exemple, relève une proportion importante d'études d'EROEI de systèmes PV qui intègrent des données vieilles de 10 ans ou plus. Un manque de transparence sur l'âge des données peut donc mener à des conclusions et comparaisons trompeuses.

Un deuxième facteur de nature dynamique est encore susceptible d'affecter les données. Celui-ci intervient plutôt dans le cadre d'évaluations prospectives d'EROEI à un niveau global de systèmes énergétiques entiers. Il s'agit de l'évolution que peuvent subir les valeurs des paramètres avec l'augmentation de l'échelle de mise en œuvre d'une technologie. Dans ce cadre, l'on peut notamment relever les points suivants, concernant tout particulièrement les technologies de sources renouvelables, étant donné que ce sont celles, dans le contexte actuel, qui sont les plus amenées à étendre leur échelle de déploiement. Le premier est la diminution du taux de charge avec l'utilisation de sites de moins en moins favorables à mesure que les meilleurs sites sont occupés (ex : éoliennes). Le deuxième, déjà évoqué en section 3.1.1.2, concerne la gestion de l'intermittence et les hypothèses qui doivent être prises en compte par rapport à cela dans les scénarios prospectifs que l'on veut explorer : pondération entre mesures de stockage, de surcapacité, d'extension du réseau, etc., sachant en outre que certaines technologies sont encore en plein développement (ex : stockage par batteries, air comprimé, gaz de synthèse,...) et peuvent dès lors présenter un haut degré d'incertitude sur les données (Limpens et Jeanmart, 2018). Nous reviendrons plus en détails sur les différents éléments liés à l'échelle de déploiement des technologies dans nos réflexions sur une perspective plus globale en section 5.2 mais, dans le présent paragraphe relatif à la variabilité des données considérées, il convient

donc déjà de mettre en lumière l'importance que peuvent avoir sur les valeurs d'EROEI les hypothèses prises en compte dans les projections qui sont réalisées.

En conclusion de ce paragraphe relatif à l'impact de la variation des données en fonction du contexte, l'on peut donc dire à nouveau qu'il est important d'aligner les données utilisées sur l'objectif de l'analyse d'EROEI réalisée. Si l'objectif est de réaliser une évaluation de l'EROEI effectif d'un système défini à un temps t , il est essentiel d'utiliser des données aussi réelles que possibles et qui soient représentatives de ce temps t . Dans le cas de la détermination d'un EROEI prospectif à une échelle plus globale, il convient en outre d'être plus prudent encore dans l'utilisation des données, étant donné que des hypothèses doivent être prises dans la projection réalisée à un temps t dans le futur. Dans tous les cas, la plus grande transparence sur les données utilisées s'impose.

3.3. Conclusions du chapitre et recommandations

Au terme de ce long chapitre sur les difficultés rencontrées dans l'évaluation pratique de l'EROEI, tentons de résumer les éléments présentés et d'en dégager quelques recommandations.

- Au niveau de la conception de l'indicateur, nous pouvons insister sur les points suivants :
 - a) Limites du système
 - Etape de la chaîne énergétique considérée : celle-ci doit être clairement définie et considérée de manière identique pour la délimitation du numérateur et du dénominateur.
 - Numérateur : il convient d'être clair sur la manière dont sont pris en compte ou non les co-produits éventuels et si l'énergie délivrée est considérée en termes d'énergie brute ou d'énergie nette.
 - Dénominateur : il est nécessaire de décider quels coûts énergétiques sont pris en compte et d'être transparents sur ceux-ci : coûts directs/indirects (énergie et matériaux), coûts associés aux services, à la main-d'œuvre, aux externalités. Les limites considérées pour les coûts énergétiques pris en compte doivent être en adéquation avec les objectifs et l'échelle de l'analyse, et le choix entre une méthode bottom-up ou top-down sera fait en fonction de ces limites.
 - b) Formes d'énergie
Plusieurs méthodes de conversion de l'énergie existent pour pouvoir agréger et comparer des valeurs d'énergie de formes différentes. Les principales sont : l'expression de l'énergie en équivalents thermiques (pas de conversion), la conversion en énergie primaire et l'utilisation d'un facteur de correction lié à la valeur économique de l'énergie. Le choix se fera selon le contexte de l'étude et le bon jugement de l'analyste mais, en aucun cas, des valeurs d'EROEI déterminées selon des méthodologies différentes ne pourront être comparées.
 - c) Aspect temporel
Il faut définir si ce que l'on veut étudier est un EROEI (indicateur intégratif de l'énergie sur la durée de vie du système) ou un PROPI (indicateur dynamique basé sur des flux). Le choix entre ces deux types d'indicateurs dépendra de l'objectif et de l'échelle de l'étude.

Différentes approches ont été proposées en vue de tenter d'uniformiser la définition conceptuelle de l'indicateur EROEI et différentes nomenclatures spécifiques ont été parallèlement définies en fonction des limites du système prises en compte. Toutefois, aucune méthodologie formelle et universelle n'existe encore à l'heure actuelle. Dès lors, il revient à chaque analyste de suivre les recommandations de clarté et de transparence sur les différents points repris ci-dessus.

- La transparence est essentielle également concernant les données utilisées. L'origine de ces données et les manipulations qui en sont faites doivent être explicitement reprises dans chaque étude d'EROEI. Il convient aussi d'être tout à fait clair sur le contexte pratique effectif considéré et sur son éventuelle évolution supposée dans le cas d'évaluations prospectives. Toutes les hypothèses prises en compte dans ce cadre doivent être indiquées sans équivoque.

En conclusion générale, l'on peut donc dire que la cohérence et la transparence doivent être les maîtres-mots dans toute analyse d'EROEI et que les choix méthodologiques qui sont faits doivent être explicites et en adéquation avec le but et la portée de l'analyse. Par exemple, l'analyse est-elle réalisée pour éclairer un choix entre des options énergétiques ? Est-elle réalisée pour évaluer le taux de déclin de l'énergie nette disponible issue d'un procédé de production d'un combustible spécifique ? Examine-t-elle l'addition marginale d'un système énergétique au système global actuel dominé par les énergies fossiles ou examine-t-elle au contraire une substitution complète par la technologie étudiée ? (Raugei *et al.*, 2017) Les objectifs de l'analyse définiront les limites qui sont prises en compte, les hypothèses qui sont faites, les données qui sont utilisées et chacun de ces éléments devra être rapporté de manière explicite. Jamais, il ne faudra utiliser un indicateur du simple nom d' « EROEI » sans s'assurer de lui avoir donné au préalable une définition claire et sans ambiguïté.

Ce type de conduite à adopter dans les études d'EROEI rappelle celui qui est clairement défini dans le cadre des analyses LCA et formalisé dans des standards internationaux (ISO14040 et 14044). Ainsi, récemment, divers analystes de l'EROEI (ex : Cleveland *et al.*, 2015 ; Carbajales-Dale *et al.*, 2015 ; Murphy *et al.*, 2016 ; Raugei *et al.*, 2016) ont réalisé le parallèle entre NEA et LCA et ont recommandé de suivre la philosophie de cette dernière. Plusieurs d'entre eux considèrent en réalité la NEA comme étant une branche particulière de la discipline LCA et proposent d'en suivre les étapes, qui permettent de concilier la rigueur et la flexibilité dont les analyses d'EROEI ont besoin (Murphy *et al.*, 2016). Ces étapes sont les suivantes :

- Définition du but et portée de l'analyse grâce auxquels l'unité fonctionnelle étudiée (ici par ex. MJ d'électricité fournie), le système et ses limites peuvent être fixés ;
- Inventaire du cycle de vie pour lister les échanges (ici énergétiques) qui ont lieu à travers les limites du système et sélection du cut-off et de l'allocation entre co-produits à appliquer ;
- Evaluation des impacts, incluant la catégorisation (ici est uniquement considéré l'impact demande énergétique) et la caractérisation (ici conversion des différentes formes d'énergie pour pouvoir les agréger) de ceux-ci.

Une étape supplémentaire encore qui est souvent appliquée dans les analyses LCA est la réalisation d'analyses de sensibilité. Celles-ci permettent de vérifier quels sont les impacts des hypothèses et données prises en compte en les faisant varier et permettent ainsi d'appréhender la variabilité potentielle des résultats en fonction des incertitudes sur ces hypothèses et données. Brandt *et al.* (2013) recommandent d'ailleurs que les résultats d'EROEI soient donnés sous la forme d'une distribution de valeurs plutôt que comme une valeur précise.

A la suite de ce long exposé des écueils qui parsèment les analyses NEA et avec à l'esprit les recommandations que nous en avons extraites, nous abordons au chapitre suivant un cas pratique d'analyse d'EROEI. Nous y étudierons de manière concrète et quantitative l'impact de facteurs méthodologiques et relatifs aux données, tels que détaillés précédemment, en réalisant une analyse de sensibilité de l'EROEI aux différents paramètres.

4. Cas pratique d'une analyse d'EROEI – Etude d'un système photovoltaïque

Ainsi que nous venons de le voir au chapitre précédent, de nombreux éléments, aussi bien méthodologiques que relatifs aux données utilisées, peuvent impacter l'EROEI. Ceux-ci expliquent la très grande variabilité que l'on retrouve parmi les valeurs d'EROEI rapportées dans la littérature pour une même technologie. Afin d'appréhender de manière plus concrète l'influence de ces différents éléments, nous avons choisi de présenter un cas d'étude traitant d'une technologie spécifique. Nous y étudierons de manière quantitative l'influence sur les valeurs d'EROEI des choix méthodologiques et des hypothèses considérées pour les paramètres entrant en jeu. La technologie que nous avons choisi d'aborder est le photovoltaïque (PV). Cette technologie a en effet fait l'objet de nombreux débats quant à l'énergie nette qu'elle est en mesure de fournir et a mené à de sévères désaccords entre auteurs (Carbajales-Dale *et al.*, 2015).

Ce chapitre commencera par un descriptif de la technologie PV et des paramètres entrant en jeu avant d'aborder l'analyse proprement dite. Celle-ci détaillera d'abord la méthodologie appliquée et les données et hypothèses prises en compte, puis elle entrera dans la présentation des résultats et la discussion de ceux-ci. Enfin, nous tenterons d'extraire des conclusions générales du cas d'étude analysé.

4.1. Technologie PV

Dans le cadre de la réduction de nos émissions de gaz à effet de serre, les technologies basées sur des sources renouvelables d'énergie ont acquis une place prépondérante dans les stratégies développées pour une production énergétique plus soutenable. Parmi celles-ci, la technologie PV a connu un développement exponentiel ces dernières années. Ainsi, le taux de croissance annuel moyen entre 2000 et 2014 a été de 44%. (Leccisi *et al.*, 2016) et la capacité installée globale du PV a actuellement dépassé les 300 GW_c (Rao *et al.*, 2018). Même si elle ne représente encore malgré tout qu'une très faible proportion de la production énergétique mondiale, l'électricité d'origine photovoltaïque est appelée à occuper une part de plus en plus significative dans le mix électrique global, passant de 1.7% en 2017 à plus de 17% dans certaines projections (IEA World Energy Outlook 2018 - Sustainable Development Scenario) (IEA, 2018). Dès lors, l'évaluation de l'énergie nette que peut fournir cette technologie a rencontré un intérêt croissant et les analyses d'EROEI se sont ainsi multipliées.

4.1.1. Description de la technologie

Les systèmes photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique, par lequel l'énergie lumineuse des photons est convertie en électricité. Schématiquement, les photons de lumière incidente mettent en mouvement des électrons au sein du matériau semi-conducteur constitutif des cellules PV, produisant ainsi un courant électrique de nature continue ('Connaissance des Energies', 2017). Un onduleur convertit ensuite le courant continu (DC) produit en courant alternatif (AC) avant qu'il ne soit injecté dans le réseau où l'énergie électrique ainsi générée sera utilisée.

Les principaux matériaux semi-conducteurs utilisés pour la fabrication des cellules PV sont produits à partir de silicium mais d'autres matériaux ont récemment fait leur apparition. Ainsi, les systèmes PV actuels peuvent être classifiés en 3 générations de technologies (Leccisi *et al.*, 2016) : la première est basée sur le silicium mono- ou polycristallin (mc-Si ou pc-Si) ; la deuxième consiste en des technologies

à couches minces comme le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe), le cuivre-indium-sélénium (CIS) ou cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS) ; la troisième génération inclut des technologies comme le solaire PV concentré (les rayons du soleil sont concentrés sur une petite cellule PV à haut rendement), les semi-conducteurs organiques (plastiques), les cellules hybrides (thermique et PV) et d'autres encore. Parmi cette variété de technologies, celles de première génération représentent plus de 90% du marché PV mondial (Palmer et Floyd, 2017).

Outre les cellules PV elles-mêmes, qui sont rassemblées en modules, d'autres composants entrent dans la constitution d'un système PV. Ces composants, communément appelés BoS (pour *Balance of System*), comprennent tous les éléments mécaniques et électriques qui assurent le fonctionnement global du système, tels que les cadres de support des modules, les onduleurs, transformateurs et câbles électriques (Bhandari *et al.*, 2015 ; Leccisi *et al.*, 2016).

Différents types de configurations de systèmes PV existent (Leccisi *et al.*, 2016) : ils peuvent être montés sur un toit (*roof-top*) et sont dans ce cas communément appelés BAPV (pour *Building Adapted PV*) ; ils peuvent aussi être intégrés dans les façades ou toits des bâtiments et sont alors dénommés BIPV (pour *Building Integrated PV*) ; ou encore ils peuvent être montés directement sur le sol (*ground-mounted*).

4.1.2. Paramètres

Un ensemble de paramètres sont à considérer dans une installation PV. Ceux-ci vont déterminer d'une part l'énergie que l'installation pourra délivrer et d'autre part l'énergie qui doit être investie dans le système. Nous les reprenons dans les 4 sections ci-dessous, les 3 premières sections traitant des paramètres influençant l'énergie délivrée et la quatrième ayant trait à l'énergie investie.

4.1.2.1. Irradiance et insolation

L'énergie solaire qui est reçue en un endroit donné de la Terre par unité de temps et de surface s'appelle l'*irradiance* et s'exprime en W/m^2 . L'*irradiance globale* est constituée du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus (rayonnement diffusé par les molécules et particules de l'atmosphère) (Huart, 2018).

L'*insolation* (aussi appelée irradiation) est l'irradiance intégrée sur le temps et représente donc la quantité d'énergie reçue par unité de surface sur une période de temps définie (Lundin, 2013).

Les valeurs d'irradiance et d'insolation dépendent de la localisation géographique (latitude, conditions climatiques (ex : couverture nuageuse)) et de l'orientation et de l'inclinaison de la surface considérée. Des données d'irradiance et d'insolation moyennes existent pour un grand nombre d'endroits. En Belgique, par exemple, l'insolation annuelle moyenne sur une surface au sol horizontale est de 1000 kWh/m² ; pour une surface placée plein sud et inclinée à 35°, elle est de 1140 kWh/m² (Huart, 2018). Une valeur d'insolation doit ainsi toujours être rapportée avec l'orientation et l'inclinaison considérées (Palmer et Floyd, 2017).

4.1.2.2. Performance de l'installation

Une installation PV est communément caractérisée par sa puissance « crête », exprimée en W_c . Il s'agit de la puissance maximale (capteurs bien orientés, bien inclinés, sans ombrage) que cette installation peut produire sous un ensoleillement donné ('Connaissance des Energies', 2017). Elle est fonction de l'*efficacité des modules*.

L'efficacité des modules (η_{mod}) est le ratio entre l'énergie électrique produite par le module et l'énergie lumineuse incidente (Bhandari *et al.*, 2015). Un module ayant un η_{mod} de 14% aura une puissance crête de 140 W_c/m^2 . En effet, l'irradiance standard appliquée en laboratoire pour le test d'efficacité d'un module est fixée à 1000 W/m^2 . Ces conditions standard de test incluent également des valeurs définies de température et de spectre lumineux. Donc, dans la pratique, la puissance effective de l'installation s'écartera de sa puissance crête en fonction des conditions réelles d'irradiance, de spectre et de température.

C'est ainsi qu'intervient un deuxième élément dans le rendement global de l'installation, le *ratio de performance* (PR pour *performance ratio*), qui prend en compte les conditions non-optimales de la réalité par rapport aux conditions théoriques (température, spectre lumineux, orientation et inclinaison des modules, ombrages, salissures, couverture neigeuse, ...) ainsi que les pertes de conversion du courant DC en courant AC par l'onduleur (Bhandari *et al.*, 2015, Palmer et Floyd, 2017). Le PR détermine donc l'énergie électrique réelle (courant AC) générée par l'installation complète par rapport à l'énergie électrique théorique (courant DC) que génèrent les modules en conditions optimales (Frischknecht *et al.*, 2016).

Un troisième facteur intervient encore dans le rendement global qu'aura une installation sur sa durée de vie. Il s'agit de *taux de dégradation* (DR pour *degradation rate*). En effet, à mesure que les modules et composants du système vieillissent et sous l'effet des facteurs environnementaux (température, humidité, ...), leur performance se dégrade (Bhandari *et al.*, 2015). Le DR est donc le taux de dégradation annuel moyen du rendement du système sur sa durée de vie (Gazbour *et al.*, 2018).

4.1.2.3. Durée de vie de l'installation

Un dernier élément intervient dans l'énergie totale délivrée par une installation. Il s'agit de sa durée de vie (T), généralement exprimée en années.

Ainsi, au final, l'énergie délivrée (exprimée par m^2 de panneau) est déterminée par l'équation suivante (Eq. 8).

$$E_{\text{del}} = \text{Insol.} * \eta_{\text{mod}} * \text{PR} * T * \sum_{y=1}^T (1 - (y * \text{DR})) \quad (\text{Eq. 8})$$

4.1.2.4. Énergie incorporée

Ainsi que nous l'avons détaillé en section 3, l'énergie qui est investie dans la production de l'énergie délivrée par un procédé énergétique inclut l'énergie directe et indirecte impliquée dans le cycle de vie du procédé. Dans le cas d'un système photovoltaïque, l'énergie investie à considérer concerne uniquement l'équipement PV lui-même, étant donné que, contrairement à des systèmes classiques thermiques de génération d'électricité, il n'y a pas d'étapes de préparation d'un combustible puisque la source d'énergie primaire (PES) est un flux d'énergie renouvelable directement récolté de l'environnement par l'équipement. On utilise souvent le terme d'*énergie incorporée* pour parler de l'énergie primaire totale qui est nécessaire à la fabrication des modules et du BoS d'un système PV, incluant donc aussi l'énergie requise pour les étapes d'extraction et de production des matières premières nécessaires à cette fabrication (Bhandari *et al.*, 2015). Dans sa version exhaustive, cette énergie incorporée comprend également l'énergie nécessaire à l'entretien, au fonctionnement et au démantèlement en fin de vie de l'équipement. Elle s'exprime typiquement en MJ/m^2 (de surface de panneaux) ou en MJ/kW_c . Nous l'appellerons $E_{\text{inv PE-eq}}$.

Différentes étapes sont impliquées dans la fabrication d'un système PV à partir des matières premières. Pour les technologies basées sur le silicium cristallin, celles-ci comprennent (Figure 4) : la production de silicium de grade métallurgique (Mg-Si) à partir de sable de silice (réduction carbothermique) puis son raffinage en silicium de grade solaire (SoG-Si) (principalement par « process Siemens » (voie gazeuse chlorée)) ; la cristallisation en lingots de silicium polycristallin et la recristallisation (appelée recristallisation de Czochralski) en silicium monocristallin pour les cellules de ce type ; le sciage des lingots en plaques ; ensuite, la fabrication des cellules PV par dopage, polarisation et traitement anti-reflet avant l'encapsulation de celles-ci entre des plaques de verre pour l'assemblage en modules ; et enfin l'ajout du BoS pour compléter le système PV (Leccisi *et al.*, 2016 ; Miquel, 2009).

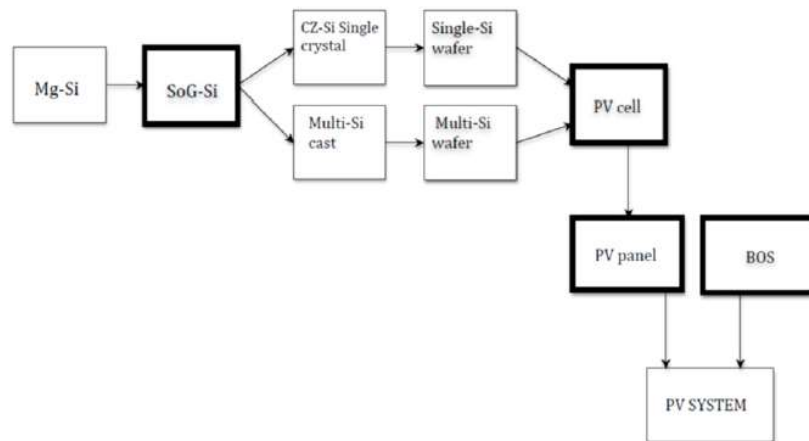


Figure 4 : Schéma du procédé de production des systèmes PV mc-Si et pc-Si (Leccisi *et al.*, 2016)

Selon Dale et Benson (2013), la majeure partie des coûts énergétiques (57%) du procédé de fabrication concerne l'extraction et la purification du silicium ainsi que la production des cellules. Ces auteurs indiquent également qu'environ 90% des inputs énergétiques de la fabrication des modules au silicium polycristallin sont sous la forme d'électricité.

Il est important de noter que la valeur d'énergie incorporée d'un système PV va dépendre de nombreux facteurs. Parmi ceux-ci figurent bien sûr la quantité de matériaux impliqués et la quantité d'énergie (sous forme de différents vecteurs énergétiques) utilisée dans la production de ces matériaux ainsi que dans la fabrication du système, mais il faut aussi relever que le mix énergétique intervenant dans la production de chacun des vecteurs énergétiques utilisés (ex : électricité) joue également un rôle, étant donné que celui-ci détermine la quantité d'énergie primaire associée à chaque vecteur. Dès lors, la localisation géographique des étapes de production peut avoir un impact sur l'énergie incorporée, en fonction du mix énergétique local. Ainsi, il a par exemple été rapporté que l'énergie incorporée d'un module fabriqué à Francfort (Allemagne) était de 10% moins élevée que celle du même module fabriqué à Perrysburg (USA) (Bhandari *et al.*, 2015).

Après avoir passé en revue l'ensemble de ces informations préliminaires concernant la technologie PV et ses paramètres, nous pouvons maintenant aborder la présentation du cas d'étude d'un système PV spécifique, dans lequel nous analyserons la sensibilité de l'EROEI aux différents éléments méthodologiques et aux données considérées.

4.2. Cas d'étude

4.2.1. Objectif

L'objectif de l'étude que nous allons réaliser est de montrer quelle peut être l'étendue de la variabilité de l'EROEI déterminé pour un système PV défini, selon les choix conceptuels qui sont faits et selon les données qui sont utilisées. Nous choisissons un système PV de technologie silicium polycristallin (pc-Si), étant donné qu'il représente une large proportion des systèmes installés (55% du marché en 2013 – Bhandari *et al.*, 2015).

4.2.2. Méthode

4.2.2.1. Sensibilité de l'EROEI aux choix conceptuels

Ainsi que nous l'avons vu (section 3.1), différents éléments interviennent dans la conception que l'on peut avoir de l'indicateur EROEI : limites du système, type de correction pour les différentes formes d'énergie, aspect temporel. Dans cette étude, nous ne pourrons pas analyser l'influence de l'ensemble des éléments mais en avons choisi un, que nous ferons varier, les autres étant fixés. Nous évaluerons ainsi spécifiquement l'impact sur les valeurs d'EROEI de la méthode de conversion appliquée aux différentes formes d'énergie. Concernant les autres éléments, les choix sont les suivants :

- Du point de vue de l'aspect temporel, nous considérerons l'EROEI dans sa définition stricte, intégrative sur la durée de vie du système. En effet, nous nous attachons à étudier l'EROEI d'un système spécifique individuel et l'étude d'un indicateur « PROPI » dynamique ne serait pertinente qu'à une échelle plus globale.
- Du point de vue des limites du système, nous considérons au numérateur l'énergie électrique délivrée par le système PV complet à l'injection sur le réseau et l'entendons en termes d'énergie « nette », au sens de Brandt et Dale (2011) dans leur définition de NER (cf. section 3.1.1.3), c'est-à-dire en retirant toute auto-consommation éventuelle d'électricité par le système car nous supposons que cette auto-consommation est déjà prise en compte dans le ratio de performance du système. Etant donné que nous avons choisi un système PV de première génération, il n'y a pas d'autre output énergétique à considérer que l'électricité produite (au contraire d'un système hybride qui générerait à la fois électricité et chaleur), ce qui écarte tout problème d'allocation.

Pour le dénominateur, l'énergie investie est l'énergie incorporée du système PV telle que définie en section 4.1.2.4 ($E_{inv\ PE=eq}$) et celle-ci sera déterminée sur base d'une approche bottom-up. Nous reviendrons plus précisément en section 4.2.4.2 sur les étapes du cycle de vie et limites considérés pour la détermination de la valeur d' $E_{inv\ PE=eq}$. Nous ne considérerons, quoi qu'il en soit, donc aucun coût énergétique associé à d'éventuels systèmes de gestion de l'intermittence, étant donné que nous nous intéressons à l'EROEI du seul système PV individuel et que considérer ce point n'est pertinent qu'à l'échelle d'un réseau global (cf. section 3.1.1.2).

Concernant la conversion des formes d'énergie, qui est l'élément méthodologique que nous avons décidé d'analyser dans le présent cas d'étude, nous appliquerons plusieurs expressions d'EROEI, caractérisées chacune par la manière de pondérer les différentes formes d'énergie. Ainsi, nous définissons les expressions d'EROEI suivantes : $EROEI_{simp}$, $EROEI_{elec}$, $EROEI_{PE=eq}$, $EROEI_{q-corr}$.

a) EROEI_{simp}

Nous définissons sous le terme d'EROEI_{simp} l'EROEI dont les différentes formes d'énergie au numérateur et au dénominateur sont exprimées simplement en termes d'équivalents thermiques. Nous calculons celui-ci par l'équation suivante (Eq. 9) :

$$\begin{aligned} \text{EROEI}_{\text{simp}} &= E_{\text{del elec}} / (E_{\text{inv therm}} + E_{\text{inv elec}}) \\ &= (\text{Insol.} * \eta_{\text{mod}} * \text{PR}^9 * T) / (0.1 * E_{\text{inv PE-eq}} + (0.9 * E_{\text{inv PE-eq}}) * 0.3) \quad (\text{Eq. 9}) \end{aligned}$$

où $E_{\text{del elec}}$ est l'énergie électrique délivrée, $E_{\text{inv therm}}$ est l'énergie investie qui est utilisée sous forme thermique (combustibles), $E_{\text{inv elec}}$ est l'énergie investie qui est utilisée sous forme d'électricité et les différents autres termes sont ceux tels que définis en section 4.1.2.

Etant donné que les données que nous utiliserons pour l'énergie investie sont formulées en termes d'énergie primaire ($E_{\text{inv PE-eq}}$) car nous n'avons pas systématiquement accès aux données brutes des différents vecteurs énergétiques utilisés, nous devons manipuler ces données pour qu'elles correspondent aux équivalents thermiques des vecteurs énergétiques effectifs utilisés. Pour ce faire, nous avons pris les hypothèses et simplifications suivantes :

- 90% de l'énergie investie l'est sous forme d'électricité. Nous avons pris en considération l'information de Dale et Benson (2013), qui indiquent que 90% des inputs énergétiques de la fabrication des modules de Si polycristallin sont sous la forme d'électricité, et nous l'avons extrapolée de manière simplifiée à l'ensemble de l'énergie incorporée du système. Les 10% restants sont ainsi considérés comme de l'énergie thermique de combustibles.
- l'efficacité de conversion moyenne caractérisant les réseaux électriques des différentes localisations où ont lieu les étapes de fabrication du système est supposée être de 0.3 (mix énergétique constitué essentiellement de technologies thermiques). A noter que ceci est une hypothèse simplificatrice et qui peut ne pas refléter la réalité. En effet, de Wild-Scholten (2013) indique par exemple dans son étude que le mix électrique pour la production du silicium de grade solaire est constitué d'hydro-électricité uniquement, ce qui augmenterait l'efficacité globale à considérer.

Notre exercice ayant un but simplement illustratif, nous avons estimé que les simplifications appliquées seraient sans impact par rapport à notre objectif.

b) EROEI_{elec}

L'EROI_{elec} exprime l'énergie au numérateur en termes d'énergie électrique délivrée et l'énergie au dénominateur en termes d'énergie primaire investie (énergie incorporée $E_{\text{inv PE-eq}}$). Nous le calculons par l'équation (10).

$$\begin{aligned} \text{EROEI}_{\text{elec}} &= E_{\text{del elec}} / E_{\text{inv PE-eq}} \\ &= (\text{Insol.} * \eta_{\text{mod}} * \text{PR}^9 * T) / E_{\text{inv PE-eq}} \quad (\text{Eq. 10}) \end{aligned}$$

⁹ Note : toutes les formules ont été simplifiées par rapport à l'équation 8 en prenant en compte un PR intégré sur la durée de vie du système dans lequel le DR est déjà pris en compte

c) EROEI_{PE-eq}

Dans l'EROEI_{PE-eq}, le numérateur est exprimé en termes d'équivalents d'énergie primaire et le dénominateur en termes d'énergie primaire investie (énergie incorporée E_{inv PE-eq}) ainsi que décrit dans l'équation (11).

$$\begin{aligned} \text{EROEI}_{\text{PE-eq}} &= E_{\text{del PE-eq}} / E_{\text{inv PE-eq}} \\ &= ((\text{Insol.} * \eta_{\text{mod}} * \text{PR}^9 * T) / \eta_{\text{grid}}) / E_{\text{inv PE-eq}} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 11})$$

où η_{grid} est l'efficacité de conversion moyenne globale du réseau auquel est connecté le système, selon l'approche de substitution décrite en section 3.1.2.2.

Il s'agit de l'approche préconisée par la guidance IEA sur la méthodologie d'analyse NEA des systèmes PV (Raugei *et al.*, 2016)

Il est utile ici de mentionner qu'un autre indicateur, lié à l'EROEI, est fréquemment utilisé dans l'analyse énergétique des systèmes PV ; il s'agit de l'*Energy Payback Time* (EPBT), ou *temps de retour énergétique*. Il se définit comme la période de temps sur laquelle un système PV doit opérer pour « rembourser » l'énergie qui aura été investie tout au long de sa durée de vie (Bhandari *et al.*, 2015), c'est-à-dire la période de temps après laquelle la quantité d'énergie qu'il aura délivrée dépassera la quantité d'énergie totale investie et après laquelle donc il sera un producteur d'énergie nette. Cet indicateur s'exprime en années et est calculé en prenant en compte l'énergie produite et l'énergie investie en termes d'équivalents d'énergie primaire. Il se calcule ainsi par l'équation (12) et est donc relié à l'EROEI_{PE-eq} par l'intermédiaire de la durée de vie du système (Leccisi *et al.*, 2016).

$$\begin{aligned} \text{EPBT} &= E_{\text{inv PE-eq}} / (E_{\text{del PE-eq}} / T) \\ &= T / \text{EROEI}_{\text{PE-eq}} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 12})$$

d) EROEI_{q-corr}

Le dernier type d'EROEI considéré se base sur l'approche de conversion des formes d'énergie sur base de leur utilité économique. Ainsi les formes d'énergie entrant au numérateur et dénominateur de l'EROEI_{q-corr} sont corrigées par un facteur de « qualité » correspondant au vecteur énergétique spécifique. Cette approche est celle préconisée par Murphy *et al.* (2011) et Hall (2017b). Nous utiliserons la première des 2 variantes qu'ils proposent (plus aisée à appliquer que le Divisia-Index), qui est celle qui intègre, pour définir l'énergie « corrigée » de chaque vecteur, un facteur de prix relatif au prix d'un vecteur de référence. L'EROEI_{q-corr} est ainsi calculé selon l'équation (13).

$$\begin{aligned} \text{EROEI}_{\text{q-corr}} &= E_{\text{del elec}} * f_{\text{prix elec}} / (E_{\text{inv therm}} + E_{\text{inv elec}} * f_{\text{prix elec}}) \\ &= ((\text{Insol.} * \eta_{\text{mod}} * \text{PR}^9 * T) * f_{\text{prix elec}} / (0.1 * E_{\text{inv PE-eq}} + (0.9 * E_{\text{inv PE-eq}} * f_{\text{prix ele}}))) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 13})$$

où $f_{\text{prix elec}}$ est le facteur de prix de l'électricité relatif au vecteur de référence. Nous avons choisi de prendre comme vecteur de référence le gasoil de chauffage et de considérer que toute l'énergie investie sous forme thermique l'est sous la forme de gasoil. Celle-ci ne se voit donc appliquer aucun facteur de correction (facteur = 1). Nous utilisons les prix suivants (marché belge) pour la

détermination de $f_{\text{prix elec}}$: 0.3656 €/l pour le gasoil¹⁰ (Fédération Pétrolière Belge, 02/01/2019¹¹) et 0.0753€/kWh pour l'électricité¹² (Eurostat, 21/12/2018¹¹) ; et nous considérons un pouvoir calorifique approximatif de 10 kWh/l pour le gasoil. Ainsi $f_{\text{prix elec}}$ prend une valeur de : $0.0753\text{€/kWh} / (0.3656 \text{ €/l} / 10 \text{ kWh/l}) = 2.1$.

Il est à noter que cette valeur est plutôt arbitraire et nous avons en outre déjà souligné la forte sensibilité de l'EROEI_{q-corr} aux fluctuations de prix. L'objet ici n'est pas d'être précis mais uniquement de montrer quel peut être l'impact d'un tel type de correction sur les valeurs d'EROEI.

4.2.2.2. Sensibilité de l'EROEI aux données

Comme abordé en section 3.2, même un EROEI dont les limites conceptuelles sont claires peut présenter des résultats variables selon les données qui sont utilisées. Nous allons donc analyser cette sensibilité de l'EROEI aux données considérées en faisant varier les valeurs des différents paramètres (repris en section 4.1.2). Par souci de simplicité et de clarté, nous n'appliquerons cette analyse de sensibilité qu'au seul EROEI_{PE-eq}, préconisé par la guidance IEA ; les autres EROEI définis ci-dessus seront uniquement calculés et comparés pour des valeurs fixes définies des différents paramètres.

Afin de déterminer quelles peuvent être les valeurs et gammes de variations pertinentes à considérer pour les différents paramètres, nous avons effectué une revue de la littérature. Cette revue a été réalisée en utilisant le moteur de recherche « Cible+ » de l'ULB et en y introduisant différentes combinaisons des mots-clés suivants : « photovoltaïcs », « PV », « energy payback time », « EPBT », « energy return », « ERO(E)I », « NEA », « energy LCA ». Notons que cette revue ne se veut pas exhaustive mais a uniquement pour but d'obtenir un nombre suffisant d'études afin de définir des gammes de valeurs qui soient représentatives pour les différents paramètres.

Parmi les résultats obtenus de cette recherche, ont été exclues les publications qui concernaient d'autres technologies que la technologie pc-Si classique choisie pour le système de notre étude. En outre, nous n'avons retenu que les publications datant d'après 2010, étant donné l'évolution technologique très rapide que connaît l'industrie PV. Finalement, parmi les études retenues, seules les études reprenant de manière suffisamment explicite les valeurs d'énergie incorporée ($E_{\text{inv PE-eq}}$) en termes d'une quantité d'énergie par m² de module¹³ ont été prises en considération. Le tableau récapitulatif repris en annexe compile l'ensemble des 17 études retenues et les valeurs rapportées pour les différents paramètres, ainsi que les valeurs d'EPBT et d'EROEI_{PE-eq}¹⁴ mentionnées dans ces différentes études. Afin de vérifier si notre interprétation et retranscription des valeurs des paramètres était correcte, nous avons également recalculé, pour chaque étude dans ce tableau, la valeur d'EROEI_{PE-eq} sur base des valeurs rapportées et comparé cette valeur à la valeur originale de l'étude. L'écart (<15%) a été jugé suffisamment faible pour que toutes les valeurs soient prises en compte¹⁵. Il est à noter que les dates de publication peuvent ne pas refléter exactement l'âge des données mais, étant

¹⁰ Prix du produit ex-raffinerie (hors marges, coûts de distribution, taxes et accises)

¹¹ Il est à noter que les 2 dates, prises en considération respectivement pour le prix du gasoil et le prix de l'électricité, ne correspondent pas exactement. Comme il n'était pas aisé de trouver une source fiable reprenant les prix des 2 vecteurs à la même date, nous avons estimé que ces quelques jours d'écart n'avaient pas d'impact pour le but illustratif de notre analyse

¹² Prix hors taxes

¹³ Ou alternativement, quantité d'énergie par kWc, qui pouvait être convertie sur base de l'efficacité donnée des modules. *Remarque* : nous n'avons pas pu prendre en considération les études dont les données brutes (quantités de matériaux, etc.) nous auraient éventuellement permis d'accéder à l'énergie incorporée, étant donné que nous n'avions pas à notre disposition de logiciel LCA qui nous aurait permis de calculer facilement les valeurs.

¹⁴ Calculé sur base de l'EPBT et de T quand la valeur n'a pas été déterminée dans l'étude.

¹⁵ Il est à noter que pour les articles d'Ito *et al.* (2011 et 2016), les valeurs s'écartent davantage pour la raison indiquée en remarque du tableau.

donné que notre étude se veut plutôt illustrative, nous ne sommes pas entrés davantage dans le détail de ce point.

Notons encore que, dans le tableau récapitulatif en annexe, sont également indiqués, à la première ligne, les paramètres recommandés par la guidance IEA (Frischknecht *et al.*, 2016 ; Raugei *et al.*, 2016).

4.2.3. Paramètres et fourchettes de variation prises en compte

Sur base des valeurs des paramètres recensées dans les études issues de notre revue de la littérature, nous avons établi un set de valeurs avec lesquelles réaliser notre analyse.

Pour ce faire, les valeurs minimum, maximum, moyennes et médianes des différents paramètres relevés ont d'abord été déterminées et sont présentées au Tableau 4. Pour l'énergie incorporée ($E_{inv\ PE-eq}$), une analyse plus fine a été réalisée afin de distinguer entre les différentes situations au niveau des étapes du cycle de vie (*cradle-to-gate* ou *cradle-to-grave*¹⁶) et des configurations de systèmes (*roof-top*, *ground-mounted* ou panneau seul) considérées dans les études. Celles-ci ont en effet un impact significatif sur la valeur d' $E_{inv\ PE-eq}$, comme on peut le remarquer au Tableau 4, où les valeurs moyennes des différentes situations ont été reprises. Les valeurs minimales et maximales d' $E_{inv\ PE-eq}$ de la méta-analyse de Bhandari *et al.* (2015) ont également spécifiquement été distinguées dans le Tableau 4 ; cette analyse concerne des systèmes complets (modules + BoS, sans distinction claire entre *roof* et *ground*) et les étapes *cradle-to-gate*.

Tableau 4 : Valeurs min, max, médianes et moyennes des paramètres issues de la revue de littérature

| | $E_{inv\ PE-eq}$ (MJ _{PE} /m ²) ¹ | Performance système | | | T (an) | Insolation (kWh/m ² *an) | η_{grid} | EROEI _{PE-eq} | EPBT | EROEI _{PE-eq} recalculé |
|--|--|---|-------------|------------|-----------|--|---------------|------------------------|------------|-------------------------------------|
| | | η_{mod} | PR | DR (%/an) | | | | | | |
| Min | 1008 | 0,123 | 0,75 | 0,5 | 20 | 700 | 0,3 | 6,4 | 0,7 | 5,3 |
| Max | 9101 | 0,175 | 0,90 | 1,0 | 30 | 2700 | 0,4 | 42,9 | 6,3 | 48,0 |
| Médiane | 3011 | 0,141 | 0,80 | 0,6 | 30 | 1700 | 0,32 | 18,9 | 1,6 | 22,0 |
| Moyenne | 3442 | 0,145 | 0,80 | 0,7 | 28 | 1674 | 0,33 | 19,9 | 2,1 | 21,0 |
| Moyenne cradle-to-gate | Panneau uniqt | 1771 | | | | | | | | |
| | Roof-top | 2635 | | | | | | | | |
| | Ground-mounted | 3167 | | | | | | | | |
| Moyenne cradle-to-grave | Panneau uniqt | 3340 | | | | | | | | |
| | Roof-top | 4058 | | | | | | | | |
| | Ground-mounted | - | | | | | | | | |
| Etude Bhandari et al, 2015 (cradle-to-gate) | Min-max tous systèmes (panneau + BOS) | 1008 - 9101 (2200 - 6600)* *valeurs extrêmes exclues | | | | | | | | |

Sur base de l'exercice réalisé au Tableau 4, des conditions d'analyse ont ensuite été choisies et sont décrites ci-dessous :

- *Conditions « standard »*

Ces conditions sont celles dans lesquelles la détermination des 4 types d'EROEI (selon section 4.2.2.1), sera réalisée. Elles ont été définies comme les valeurs médianes des paramètres, reprises au Tableau 4, et devraient ainsi représenter les valeurs les plus courantes d'EROEI que l'on peut retrouver dans les analyses NEA des systèmes PV. Pour l'énergie incorporée, un système *ground-mounted* et les étapes *cradle-to-gate* de son cycle de vie ont été considérés. Ainsi, en fonction des données moyennes

¹⁶ Ces termes sont utilisés classiquement en LCA. Par opposition au *cradle-to-grave*, le *cradle-to-gate* n'inclut pas les étapes d'installation, de fonctionnement et de démantèlement en fin de vie du système.

du Tableau 4, une valeur de $3200 \text{ MJ}_{\text{PE-eg}}/\text{m}^2$ a été fixée comme condition « standard » pour ce paramètre.

- *Conditions pour l'analyse de la sensibilité de l'EROEI à chaque paramètre*

Pour ces conditions, les valeurs de tous les paramètres sont fixées à leur valeur médiane, à l'exception du paramètre étudié que l'on fait varier entre sa valeur min et sa valeur max. Ces conditions ne sont appliquées que pour l'EROEI_{PE-eg}. Elles permettent d'étudier spécifiquement l'impact de la variation de chaque paramètre unique sur la valeur d'EROEI.

- *Conditions pour EROEI extrêmes*

Un EROEI_{PE-eg} extrême minimum et un EROEI_{PE-eg} extrême maximum seront déterminés en prenant les combinaisons des valeurs extrêmes de l'ensemble des paramètres.

Ainsi, pour l'extrême minimum, η_{mod} , PR, T et insolation sont fixés à leurs valeurs minimales et η_{grid} et $E_{\text{inv-PE-eg}}$ à leurs valeurs maximales ; et pour l'extrême maximum, ce sont les valeurs maximales de η_{mod} , PR, T et insolation qui sont fixées et les valeurs minimales de η_{grid} et $E_{\text{inv-PE-eg}}$. Pour $E_{\text{inv-PE-eg}}$, les valeurs extrêmes de la méta-analyse de Bhandari et al. (2015) sont prises en compte comme valeurs min et max (cf. Tableau 4).

Il est à noter que ces calculs d'EROEI extrêmes ne constituent qu'un exercice illustratif et ne se veulent aucunement être des valeurs représentatives d'EROEI effectifs. Notamment, il est peu plausible qu'une insolation maximum soit associée à un PR maximum, étant donné qu'une température plus élevée impacte négativement le PR.

- *Conditions « recommandées »*

Des valeurs de paramètres actualisées en fonction de l'état réel actuel des technologies PV ont été recommandées dans une publication récente de Gazbour *et al.* (2018). Elles sont reprises au Tableau 5 pour notre système pc-Si. Nous les utiliserons pour déterminer une valeur d'EROEI_{PE-eg} qui devrait être la plus en ligne avec la réalité actuelle du marché PV. Dans ces paramètres recommandés, les valeurs de PR et d'insolation ont en outre été pondérées pour l'Europe en fonction des localisations et orientations réelles des systèmes PV installés. Pour $E_{\text{inv-PE-eg}}$, nous prendrons la valeur « standard » de $3200 \text{ MJ}_{\text{PE-eg}}/\text{m}^2$, étant donné qu'il ne nous est pas possible d'accéder aux données détaillées des process recommandés par Gazbour *et al.* Quant au η_{grid} , nous le considérerons également à sa valeur « standard » médiane de 0.32.

- *Conditions « projetées »*

Nous nous baserons enfin sur une projection faite par Mann *et al.* en 2014 pour 2020 (également reprise au Tableau 5), afin d'appliquer les valeurs les plus optimistes de performance que nous ayons relevées pour les systèmes pc-Si et montrer quel sera l'EROEI_{PE-eg} dans ce cas. Pour la valeur de $E_{\text{inv-PE-eg}}$, nous ne prendrons pas la valeur de $1500 \text{ MJ}_{\text{PE-eg}}/\text{m}^2$ rapportée par ces auteurs mais celle de $1008 \text{ MJ}_{\text{PE-eg}}/\text{m}^2$ indiquée par Bhandari *et al.* (2015), puisqu'il semble, d'après leur analyse, que de tels niveaux puissent être atteints. La valeur d'insolation prise en compte dans notre calcul pour ces conditions sera de $1700 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{an})$, valeur utilisée par Mann *et al.* comme représentative de l'insolation de l'Europe méridionale et également médiane de l'ensemble des valeurs issues de notre revue. Pour η_{grid} , étant donné que les conditions envisagées ici constituent une sorte de projection,

nous imaginerons un réseau comportant une part importante d'électricité issue de sources renouvelables (éolien, solaire, hydro) et fixerons ainsi sa valeur à 0.8.

Tableau 5 : Conditions « recommandées » et conditions « projetées »

| Etude | Système | Etapas du cycle de vie considérées | $E_{inv\ PE-eq}$ (MJ _{PE} /m ²) | Performance système | | | T (an) | Insolation (kWh/m ² *an) |
|---|--|------------------------------------|--|---------------------|-------|-----------|--------|-------------------------------------|
| | | | | η_{mod} | PR | DR (%/an) | | |
| Gazbour et al, 2018 (recommandation de paramètres actualisés) | Panneau uniqt (module 265 W _c) | Cradle-to-grave | Recommandations sur quels sont les process actuels à considérer pour les différentes étapes + infos sur mix électriques à considérer | 0,163 | 0,818 | 0,91 | 30 | 1425 (moy Eur) |
| Mann et al, 2014 (projection technologie 2020) | Panneau uniqt | Cradle-to-gate | 1500 | 0,21 | 0,9 | - | 35 | 1700 (Eur S) |

4.2.4. Résultats et discussion

4.2.4.1. $EROEI_{simp}$, $EROEI_{elec}$, $EROEI_{PE-eq}$ et $EROEI_{q-corr}$ en conditions « standard »

Les valeurs des 4 types d'EROEI ont été déterminées en utilisant les valeurs médianes des différents paramètres telles que renseignées au Tableau 4. Elles sont présentées au Tableau 6 et à la Figure 5.

Tableau 6 : Valeurs des différents types d'EROEI en conditions « standard »

| | $EROEI_{simp}$ | $EROEI_{elec}$ | $EROEI_{PE-eq}$ | $EROEI_{q-corr}$ |
|----------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|
| Conditions standard | 10,3 | 6,5 | 20,2 | 20,4 |

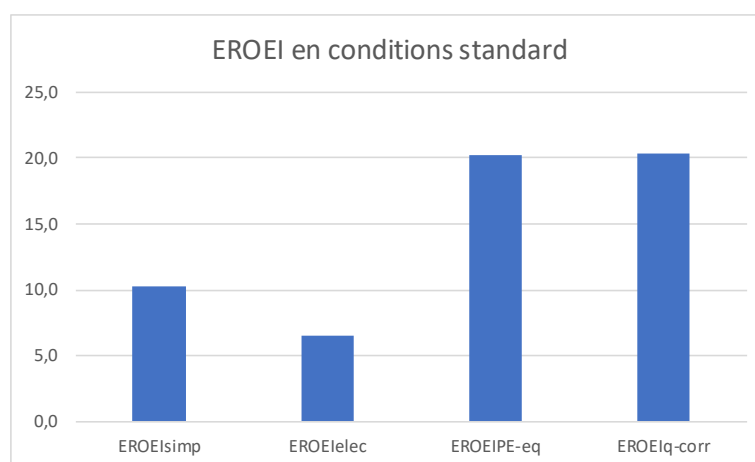


Figure 5 : Valeurs des différents types d'EROEI en conditions « standard »

Notons que nous n'avons pas pris en compte le taux de dégradation (DR) dans nos calculs des EROEI mais avons considéré que le ratio de performance (PR) incluait déjà ce facteur. En effet, parmi les données récoltées, de nombreuses études ne mentionnent pas si le PR considéré est un PR initial ou un PR intégré sur la durée de vie du système ; en outre, le DR n'est pas toujours indiqué. En l'absence donc d'une transparence suffisante sur ces informations, nous avons opté pour cette simplification, sachant que notre exercice a un but purement illustratif. Toutefois, il est intéressant de souligner ce

problème de transparence dans les données, également relevé par Gazbour *et al.* (2018). En effet, celui-ci peut être à l'origine d'une partie de la confusion qui entoure les valeurs d'EROEI du PV. Rappelons donc ici l'importance d'un relevé explicite des paramètres considérés dans toute analyse d'EROEI, ainsi que recommandé en section 3.3.

En examinant les valeurs des différents EROEI obtenues, l'on observe que celles-ci couvrent une fourchette relativement large. Le facteur d'environ 3 entre les valeurs extrêmes s'explique par l'efficacité de conversion entre énergie primaire et électricité. En effet, dans l'EROEI_{elec}, l'énergie délivrée est exprimée en termes d'électricité produite, alors que dans l'EROEI_{PE-eq}, elle est exprimée en équivalents d'énergie primaire de cette électricité selon l'efficacité du réseau, ici de 0.32. La valeur de l'EROEI_{q-corr} apparaît très semblable à celle de l'EROEI_{PE-eq}, même si le facteur de pondération appliqué entre électricité et énergie thermique diffère entre ces deux EROEI. Il est à noter que, pour un système PV, l'énergie au numérateur et au dénominateur de l'EROEI est très majoritairement constituée du même vecteur (électricité), ce qui atténue dès lors l'effet éventuel des différences de facteurs de pondération.

Nous pouvons également comparer nos valeurs d'EROEI aux valeurs rapportées par les études que nous avons inventoriées. Commençons par préciser que les valeurs reprises dans les études sont majoritairement exprimées sous la forme d'un EROEI de type EROEI_{PE-eq} (ou souvent plutôt de l'EPBT qui lui correspond), appliquant donc en cela les recommandations de la guidance de l'IEA pour l'analyse NEA des systèmes PV (Raugei *et al.*, 2016). Toutefois, certaines des études renseignent en réalité un EROEI_{elec}, présenté sous la forme de l'EPBT correspondant (Fu *et al.*, 2015 ; Wu *et al.*, 2017). Ceci constitue, à notre sens, une erreur méthodologique. En effet, nous considérons que rapporter un temps de retour énergétique en comparant l'électricité produite par le système à l'énergie primaire investie dans sa fabrication n'est pas équitable, d'autant moins lorsque cela n'est pas clairement explicité, comme c'est le cas dans les deux études que nous avons relevées. Leurs conclusions indiquent ainsi simplement que l'EPBT déterminé pour leurs systèmes respectifs est de telle valeur et il est nécessaire d'entrer vraiment dans les menus détails de leurs analyses pour comprendre quel type d'EPBT est en réalité considéré ! Nous nous trouvons ainsi ostensiblement face à une autre des sources de confusion entre valeurs d'EROEI, telles que longuement détaillées en section 3. Pour pouvoir malgré tout inclure les valeurs déterminées par ces 2 études dans nos calculs des valeurs moyenne et médiane d'EROEI sur l'ensemble des données, nous les avons dès lors préalablement corrigées en leur appliquant un facteur de conversion, que nous avons arbitrairement fixé à 0.3 en l'absence d'autre information sur les mix énergétiques des réseaux considérés.

Les valeurs moyenne et médiane d'EROEI_{PE-eq} issues de l'ensemble des études sont ainsi présentées au tableau 7 en regard de la valeur d'EROEI_{PE-eq} que nous avons déterminée sur base des conditions « standard ».

Tableau 7 : Comparaison de l'EROEI_{PE-eq} calculé avec les valeurs d'EROEI_{PE-eq} moyenne et médiane des différentes études

| | EROEI _{PE-eq} |
|---------------------|------------------------|
| Conditions standard | 20,2 |
| Moyenne études | 19,9 |
| Médiane études | 18,9 |

L'on observe que les valeurs médiane et moyenne des études sont respectivement de 18.9 et 19.9, ce qui est en bon alignement avec la valeur de 20.2 que nous avons déterminée sur base des valeurs médianes des paramètres. La fourchette d'EROEI_{PE-eq} obtenue sur l'ensemble du set de données des études est toutefois très large et s'étend de 6.4 à 42.9 (cf. Tableau 4). Ceci est dû aux valeurs variables de paramètres prises en compte dans les différentes études. C'est pourquoi nous allons analyser plus précisément dans la section suivante la sensibilité de l'EROEI à ces différences de valeurs des paramètres.

4.2.4.2. Sensibilité de l'EROEI_{PE-eq} aux valeurs des différents paramètres

Ainsi qu'indiqué précédemment, nous analysons la sensibilité de l'EROEI aux différents paramètres uniquement pour l'EROEI_{PE-eq}, qui est celui recommandé par la guidance IEA et celui qui est majoritairement rapporté dans les études. Nous réalisons une simple analyse univariée où nous faisons varier chaque paramètre un par un, l'ensemble des autres paramètres étant fixés à leur valeur médiane respective. Pour chacun des paramètres, la valeur minimale et la valeur maximale relevées parmi les études inventoriées sont appliquées (cf. section 4.2.3 et Tableau 4). Les valeurs d'EROEI_{PE-eq} ainsi obtenues pour chaque paramètre, de même que le ratio entre ces valeurs, sont présentés au Tableau 8. La Figure 6 illustre graphiquement ces valeurs. Il est à noter qu'à nouveau, dans nos calculs, nous n'avons pas pris en compte le DR, pour les raisons déjà expliquées ci-dessus.

Tableau 8 : Valeurs de l'EROEI_{PE-eq} pour les paramètres min et max

| Paramètres | EROEI _{PE-eq} | | |
|------------------|------------------------|------------|--------------------------------------|
| | Min param. | Max param. | Ratio EROEI _{PE-eq} max/min |
| η_{mod} | 17,6 | 25,1 | 1,4 |
| PR | 19,0 | 22,8 | 1,2 |
| T | 13,5 | 20,2 | 1,5 |
| $E_{inv\ PE-eq}$ | 64,2 | 7,1 | 9,0 |
| Insolation | 8,3 | 32,1 | 3,9 |
| η_{grid} | 21,6 | 16,2 | 1,3 |

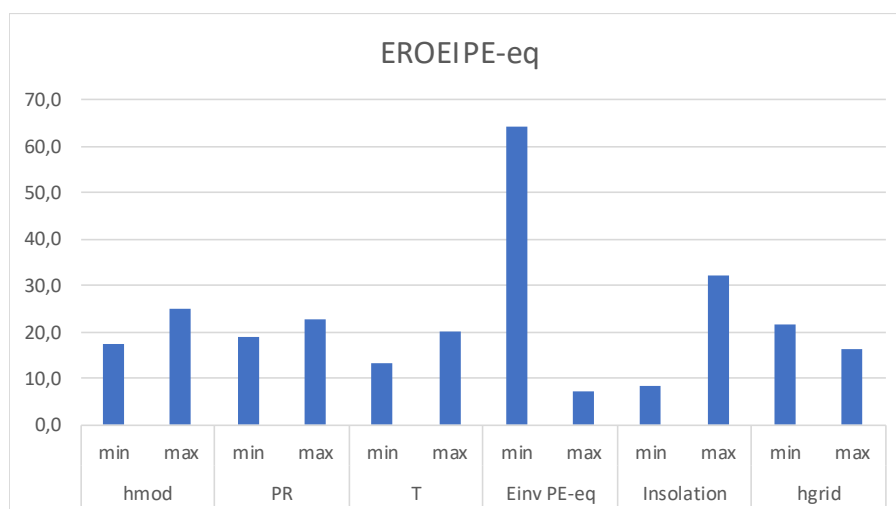


Figure 6 : Valeurs de l'EROEI_{PE-eq} pour les paramètres min et max

L'on constate que la fourchette de variation de l'EROEI_{PE-eq} sur l'ensemble des conditions est importante, allant de 7.1 à 64.2. Les variations les plus importantes entre les valeurs minimale et maximale sont observées pour les paramètres $E_{inv\ PE-eq}$ et insolation. Nous discutons de manière plus détaillée ci-dessous chacun des paramètres puis, afin de pousser un peu plus loin l'analyse, nous envisageons également une combinaison des valeurs minimales et maximales des différents paramètres pour obtenir les valeurs d'EROEI les plus extrêmes et nous discutons de ces valeurs dans un but illustratif.

- **Insolation**

La gamme des valeurs d'insolation appliquées dans les différentes études s'étend entre 700 et 2700 kWh/(m²*an). Celles-ci correspondent en réalité aux insulations moyennes qui sont observées dans différentes régions, s'étendant de l'extrême Nord de l'Europe aux régions sahariennes. La valeur médiane de 1700 kWh/m² correspond, quant à elle, à l'insolation moyenne de l'Europe méridionale mais coïncide également avec l'insolation globale moyenne entre les cercles arctique et antarctique (Raugei *et al.*, 2012).

Il est à noter qu'il y a parfois, ainsi que relevé par Palmer et Floyd (2017), une ambiguïté quant à savoir si l'insolation rapportée se réfère à l'insolation sur une surface bien orientée et inclinée ou à l'insolation globale horizontale (GHI). Nous avons considéré la première option pour nos calculs, sauf si l'étude indiquait clairement qu'il en était autrement (ex : Cucchiella et D'Adamo, 2012). D'après Palmer et Floyd (2017), la valeur d'insolation sur un panneau orienté et incliné de façon optimale peut être de ~145-272 kWh/(m²*an) supérieure à celle correspondant à la GHI. La différence dépend de la latitude et des contributions relatives de l'insolation directe et de l'insolation diffuse dans la région en question. Même si l'impact pour notre étude purement illustrative n'est pas fondamental, de nouveau, nous pouvons tout de même rappeler l'importance que les paramètres soient rapportés de manière plus transparente.

D'après le Tableau 8 et la Figure 6, l'on constate que nos valeurs d'EROEI_{PE-eq} calculées pour les insulations minimale et maximale de 700 et 2700 kWh/(m²*an) diffèrent largement (8.3 vs 32.1). L'insolation apparaît ainsi comme le deuxième paramètre dans le classement relatif à l'étendue des variations, après l' $E_{inv\ PE-eq}$. Les valeurs d'EROEI_{PE-eq} déterminées diffèrent en réalité simplement d'un facteur égal au rapport entre les 2 valeurs d'insolation min et max (facteur de 3.9), étant donné que l'EROEI_{PE-eq} est tout simplement proportionnel à l'insolation. Si ceci paraît évident, il est toutefois utile de rappeler qu'il est donc important de bien en tenir compte lorsqu'on compare des valeurs d'EROEI entre études.

- **Efficiences des modules (η_{mod})**

En observant les valeurs de η_{mod} dans le tableau récapitulatif en annexe, on constate une certaine tendance à l'augmentation au fur et à mesure des années des études (classées par ordre chronologique dans le tableau). Même si les données utilisées par chaque étude peuvent ne pas refléter exactement l'état réel de la technologie à la date de l'étude, étant donné que des données plus anciennes sont parfois utilisées, cette observation s'avère assez bien en ligne avec la réalité. En effet, selon les informations rapportées en 2016 par Leccisi *et al.*, l'efficacité moyenne des modules PV à base de silicium est passée de 12% à 17% au cours des dix années qui ont précédé.

Le Tableau 8 et la Figure 6 montrent des valeurs d'EROEI_{PE-eq} respectivement de 17.6 et 25.1 pour la valeur minimale et la valeur maximale d' η_{mod} . Cette différence reflète directement le taux

d'amélioration de l'efficacité des modules d'environ 40% depuis la valeur minimale rapportée jusqu'à la valeur maximale, étant donné qu'à nouveau, l'EROEI_{PE-eq} est directement proportionnel à ce paramètre.

- **Ratio de performance (PR)**

Ainsi que l'indiquent Gazbour *et al.* (2018), le PR est un facteur difficile à estimer. En effet, en plus de facteurs techniques comme l'efficacité de conversion des onduleurs, il est également fonction de nombreux paramètres liés aux conditions locales (température, spectre lumineux, différence d'orientation et d'inclinaison des modules par rapport à l'optimale, ombrages, ...) (cf. section 4.1.2.2). De manière à aiguiller les analystes, la guidance de l'IEA (Raugei *et al.*, 2016) recommande d'utiliser une valeur de 0.75 pour les systèmes PV *roof-top* et de 0.80 pour les systèmes *ground-mounted*. Elle indique également que ces valeurs recommandées représentent le PR sur l'ensemble de la durée de vie du système, incluant donc déjà le DR. Parmi les études que nous avons inventoriées, certaines utilisent ces valeurs recommandées ; d'autres se basent sur des spécifications et conditions plus précises du système considéré.

Étant donné donc le nombre de facteurs intervenant dans les valeurs de PR et les différentes approches appliquées dans les études, nous avons décidé de prendre tout simplement en considération l'ensemble des valeurs rapportées, sans faire de distinction entre les configurations de systèmes, sachant par ailleurs que certaines études étaient réalisées sur des modules seuls. La valeur médiane que nous avons obtenue est de 0.80 et est donc similaire à la valeur recommandée par l'IEA pour les systèmes *ground-mounted* ; elle se justifie donc tout à fait comme condition standard pour le système *ground-mounted* que nous avons choisi. Pour rappel, nous avons également considéré la valeur de PR comme exprimée sur la durée de vie du système.

On peut noter dans le tableau récapitulatif en annexe, même si la tendance apparaît moins évidente que pour η_{mod} (vu notamment les différentes configurations de systèmes prises en considération), qu'il y a une progression des valeurs de PR avec le temps. Armendariz-Lopez *et al.* (2018) indiquent ainsi que sur les 2 dernières décennies, le PR moyen des systèmes PV est passé de 0.65 à 0.85. Quant au DR, les valeurs médiane et moyenne que rapporte Lundin (2013) sur base d'un grand nombre d'études sont respectivement de 0.5% et de 0.8%, ce qui se révèle assez proche de nos valeurs (cf. Tableau 4). Il indique également que près de 80% des DR sont inférieurs à 1%, ce qui est aussi en ligne avec ce que nous observons, avec notre valeur max de 1.0%.

Il est intéressant de signaler qu'il arrive que certaines études ne mentionnent pas le PR (ex : Ito *et al.* (2011) et d'autres études parmi celles écartées lors de notre screening initial). Gazbour *et al.* (2018) relèvent, eux, sur une série de 30 études NEA de systèmes PV réalisées à partir de 2005, que 30% d'entre elles n'indiquent pas le PR considéré. Or, il s'agit d'un paramètre fondamental dans la détermination de l'EROEI. Nous pouvons observer au Tableau 8 et à la Figure 6, que les valeurs d'EROEI_{PE-eq} déterminées pour les valeurs min et max de PR sont respectivement de 19.0 et 21.8. Même si, de tous les paramètres, le PR apparaît être celui qui présente la plus faible gamme de variation, il est indispensable d'être transparent dans les études réalisées et d'indiquer la valeur prise en compte.

- **Durée de vie (T)**

La durée de vie médiane des systèmes PV issue de nos données est de 30 ans ; celle-ci est en ligne avec la valeur recommandée par l'IEA (Raugei *et al.*, 2016). Les valeurs minimale et maximale observées sont respectivement de 20 et 30 ans. Palmer et Floyd (2017) rapportent que la plupart des études actuelles utilisent une valeur par défaut de 25 ou 30 ans (20 ans étant une valeur plus commune par

le passé), ce qui est donc effectivement ce que nous observons sur nos données. Toutefois, ces auteurs signalent aussi que ces valeurs reflètent les valeurs attendues par les fabricants mais qu'il faudra en réalité quelques décennies avant d'obtenir une vue empirique claire sur une durée de vie statistiquement représentative des systèmes PV qui sont en train d'être déployés actuellement.

Le Tableau 8 et la Figure 6 montrent des valeurs d'EROEI_{PE-eq} de 13.5 et 20.2 respectivement pour la durée de vie minimale de 20 ans et la durée de vie maximale de 30 ans. En réalité, les valeurs de durée de vie considérées dans la majorité des études actuelles étant plutôt de 25 ou de 30 ans, l'écart potentiel entre valeurs d'EROEI_{PE-eq} à cause de la durée de vie considérée devrait être réduit de moitié dans la pratique.

- **Efficiences de conversion du réseau (η_{grid})**

Le paramètre η_{grid} intervient spécifiquement dans l'EROEI_{PE-eq}, contrairement aux autres types d'EROEI, selon la logique de substitution LCA. Comme indiqué en section 3.1.2.2, il rend l'EROEI_{PE-eq} « relatif », étant donné qu' η_{grid} dépend du mix énergétique moyen utilisé pour la production d'électricité sur le réseau où le système PV est connecté. Ainsi, deux systèmes PV possédant exactement les mêmes performances et caractéristiques et placés exactement dans les mêmes conditions environnementales peuvent avoir des valeurs d'EROEI_{PE-eq} différentes simplement à cause du mix énergétique du réseau local.

Au Tableau 8 et à la Figure 6, on observe que les valeurs d'EROEI_{PE-eq} varient entre 16.2 et 21.6 pour la gamme de η_{grid} allant de 0.3 à 0.4 qui a été relevée dans nos études. Toutefois, si l'on considérait des réseaux qui comporteraient dans leur mix une grande part d'électricité provenant de sources renouvelables (ce qui sera le cas à mesure de la transition énergétique amorcée) et donc un η_{grid} significativement plus élevé, la valeur d'EROEI_{PE-eq} pourrait chuter, et cela donc sans même encore prendre en considération les impacts qui seraient dus à des systèmes de gestion de l'intermittence (ex : stockage). Ainsi, en prenant une valeur η_{grid} de 0.8, par exemple, l'EROEI_{PE-eq} calculé serait réduit à une valeur de 8.1. Il s'agit donc d'une diminution qu'on pourrait qualifier d'« artificielle », en ce sens qu'elle n'est en rien liée à une moins bonne performance énergétique du système. Toutefois, en parallèle, il est probable que, dans ce cas de figure, l'efficacité de conversion des réseaux qui fournissent l'électricité impliquée dans la fabrication des équipements PV évoluerait également vers des valeurs plus élevées et ferait ainsi chuter également la valeur d' $E_{inv\ PE-eq}$ (exprimée en termes d'énergie primaire). Dès lors la diminution de l'EROEI_{PE-eq} par l' η_{grid} associé à l'énergie du numérateur serait annulée ou tout au moins atténuée par les η_{grid} associés à l'énergie du dénominateur. Nous reviendrons sur ce point, parmi les autres éléments relatifs à l'énergie incorporée que nous abordons à la section suivante.

- **Energie incorporée ($E_{inv\ PE-eq}$)**

Le paramètre présentant la plus grosse variabilité est l'énergie incorporée. Ainsi, les valeurs minimale et maximale d'EROEI_{PE-eq}, respectivement calculées sur base des valeurs maximale et minimale d' $E_{inv\ PE-eq}$ relevées dans nos études, sont de 7.1 et 64.2 (cf. Tableau 8 et Figure 6), soit des valeurs différant d'un facteur 9 ! Notons que les valeurs minimale de 1008 MJ/m² et maximale de 9101 MJ/m² de l' $E_{inv\ PE-eq}$ proviennent toutes deux de la méta-analyse de Bhandari *et al.* (2015), qui indiquent avoir pris en considération uniquement des valeurs correspondant à des limites *cradle-to-gate* pour des systèmes complets incluant leur BoS. Il s'agit donc, dans ce cas, d'une variabilité qui n'est pas générée par un

problème de limites considérées, en tout cas par rapport à l'inventaire d'avant-plan. Bhandari *et al.* indiquent ainsi que la variabilité observée dans les valeurs d' $E_{inv\ PE-eq}$ qu'ils rapportent a vraisemblablement pour origine l'âge des données mais aussi les caractéristiques technologiques du BoS ou encore des modules (ex : épaisseur des cellules, procédés de fabrication spécifiques). Tout cela n'est très souvent pas décrit suffisamment en détails dans les différentes études. Bhandari *et al.* concluent finalement que les premières causes de la variabilité qu'ils observent sont un manque de transparence des auteurs quant à ces éléments mais également le choix des sources de données, points que nous avons clairement déjà soulignés au chapitre précédent.

L'on peut toutefois relever aussi, en plus de ces éléments, que sur l'ensemble des études que nous avons répertoriées en annexe, les limites considérées varient également fortement. Ainsi, même si la guidance IEA recommande, pour des raisons d'exhaustivité et d'uniformité, d'utiliser des limites *cradle-to-grave* pour déterminer l'énergie incorporée d'un système PV, sur les 17 études recensées, seulement 6 se revendiquent effectivement considérer des limites *cradle-to-grave*, 6 autres prennent en compte des limites *cradle-to-gate*, tandis que les études restantes indiquent des limites intermédiaires entre ces 2 cas de figure (certaines, par exemple, ne considèrent pas le démantèlement en fin de vie mais bien l'installation). De même, l'étendue du système considéré varie entre les études, 12¹⁷ prenant en compte les modules et le BoS et 5 ne considérant que les modules.

Quelques considérations additionnelles peuvent encore être développées concernant les données d'énergie incorporée :

- La première est le fait que l'ensemble des études recensées ont été réalisées selon la méthode *process-based*, qui est celle recommandée par l'IEA. Aucune n'a donc utilisé de données issues de tableaux I-O pour obtenir une vue plus large des coûts énergétiques, qui incluraient des éléments comme les services associés aux différentes étapes de production. Toutefois, il faut avoir à l'esprit que certains analystes, tels Prieto et Hall (2013), n'ont pas la même approche et ont considéré ce genre de coûts énergétiques additionnels. Dès lors, la variabilité des valeurs d' $EROEI_{PE-eq}$ liée à la variabilité de l'énergie incorporée prise en compte peut s'avérer, dans la pratique, beaucoup plus grande encore que celle que nous avons mise en évidence. Palmer et Floyd, notamment, indiquent que l'énergie incorporée peut être de l'ordre de 2 fois plus élevée en considérant une approche hybride plutôt que *process based*. (Palmer et Floyd, 2017 – tableau 2).
- Une deuxième considération a trait aux données utilisées pour déterminer l'énergie incorporée. La majorité des études indiquent se baser sur les données de CED¹⁸ disponibles via les bases de données LCA pour la déterminer. Or, nous avons vu en section 3.2.1 les mises en garde, faites notamment par Arvesen et Hertwich (2015), sur l'utilisation de la CED pour déterminer l'énergie investie. Dans aucune des études, toutefois, nous n'avons vu de discussion sur ce point et pensons donc que vraisemblablement les corrections préconisées par ces auteurs n'ont pas été prises en compte.
- Une dernière considération intéressante à discuter encore concerne le mix énergétique associé à l'énergie incorporée. Comme nous l'avons indiqué en section 4.1.2.4., les mix qui

¹⁷ Notons que, parmi celles-ci, les 2 études de Ito *et al.* (2011 et 2016), bien que prenant en compte un système complet avec son BoS, ne nous ont permis d'accéder qu'à l'énergie incorporée des modules (seule à être explicitement quantifiée en termes de MJ/m²)

¹⁸ Il est à noter que dans pratiquement toutes les études LCA et NEA, la CED rapportée pour un système PV ne prend déjà pas en compte l'énergie primaire associée à la ressource solaire (contrairement à la définition stricte de la CED) (Raugei *et al.*, 2012). L'utilisation directe faite de la CED est donc correcte pour ce point-là.

caractérisent les diverses localisations où ont lieu les différentes étapes de fabrication des systèmes PV peuvent impacter de manière significative l'énergie incorporée exprimée en termes d'énergie primaire ($E_{inv\ PE-eq}$). Il pourrait dès lors être intéressant de réaliser une analyse de sensibilité de l' $EROEI_{PE-eq}$ spécifique sur ce facteur, surtout dans le contexte de productions qui se déplacent vers d'autres pays. Les $EROEI_{PE-eq}$ de systèmes fabriqués en Chine (dont le mix énergétique repose largement sur le charbon) peuvent ainsi, par exemple, être significativement moins favorables que ceux des mêmes systèmes fabriqués en Europe, simplement donc sur la base du mix énergétique et en dehors de toute autre considération.

- **EROEI extrêmes**

Après avoir étudié la sensibilité de l' $EROEI_{PE-eq}$ à la variabilité de chacun des paramètres pris séparément, nous avons voulu pousser un peu plus loin l'analyse, à des fins purement illustratives, en calculant les valeurs d' $EROEI_{PE-eq}$ extrêmes minimale et maximale qui pourraient être atteintes sur base de la combinaison des valeurs minimales et maximales de l'ensemble des paramètres (cf. section 4.2.3). Les 2 valeurs extrêmes ainsi calculées sont présentées au Tableau 9.

Tableau 9 : Valeurs d' $EROEI_{PE-eq}$ extrêmes minimale et maximale

| | Conditions | |
|-----------------|-------------|-------------|
| | Extrême min | Extrême max |
| $EROEI_{PE-eq}$ | 1,3 | 151,9 |

L'on observe un écart considérable entre les 2 valeurs, celles-ci différant d'un facteur de plus de 100 ! Cet exercice, purement artificiel, a pour unique but d'illustrer une fois de plus l'importance de spécifier explicitement les valeurs des paramètres prises en compte dans chaque analyse d' $EROEI$ et de ne jamais comparer des valeurs sans s'être assuré au préalable que les conditions dans lesquelles elles ont été déterminées sont effectivement comparables.

4.2.4.3. $EROEI_{PE-eq}$ selon valeurs « recommandées » et « projetées » des paramètres

Nous revenons maintenant sur des conditions plus réalistes et tentons de déterminer une valeur d' $EROEI_{PE-eq}$ qui reflèterait au mieux l'état actuel de la technologie pc-Si. Pour ce faire, nous utilisons les données de performance du système indiquées par Gazbour *et al.* (2018) et déjà exposées en section 4.2.3 (Tableau 5). Celles-ci, pour rappel, se revendiquent être des valeurs actualisées, les plus en ligne avec la technologie actuelle. Ainsi qu'indiqué en section 4.2.3 également, nous prenons en compte dans notre calcul de cette valeur d' $EROEI_{PE-eq}$ une insolation de $1425\ W/(m^2 \cdot an)$, correspondant à une valeur pondérée pour l'Europe en fonction des localisations et orientations réelles des systèmes PV installés. Quant au η_{grid} , la valeur « standard » de 0.32 est considérée.

Outre cette valeur d' $EROEI_{PE-eq}$ « actualisée », nous déterminons également une valeur d' $EROEI_{PE-eq}$ « projetée », qui prend en compte des améliorations supplémentaires de la performance de la technologie sur base des données de Mann *et al.* (2014). Celles-ci constituent, comme décrit en section 4.2.3, une projection qui avait été faite pour 2020 et sont les données les plus favorables que nous ayons relevées pour notre technologie pc-Si. Il est à noter que d'autres technologies PV peuvent présenter des performances plus grandes encore. Pour ces conditions « projetées », nous considérons

en outre une insolation de 1700 kWh/(m²*an), correspondant à l'Europe méridionale, et médiane des valeurs répertoriées, et l' η_{grid} hypothétique de 0.8 d'un réseau qui serait constitué d'une grosse part d'électricité de sources renouvelables.

Les résultats sont présentés au Tableau 10. Nous y avons également ajouté les valeurs d'EPBT correspondantes.

Tableau 10 : Valeurs de l'EROEI_{PE-eq} dans les conditions « recommandées » et les conditions « projetées »

| | Conditions | |
|------------------------|--------------|-----------|
| | Recommandées | Projetées |
| EROEI _{PE-eq} | 20,0 | 50,2 |
| EPBT (an) | 1,5 | 0,7 |

Ainsi, un système PV de technologie pc-Si actuelle (dans les conditions d'insolation moyenne d'Europe), aurait un EROEI_{PE-eq} de 20,0, ce qui correspond à un temps de retour énergétique (EPBT) de seulement 1 an et demi et démontre donc la capacité de ce système à fournir une importante énergie nette sur sa durée de vie.

Les conditions « projetées » donnent, elles, un EROEI_{PE-eq} de 50,2, ce qui correspond à moins de 9 mois d'EPBT. Il est à noter que pour un η_{grid} similaire à celui considéré pour les conditions « recommandées », ces valeurs seraient encore plus favorables, de l'ordre de 120 pour l'EROEI_{PE-eq} et 4 mois pour l'EPBT. Notons aussi que dans notre scénario d'un η_{grid} de 0.8 dominé par les énergies renouvelables, nous aurions pu considérer en parallèle une évolution similaire pour l'efficacité des réseaux associés à l'électricité investie, ce qui aurait également donné des valeurs plus favorables que celles présentées.

4.2.4.4. Mise en perspective des valeurs d'EROEI

Pour clôturer l'analyse de notre cas d'étude, nous avons finalement voulu mettre les valeurs d'EROEI déterminées en perspective d'une relation intéressante à considérer, à savoir la relation qui lie l'EROEI à l'énergie nette et que l'on appelle « Net Energy Cliff » (cf. section 2.1). Ainsi, nous avons placé sur le graphique déjà présenté en **Figure 2** les valeurs d'EROEI_{PE-eq} suivantes issues de notre étude :

- L'EROEI_{PE-eq} « actuel » déterminé sur base des conditions « recommandées »
- L'EROEI_{PE-eq} « projeté » déterminé sur base des conditions « projetées »
- L'EROEI_{PE-eq} « extrême min » (l'extrême max n'a pas été repris car il aurait fait augmenter démesurément l'échelle de l'axe x)
- Les EROEI_{PE-eq} min et max issus de notre analyse de sensibilité univariée et correspondant respectivement aux valeurs max et min du paramètre $E_{inv\ PE-eq}$

Le graphique qui en résulte est présenté à la Figure 7. On y constate que les valeurs d'EROEI_{PE-eq} « actuelles », « projetées » et correspondant à $E_{inv\ PE-eq}$ min sont sur la partie « safe » du graphique, où une variation de la valeur d'EROEI n'entraîne qu'une variation faible de l'énergie nette. Par contre, la valeur correspondant à $E_{inv\ PE-eq}$ max et la valeur extrême min se trouvent sur la partie « critique » du

graphique où des variations relativement faibles de la valeur d'EROEI entraîne de fortes variations de l'énergie nette.

L'on peut donc estimer sur base de ces observations que la technologie PV pc-Si actuelle (point « actuel » sur le graphique) est devenue une alternative énergétique tout à fait valable et sera amenée à être de plus en plus performante en termes d'énergie nette (point « projeté »). L'on peut, par contre, aussi constater qu'il peut se révéler aisé de présenter la technologie comme non suffisamment « rentable » énergétiquement, simplement en optant pour des valeurs de paramètres moins favorables (en utilisant par exemple des données obsolètes), ce qui s'observe dans certaines études.

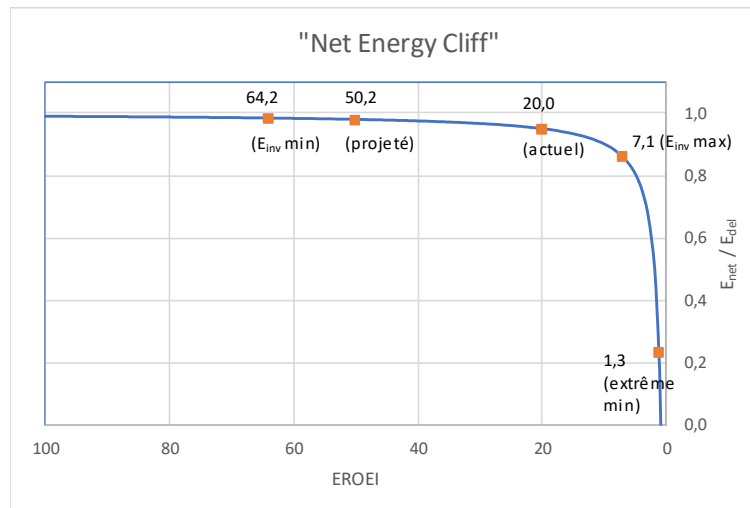


Figure 7 : Positionnement des valeurs d'EROEI déterminées sur le « Net Energy Cliff »

En termes de mise en perspective, ajoutons encore qu'il peut être intéressant également de placer l'EROEI déterminé pour un système énergétique spécifique en regard de l'EROEI global du mix énergétique actuel dans lequel ce système s'intègre. En effet, si la valeur d'EROEI déterminée pour le système considéré se situe sous la valeur déterminée pour le mix global, il est nécessaire d'en être conscient lorsqu'on envisage un plus grand déploiement du système considéré. En effet, ce déploiement va faire chuter progressivement l'EROEI du mix global et il se pourrait que l'énergie nette résultante finisse par devenir insuffisante pour maintenir le niveau d'activité de l'économie associée à ce mix. Un exemple d'un tel comparatif a été réalisé par Raugé et Leccisi (2016), qui ont comparé les EROEI déterminés pour les différentes technologies de génération électrique existantes au Royaume-Uni avec l'EROEI déterminé pour le réseau global de ce pays. Nous n'aborderons toutefois pas ce type d'analyse ici et la laissons donc comme une question ouverte intéressante.

4.3. Conclusions du chapitre

Nous avons choisi la technologie PV, qui se déploie fortement actuellement, comme un cas d'étude pour analyser l'impact des différentes considérations sur l'EROEI que nous avons abordées au chapitre 3. Ces considérations étaient de type méthodologique d'une part, et relatives aux données utilisées d'autre part.

Ainsi, nous avons premièrement étudié l'impact sur les valeurs d'EROEI des facteurs de pondération pris en compte pour les différentes formes d'énergie exprimées au numérateur et dénominateur de

l'indicateur. Nous avons pu observer, dans cet exercice, que la gamme de valeurs sur laquelle s'étendent les différentes expressions d'EROEI est large, ainsi que l'on pouvait s'y attendre. Ceci nous a permis d'illustrer pratiquement l'importance d'être transparent sur la méthodologie appliquée lorsque l'on exprime des valeurs d'EROEI.

Par ailleurs, l'analyse de sensibilité de l'EROEI aux valeurs des différents paramètres, que nous avons réalisée dans un deuxième temps, nous a montré une variabilité de l'EROEI plus grande encore. La variabilité observée de l'EROEI_{P-E-eg} de notre système PV s'est révélée la plus importante pour les paramètres d'énergie incorporée et d'insolation. Ceci illustre de manière pratique l'importance des données prises en compte. Il convient d'être cohérent et d'utiliser des valeurs de paramètres en ligne avec le système et contexte précis étudié mais également d'être transparent dans la manière dont ces valeurs sont rapportées, ce qui n'était clairement pas toujours le cas dans les études que nous avons inventoriées pour établir les conditions de notre analyse.

En conclusion générale, nous pouvons donc dire que notre cas d'étude illustre parfaitement la nécessité de prendre en compte les recommandations indiquées en conclusion du chapitre 3 et l'importance de faire preuve d'une cohérence et transparence parfaites dans toute analyse d'EROEI qui est entreprise.

5. Réflexions complémentaires

Après avoir longuement développé et illustré les écueils qui sont rencontrés dans les analyses d'EROEI, écueils qui, s'ils ne sont pas correctement appréhendés, peuvent malheureusement venir entacher l'intérêt pourtant évident de cet indicateur, nous voudrions adopter, dans le présent chapitre, une perspective un peu plus large. Ainsi, nous développons quelques considérations sur l'EROEI en tant qu'indicateur de la durabilité de nos systèmes énergétiques et quelques réflexions sur la transition énergétique et son impact sur un EROEI global.

5.1. EROEI comme indicateur de la durabilité de systèmes énergétiques

Il apparaît évident, comme nous l'avons exposé au chapitre 2, que l'énergie nette qu'un système énergétique est en mesure de délivrer constitue un élément majeur pour évaluer la durabilité de ce système. En effet, si un système requiert plus d'énergie qu'il n'est en mesure d'en fournir lui-même, ce système sera difficilement viable comme composante d'un mix énergétique. Toutefois, l'énergie nette, en tant que telle, est loin d'être un facteur suffisant lorsque l'on veut vraiment établir la « soutenabilité » globale d'un système énergétique. Ainsi, nous avons vu que les énergies fossiles sont capables de fournir une importante énergie nette (même s'il est vrai que leurs valeurs d'EROEI sont malgré tout en déclin actuellement) ; or, on peut difficilement dire que ces sources d'énergie soient les plus soutenables environnementalement...

Il faut être conscient qu'en réalité l'EROEI est, de par sa définition, aveugle à 2 éléments fondamentaux : la quantité totale d'énergie primaire qui doit être extraite de l'environnement pour fournir l'énergie obtenue considérée ; et aussi quelle est la part de cette énergie primaire qui provient de sources non-renouvelables. D'autres indicateurs, par contre, existent, qui peuvent appréhender ces 2 éléments. L'un de ceux-ci, fréquemment utilisé dans les analyses LCA est le nr-CED (pour non-renewable Cumulative Energy Demand). Celui-ci exprime la quantité totale d'énergie primaire de sources non-renouvelables extraites de l'environnement par unité fonctionnelle étudiée, ici donc par kWh ou MJ d'énergie produite.

Ainsi, Raugei et Leccisi (2016) et Raugei *et al.* (2018a et b) combinent de manière intéressante l'utilisation de chacun des 2 indicateurs EROEI et nr-CED dans leurs études de systèmes énergétiques au Royaume-Uni et au Chili. Ils envisagent l'EROEI, déterminé par l'analyse NEA, comme un indicateur des impacts énergétiques « court-terme » et le nr-CED, déterminé par l'analyse LCA, comme un indicateur des impacts énergétiques « long-terme ». Raugei *et al.* (2016) présentent, concernant cette différence et complémentarité des deux indicateurs, une analogie intéressante : ils envisagent un système constitué d'un prédateur et de sa proie. L'interaction prédateur-proie ne permet un gain net d'énergie que si l'énergie obtenue en mangeant la proie est supérieure à l'énergie dépensée par le prédateur pour chasser et tuer cette proie. Toutefois, si le prédateur est un chasseur vraiment efficace (c'est-à-dire que l'énergie qu'il investit dans la chasse est bien plus faible que l'énergie qu'il obtient de sa proie = EROEI élevé) mais que les proies finissent par s'éteindre au bout d'une saison, alors une telle efficacité de chasse n'est d'aucune aide à la survie à long terme du prédateur. Par ailleurs, une espèce de prédateur différente qui chasserait de manière moins efficace (c'est-à-dire en dépensant davantage d'énergie par unité d'énergie obtenue de sa proie = EROEI plus faible) pourrait permettre à la population de ses proies d'être aussi plus résiliente et éviter son effondrement (ces proies seraient pour ainsi dire une ressource renouvelable pour le prédateur). Ainsi, alors que, sur le court terme, le prédateur le plus efficace peut apparaître triompher, sur le long terme, la stratégie de chasse du

second prédateur est plus durable (« soutenable »). Il y a donc, pour le système prédateur-proie, comme pour nos sociétés énergétiques, une sorte de choix à faire entre « une vie courte dans la prospérité » (en favorisant des systèmes aux EROEI élevés basés sur des sources énergétiques non-renouvelables) et « une vie longue dans la suffisance » (basée sur des systèmes énergétiques caractérisées par un nr-CED faible).

D'un point de vue énergétique donc, l'EROEI s'avère déjà ne pas être un indicateur suffisant pour apprécier la soutenabilité d'un système de production d'énergie. Mais, en outre, il est important d'avoir à l'esprit également que la soutenabilité purement énergétique d'un système est loin d'être le seul élément à prendre en compte. Le tableau de la soutenabilité globale se brosse, en effet, sur un cadre bien plus large. Les impacts environnementaux à considérer s'étalent ainsi sur différentes autres catégories que les seules ressources énergétiques (pollution de l'air, de l'eau, épuisement des ressources non-énergétiques (ex : métaux et métaux rares), ...). Les analyses LCA notamment permettent d'appréhender ces impacts au travers de différents indicateurs spécifiques. Enfin, outre les aspects environnementaux, il est aussi utile de mentionner que des facteurs de natures économique et/ou sociale interviennent également dans l'image globale de la soutenabilité.

Ainsi, pris isolément, l'EROEI apparaît être un indicateur assez restreint de la soutenabilité à long terme d'un système énergétique (Raugei *et al.*, 2012). Dès lors, il convient de ne pas baser les décisions en matière de politiques énergétiques sur ce seul indicateur mais de prendre en considération une vision globale de soutenabilité qui peut être donnée par un ensemble combiné de différents indicateurs.

5.2. EROEI dans les scénarios de transition énergétique

Sur le volet spécifiquement énergétique appréhendé par l'EROEI, il est encore d'autres réflexions intéressantes à développer, dans un cadre plus large que celui adopté au chapitre précédent et dont certains éléments ont déjà été effleurés au chapitre 3. Ce cadre consiste à évaluer des systèmes entiers à l'échelle de régions ou de pays et selon une vision plus dynamique et prospective, tel que dans la définition de stratégies de transition énergétique.

Trainer (2018) et Dupont *et al.* (2018) ont relevé que la littérature scientifique regorge d'analyses statiques d'EROEI de technologies énergétiques individuelles mais qu'*a contrario*, très peu d'études considèrent l'évaluation dynamique d'un EROEI pour un système entier qui serait en transition vers une part importante, voire exclusive, d'énergie de sources renouvelables, comme projeté dans les scénarios de réduction de nos impacts climatiques. Ils mentionnent que seulement quelques auteurs s'y sont déjà employés, tels Moriarty et Honnery (2012 et 2016). Depuis tout récemment, toutefois, il semble que ce type d'études commence à émerger plus distinctement (ex : Rye et Jackson, 2018 ; Limpens et Jeanmart, 2018 ; Raugei *et al.*, 2018a et b). On peut noter que jusque-là, quelques études s'étaient déjà voulu défendre la faisabilité de scénarios atteignant jusqu'à 100% d'ER (ex : Jacobson et Delucchi, 2011) mais présentaient le défaut d'avoir négligé dans leurs scénarios les impacts relatifs à l'énergie nette et n'avoir pas étudié le facteur fondamental qu'est l'EROEI, ainsi que critiqué notamment par Trainer (2013).

Comme nous l'avons brièvement abordé en section 3.2.2, de nombreux éléments sont amenés à affecter l'EROEI dans le contexte d'une transition énergétique vers les ER.

Le premier est l'intermittence associée aux sources d'énergie renouvelables de flux. La nécessité de gérer celle-ci entraîne des mesures qui vont impacter à la fois l'énergie investie (dénominateur) et l'énergie délivrée (numérateur), faisant chuter l'EROEI, même si d'éventuelles actions relatives à une

meilleure mise en adéquation de la demande avec l'offre peuvent être prises au préalable. Ces mesures incluent : l'investissement dans le développement des réseaux de manière à interconnecter le plus grand nombre possible des équipements ER décentralisés ; le développement d'une surcapacité de systèmes ER pour pallier la faible disponibilité de la ressource lorsque les conditions météorologiques sont défavorables mais inutilisée lorsque les conditions sont favorables (bridage de la production) ; la mise en place d'unités de stockage de l'énergie (batteries, pompage hydraulique, ...). Il y aura vraisemblablement un optimum de « rentabilité énergétique » à trouver dans la pondération entre ces différentes mesures. Dans ce contexte, des analyses dynamiques prospectives d'EROEI systémique peuvent intervenir de manière très intéressante pour orienter les choix à réaliser. Un exemple de ce type d'analyse a été présenté par Limpens et Jeanmart (2018) : ces auteurs ont déterminé les parts optimales de stockage et de surcapacité des ER (éolien et PV) selon un modèle de maximisation de la valeur de l'EROEI global dans différents scénarios de transition envisagés pour le réseau électrique belge

Un deuxième élément qui impactera l'EROEI a trait aux sites dans lesquels sont exploitées les sources d'énergie renouvelable. Il est évident que les systèmes de génération d'énergie à base de sources renouvelables (comme, par exemple, les éoliennes) seront prioritairement installés dans les sites les plus favorables, c'est-à-dire les sites où la ressource primaire est la plus abondante et de la meilleure qualité et/ou les sites les plus aisément accessibles et qui sont les plus proches des utilisateurs finaux de l'énergie produite (Dupont *et al.*, 2018). L'on peut prendre l'exemple des éoliennes : celles-ci seront installées en priorité là où les vents ont une vitesse moyenne élevée et sont réguliers mais également sur les sites les plus faciles d'accès (terrain, distance, infrastructure disponible). Cependant, à mesure que ces sites optimaux seront occupés, des sites de moins en moins favorables devront être utilisés, si l'on veut continuer le déploiement des éoliennes. Le premier facteur, relatif à la qualité du vent, aura donc un impact sur le numérateur de l'EROEI en diminuant les taux de charge des éoliennes ; le deuxième facteur, relatif à l'accessibilité du site, aura, quant à lui, un impact sur le dénominateur de l'EROEI en faisant augmenter l'énergie qui doit être investie. Ce type d'évolution de l'EROEI pour l'éolien a notamment été étudié par Dupont *et al.* (2017).

A ces éléments, l'on peut encore ajouter d'autres impacts comme celui de l'épuisement des ressources non-énergétiques nécessaires à la construction des systèmes ER. En effet, l'intensité en métaux et métaux rares des équipements énergétiques renouvelables, comme l'éolien et le PV, est plus élevée que celle des systèmes de génération électrique thermiques (Fizaine et Court, 2015). Cet épuisement progressif des ressources avec l'augmentation de l'échelle de déploiement des ER mène à la nécessité d'exploiter des gisements de teneurs de plus en plus faibles et donc à une augmentation continue de l'énergie nécessaire à l'extraction. Il s'installe alors une sorte de cercle vicieux entre le secteur de production des métaux et celui de production de l'énergie (Fizaine et Court, 2015 ; Fagnart et Germain, 2017) : la raréfaction des métaux et la diminution de la teneur des minerais rend les métaux plus difficiles à extraire, ce qui requiert donc davantage d'énergie, mais la production de davantage de cette énergie nécessite, elle aussi, davantage d'équipements et de métaux, qui eux-mêmes requièrent davantage d'énergie, et ainsi de suite... L'énergie investie au dénominateur de l'EROEI ne cesse ainsi de croître.

Moriarty et Honnery (2012) relèvent encore l'impact probable des modifications climatiques en cours sur le potentiel des ER (pour l'éolien, diminution de la vitesse des vents sous l'effet de la réduction des gradients de température ; pour le PV, augmentation de la couverture nuageuse et augmentation de la température qui réduisent la performance ; pour l'hydraulique, modifications des régimes hydriques). Certains auteurs indiquent également que le déploiement à grande échelle des ER pourrait lui-même être à l'origine de modifications climatiques. Ainsi, Dupont *et al.* (2017) indiquent que les

vitesses globales des vents pourraient être réduites si une quantité significative de l'énergie des vents est extraite.

En conclusion, l'ensemble de tous les facteurs interagissant dans la détermination des quantités d'énergie nette qui pourront être obtenues dans les scénarios de transition énergétique démontre la nécessité de pouvoir appréhender l'EROEI d'une manière dynamique et systémique. Les modèles qui sont à développer pour ce faire sont très complexes et requièrent un travail considérable, mais ils présentent, ainsi que le soulignent Rye et Jackson (2018), un intérêt certain dans les discussions et politiques liées à notre futur énergétique.

Peut-être par cette appréhension plus précise des valeurs d'un EROEI systémique des scénarios de transition serons-nous aussi amenés à prendre conscience de manière plus pressante de la nécessité de réduire nos consommations énergétiques (éventuellement par des changements radicaux de notre système socio-économique), si nous voulons que cette transition puisse se faire et de manière soutenable... C'est en tout cas ce que nous croyons.

6. Conclusion

L'énergie nette constitue la vraie « valeur » de l'énergie pour notre société. Dès lors, dans le cadre de l'épuisement progressif de nos ressources énergétiques fossiles et de la nécessité qui s'impose d'une transition vers des sources d'énergie plus propre et plus durable, la quantification de l'énergie nette que peuvent délivrer les alternatives énergétiques apparaît fondamentale.

Un indicateur se présente comme particulièrement pertinent pour appréhender cela ; il s'agit de l'EROEI. Défini comme le rapport de l'énergie délivrée sur l'énergie investie, il permet d'évaluer la viabilité de solutions énergétiques, de comparer entre elles différentes alternatives mais aussi d'approcher une estimation de l'énergie nette disponible à l'échelle sociétale. Ce dernier point présente un grand intérêt, étant donné qu'une diminution importante de l'énergie nette à l'échelle globale pourrait avoir des impacts majeurs sur nos sociétés et la poursuite de leur développement.

Toutefois, malgré l'intérêt évident que présente un indicateur comme l'EROEI, de nombreuses difficultés sont rencontrées dans la mise en pratique de celui-ci lors de l'évaluation concrète de systèmes énergétiques. Nous avons dès lors fait l'inventaire des principales de ces difficultés et les avons analysées en détails. Celles-ci ont trait à des problématiques à la fois d'ordre conceptuel et relatives aux données utilisées. Ainsi, du point de vue de la conception de l'indicateur, nous relevons des difficultés sur les points suivants : définition des limites du système, choix de la méthode de conversion des formes d'énergie et prise en compte de l'aspect temporel. Concernant les données utilisées, c'est l'origine et la manipulation de celles-ci ainsi que leur variabilité temporelle et en fonction du contexte qui peuvent constituer une importante source de confusion.

Après l'analyse détaillée de ces nombreux écueils rencontrés dans les analyses d'EROEI, nous en avons tiré les recommandations suivantes, relatives à chacun de ceux-ci :

a) Conception de l'indicateur

- Limites du système : l'étape de la chaîne énergétique considérée doit être clairement définie et alignée pour la détermination du numérateur et du dénominateur de l'EROEI ; pour le numérateur, la manière dont sont pris en compte les co-produits éventuels et l'expression de l'énergie délivrée, en termes bruts ou nets, doivent être claires ; pour le dénominateur, l'étendue des coûts énergétiques pris en considération (directs et indirects) doit être aussi exhaustive que possible et cohérente avec le but et l'échelle de l'analyse.
- Formes d'énergie : la méthode de correction appliquée pour pouvoir agréger les différentes formes d'énergie doit être judicieusement choisie et être clairement explicitée. En outre, il faudra particulièrement veiller à ne jamais comparer des valeurs d'EROEI déterminées selon différentes méthodes de correction.
- Aspect temporel : un choix entre un indicateur EROEI intégratif sur la durée de vie du système ou un indicateur PROPI dynamique basé sur les flux énergétiques doit être réalisé et être également en ligne avec l'objectif et l'échelle de l'étude.

b) Données utilisées

Il convient d'être attentif à l'origine des données et à la manipulation qui en est faite et d'être transparent sur celles-ci. Il est également nécessaire de les choisir de manière cohérente par rapport au contexte, notamment temporel, de l'étude.

La nécessité de cohérence et de transparence résume ainsi en deux mots toutes nos recommandations.

Après cette analyse théorique, le cas d'étude appliqué au photovoltaïque, que nous avons exploité, a permis d'illustrer les éléments précédemment mis en évidence. Il a montré l'importante sensibilité de l'EROEI aux choix conceptuels réalisés et aux valeurs de paramètres utilisées. Plus spécifiquement, pour le PV, il a révélé l'impact important qu'ont l'énergie incorporée et l'insolation sur les valeurs d'EROEI déterminées. Accessoirement, nous avons aussi pu montrer la désormais très bonne viabilité de la technologie PV en tant que fournisseur d'énergie nette.

Nos réflexions additionnelles sur une perspective plus large de l'EROEI nous ont encore permis de faire apparaître que ce seul indicateur n'est pas suffisant pour évaluer la durabilité de systèmes de production d'énergie, ni en termes énergétiques, ni certainement en termes environnementaux. L'EROEI peut cependant constituer un outil puissant pour l'évaluation de la performance énergétique des scénarios de transition, si toutefois des modèles adéquats et complexes d'évaluation dynamique et systémique sont utilisés.

En conclusion générale, nous affirmons que l'EROEI constitue un indicateur fondamental à considérer dans l'analyse de la durabilité énergétique des systèmes de production d'énergie. Toutefois, nous insistons qu'il doit être utilisé avec la plus grande circonspection et toute la transparence indispensables à des analyses pertinentes et objectives des alternatives énergétiques et scénarios de transition. En outre, nous soulignons également qu'il n'est pas le seul indicateur à devoir être pris en compte, si l'on veut construire des politiques énergétiques qui soient véritablement « soutenables ».

Annexe : Données issues de la revue de littérature pour le cas d'étude PV

| Etude | Système ^o | Etapes du cycle de vie considérées | E _{inv,PE-eq} (MJ _{pe} /m ²) ¹ | Performance système | | | T (an) | Localisation système | Insolation (kWh/m ² *an) | η _{grid} | EROEI _{PE-eq} ² | EPBT | EROEI _{PE-eq} recalculé ³ | Remarques |
|--|---|-------------------------------------|--|---------------------------------|--|-----------|---------|--|---|---|-------------------------------------|-------------------------------|---|--|
| | | | | η _{mod} | PR | DR (%/an) | | | | | | | | |
| Guidelines IEA, 2016 | Système spécifique à préciser | Cradle-to-grave | A déterminer en fonction de LCI détaillé | Spécifique au système considéré | Sur lifetime: 0,75 (roof-top) 0,80 (ground) | 0,7 | 30 | A préciser | Selon localisation et conditions (Standard IEC 61724) | Selon mix spécifique dépendant de la localisation | N/A | N/A | N/A | - |
| Ito et al, 2011 | Ground-mounted | Cradle-to-grave | 2737* | 0,139 | - | 0,5 | 30 | Japon | 1725 | - | 11,5 - 13,6 | 2,2 - 2,6 | 23,7* | * Info énergie incorporée uniquement disponible clairement pour le panneau. Explique valeur plus élevée de l'EROEI recalculé |
| Laleman et al, 2011 | Roof-top | Non précisé | 4600* | 0,13 | 0,75 | - | 25-30 | Eur N | 950 | 0,35 | 7,0 | 4,3* | 6,2 | * valeurs approximatives extraites des graphiques de l'article |
| Cucchiella et D'Adamo, 2012 | Roof-top (module 200 W _c) | Cradle-to-grave | 4518 | 0,13 | 0,85 | - | 20 | Italie N Centr. S | 1535* 1677* 1802* | 0,4 | 6,4 7,0 7,6 | 2,9 2,7 2,5 | 6,8 7,4 7,9 | * valeurs d'insolation originales sur surface horizontale corrigées par le facteur 1,11 qui est donné pour l'angle d'inclinaison de 30° considéré |
| Raugei et al, 2012 | Tous syst. confondus | Cradle-to-grave | 3057 | 0,13 | 0,75 (sur lifetime) | - | 30 | Europe du S | 1700 | 0,31 | 19 | 1,6 | 18,9 | - |
| de Witld-Scholten, 2013 (données systèmes commerciaux 2011) | Roof-top (module 240 W _c) | Cradle-to-gate | 2228 (Eur) 2665 (Chine) | 0,141 | 0,77 | 0,6 | 30 | - | 1700 | 0,32 | 24,2 (Eur) 20,5 (Chine) | 1,24 (Eur) 1,46 (Chine) | 28,0 23,4 | - |
| Lundin, 2013 | Roof-top | Cradle-to-gate (limited boundaries) | 3011 | 0,136 | 0,86 | 0,5 | 30 | - | 1700 (700-2700) | 0,32 | 20,3 | 6,3 | 22,3 | - |
| Yue et al, 2014 | Panneau uniqt (module 210 W _c) | Cradle-to-grave | 3000 (Eur)* 4550 (Chine)* | 0,132 | 0,75 | - | 30 | Eur S | 1700 | 0,31 | 18,8 (Eur) 13,0 (Chine) | 1,6 (Eur) 2,3 (Chine) | 19,5 12,9 | * valeurs approximatives extraites des graphiques de l'article |
| Bhandari et al, 2015 (meta-analyse et harmonisation data sur études 2000-2013) | Tous syst. confondus | Cradle-to-gate | [1008 - 9101] [2200 - 6600]* | 0,123 (sur lifetime) | 0,75 (Rmq : peut atteindre 0,90) | 0,5 | 30 | N/A | 1700 | 0,35 | 8,7 - 34,2** (moy harm.) | 1,0 - 4,1** (moy harm.) | [5,3 - 48,0] [7,3 - 22,0]* | Paramètres repris = paramètres tels qu'harmonisés Valeurs entre [] = min-max sur l'ensemble des études * en excluant les 3 références extrêmes ** Fourchettes EROI et EPBT pour mc-Si, pc-Si, a-Si, CdTe, CIGS confondus |
| Fu et al, 2015 | Panneau uniqt (module 200W _c) | Cradle-to-gate | 2018 | 0,16 | 0,75 | - | 25 | Chine (5 régions) | 772 - 2100 | - | (4,1 - 11,3)* 13,7 - 37,7 | (2,22 - 6,05)* 0,67 - 1,82 | 13,8 - 37,5 | * Valeurs originales d'EBPT calculées sans conversion de l'électricité produite en termes d'énergie primaire, alors que l'énergie investie l'est => valeurs corrigées en considérant un facteur 0,3 entre énergie primaire et électricité |
| Wetzel et Borchers, 2015 (données systèmes commerciaux de producteurs européens) | Panneau uniqt (module 243 W _c) | Cradle-to-gate | 1524* | 0,152 | 0,75 | 0,5 - 1 | 20 - 30 | Eur S | 1700 | 0,311 | 32,3** | 0,93** | 29,4** | * valeur approximative extraite du graphique de l'article ** valeurs calculées pour T=20 ans |
| Hou et al., 2016 | Ground-mounted? | Cradle-to-gate | 3453 | 0,16 | 0,75 | - | 25 | Chine | 1600 | - | 15,8 | 1,6 | 16,7 | - |
| Ito et al, 2016 | Ground-mounted (module 240 W _c) | Cradle-to-grave | 3072* | 0,15 | 0,84 0,81 (sur lifetime) | 0,9 | 30 | France Maroc | 1737 2344 | - | 16,7 20,0 | 1,8 1,5 | 25,6* 33,4* | * Info énergie incorporée uniquement disponible clairement pour le panneau. Explique valeur plus élevée de l'EROEI recalculé |
| Leccisi et al, 2016 | Ground-mounted | EOL pas inclus | 3120* | 0,156 | 0,8 | - | 30 | Eur Centr. N Eur Centr. S US S-O | 1000 1700 2300 | 0,3 | 14,3 25,0 33,3 | 2,1 1,2 0,9 | 14,4 24,5 33,1 | * valeur approximative extraite du graphique de l'article |
| Koppelaar, 2017 (meta-analyse et harmonisation data sur études 2000-2016 + analyse sensibilité) | Tous syst. confondus | Cradle-to-grave | (1000 - 2600) | - | 0,8 | 0,7 | 25 | N/A | 1700 (700-2600) | - | 9,3 (moy harm.) | 2,9 (moy harm.) | N/D | Paramètres repris = paramètres tels qu'harmonisés Valeurs entre () = valeurs utilisées pour analyse de sensibilité |
| Wu et al., 2017 | Ground-mounted (module 270 W _c) | Cradle-to-gate (+ installation) | 2927 | 0,175 | 0,835 | - | 30 | Désert de Gobi | 2017 | - | (13,0)* 42,9 | (2,3)* 0,7 | 36,3 | * Valeur originale d'EBPT calculée sans conversion de l'électricité produite en termes d'énergie primaire, alors que l'énergie investie l'est => valeur corrigée en considérant un facteur 0,3 entre énergie primaire et électricité |
| Gazbour et al, 2018 (étude de la variabilité des paramètres utilisés dans 30 études LCA entre 2005 et 2016 -> recommandation de paramètres actualisés) | Panneau uniqt (module 265 W _c) | Cradle-to-grave | Recommandations sur quels sont les process actuels à considérer pour les différentes étapes + infos sur mix électriques à considérer | 0,163 | 0,818 | 0,91 | 30 | - | 1425 (moy Eur) | - | N/A | N/A | N/A | Paramètres repris = paramètres actualisés recommandés |
| Mann et al, 2014 (projection technologie 2020) ⁴ | Panneau uniqt | Cradle-to-gate | 1500 | 0,21 | 0,9 | - | 35 | Eur S | 1700 | 0,315 | ~70 | ~0,5 | 90,0 | - |

^o Systèmes pc-Si classiques, sans tracking system

¹ Certaines valeurs ont été modifiées par rapport à l'étude originale pour les ramener en unités communes de MJ_{pe}/m². Celles-ci apparaissent en italique.

² Les valeurs en italique ne figurent pas dans l'article original; elles ont été calculées par l'équation : EPBT = T / EROEI_{PE-eq}

³ Valeurs par défaut utilisées dans le calcul quand données manquantes: PR=0,75; η_{grid}=0,3

DR non pris en compte pour les calculs, considéré intégré dans PR

⁴ Données non-incluses pour les calculs des valeurs min, max, moyenne et médiane

Bibliographie

- Arvesen, A., Hertwich, E. G. (2015) More caution is needed when using life cycle assessment to determine energy return on investment (EROI). *Energy Policy*, 76(C), 1-6.
- Bhandari, K. P., Collier, J. M., Ellingson, R. J., Apul, D. S. (2015) Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47(C), 133-141.
- 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. (2013) Calculating systems-scale energy efficiency and net energy returns: A bottom-up matrix-based approach. *Energy*, 62, 235-247.
- Brandt, A. R. (2017) How Does Energy Resource Depletion Affect Prosperity? Mathematics of a Minimum Energy Return on Investment (EROI). *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 2(1), 1-12.
- Carbajales-Dale, M., Raugei, M., Fthenakis, V., Barnhart, C. J. (2015) Energy Return on Investment (EROI) of Solar PV: An Attempt at Reconciliation. *Proceedings of the IEEE*, 103 (7), 995-999
- Chen, Y., Feng, L., Wang, J., Höök, M. (2017) Energy-based energy return on investment method for evaluating energy exploitation. *Energy*, 128, 540-549.
- Cleveland, C.J., Costanza, R., Hall, C.A.S., Kaufmann, R. (1984) Energy and the United States economy: a biophysical perspective. *Science* 225, 890-897 [CrossRef]
- Connaissance des Energies (2017) Solaire photovoltaïque. Dans Connaissance des Energies – Energies renouvelables – Fiches pédagogiques. Récupéré le 28/12/2018 de <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>
- Court, V., Fizaine, F. (2017) Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. *Ecological Economics*, 138, 145-159.
- Cucchiella, F., D’Adamo, I. (2012) Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5245-5259.
- Dale, M., Benson, S. (2013). Energy balance of the global photovoltaic (PV) industry--is the PV industry a net electricity producer? *Environmental Science & Technology*, 47(7), 3482-3489.
- Dale, M., Krumdieck, S., Bodger, P. (2012) Global energy modelling - a biophysical approach (gemba) part 1: An overview of biophysical economics. *Ecological Economics*, 73(C), 152-157.
- de Wild-Scholten, M. (2013). Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, 296-305.
- Dupont, E., Jeanmart, H., Possoz, L. (2017) Vers un monde 100% renouvelable ? *Regards économiques*, 135, 5-16
- Dupont, E., Koppelaar, R., Jeanmart, H. (2018). Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints. *Applied Energy*, 209, 322-338.
- Eurostat (2018) Electricity prices for non-household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). Récupéré le 02/01/2019 de http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_pc_205&lang=en
- Fagnart, J.-F., Germain, M. (2016) Net energy ratio, EROEI and the macroeconomy. *Structural Change and Economic Dynamics*, 37(C), 121-126.
- Fagnart, J.-F., Germain, M. (2017) Transition énergétique et croissance économique : la transition peut-elle s’opérer en douceur ? *Regards économiques*, 135, 17-23
- Fédération Pétrolière Belge (2019) Décomposition prix maximums actuels. Dans FPB – Prix maximums – Décomposition. Récupéré le 02/01/2019 de

<https://www.petrofed.be/fr/prix-maximums/d%C3%A9composition-prix-maximums-actuels>

Fizaine, F., Court, V. (2015) Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI. *Ecological Economics*, 110(C), 106-118.

Fizaine, F., Court, V. (2016) Energy expenditure, economic growth and the minimum EROI of society. *Energy Policy*, 95, 172-186.

Frischknecht, R., Wyss, F., Büsser Knöpfel, S., Lützkendorf, T., Balouktsi, M. (2015). Cumulative energy demand in LCA: The energy harvested approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(7), 957-969.

Frischknecht, R., Heath, G., Raugei, M., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Fthenakis, V., Kim, H. C., Alsema E., Held, M. (2016) *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, 3rd edition* (Report IEA-PVPS T12-08:2016). International Energy Agency (IEA)

Fu, Y., Liu, X., Yuan, Z. (2015) Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *Journal of Cleaner Production*, 86(C), 180-190.

Gazbour, N., Razongles, G., Monnier, E., Joanny, M., Charbuillet, C., Burgun, F., Schaeffer, C. (2018) A path to reduce variability of the environmental footprint results of photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1607-1618.

Hall, C. A. S. (1972) Migration and Metabolism in a Temperature Stream Ecosystem. *Ecology*, 53, 585–604. [CrossRef]

Hall, C. A. S., Cleveland C. J., Kaufmann R. (1986) *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*. New York: Wiley. [CrossRef]

Hall, C. A. S., Balogh, S., Murphy, D. J. (2009) What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies*, 2(1), 25-47.

Hall, C. A. S., Dale, B. E., Pimentel, D. (2011) Seeking to Understand the Reasons for Different Energy Return on Investment (EROI) Estimates for Biofuels. *Sustainability*, 3(12), 2413-2432.

Hall, C. A. S., Lambert J. G., Balogh, S. (2014) EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64(C), 141-152.

Hall, C. A. S. (2017a) Will EROI be the Primary Determinant of Our Economic Future? The View of the Natural Scientist versus the Economist. *Joule*, 1(4), 635-638.

Hall, C. A. S. (2017b) *Energy Return on Investment - A Unifying Principle for Biology, Economics, and Sustainability*. New York: Springer

Henshaw, P. F., King, C., Zarnikau, J. (2011) System Energy Assessment (SEA), Defining a Standard Measure of EROI for Energy Businesses as Whole Systems. *Sustainability*, 3(10), 1908-1943.

Hou, G., Sun, H., Jiang, Z., Pan, Z., Wang, Y., Zhang, X., Zhao, Y., Yao, Q. (2016). Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. *Applied Energy*, 164, 882-890.

Huart, M. (2018) Sources d'énergie renouvelables. Dans ENVI-F529 – Gestion des Ressources et de l'Énergie – Année académique 2017-2018 [Support de cours]. Université Libre de Bruxelles

Ito, M., Kudo, M., Nagura, M., Kurokawa, K. (2011) A comparative study on life cycle analysis of 20 different PV modules installed at the Hokuto mega-solar plant. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(7), 878-886.

Ito, M., Lespinats, S., Merten, J., Malbranche, P., Kurokawa, K. (2016) Life cycle assessment and cost analysis of very large-scale PV systems and suitable locations in the world. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 24(2), 159-174.

King, C., Maxwell, J., Donovan, A. (2015) Comparing World Economic and Net Energy Metrics, Part 1: Single Technology and Commodity Perspective. *Energies*, 8(11), 12949-12974. [CrossRef]

Kis, Z., Pandya, N., Koppelaar, R. (2018) Electricity generation technologies: Comparison of materials use, energy return on investment, jobs creation and CO2 emissions reduction. *Energy Policy*, 120, 144-157.

- Koppelaar, R. (2017). Solar-PV energy payback and net energy: Meta-assessment of study quality, reproducibility, and results harmonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1241-1255.
- Laleman, R., Albrecht, J., Dewulf, J. (2011) Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 267-281.
- Leccisi, E., Raugei, M., Fthenakis, V. (2016) The Energy and Environmental Performance of Ground-Mounted Photovoltaic Systems-A Timely Update. *Energies*, 9(8), 622.
- Lambert, J. G., Hall, C. A. S., Balogh, S., Gupta, A., Arnold M. (2014) Energy, EROI and quality of life. *Energy Policy*, 64(C), 153–167.
- Limpens, G., Jeanmart, H. (2018) Electricity storage needs for the energy transition: An EROI based analysis illustrated by the case of Belgium. *Energy*, 152, 960-973.
- Lundin, (2013) *EROI of crystalline silicon photovoltaics: Variations under different assumptions regarding manufacturing energy inputs and energy output* (Thèse) Uppsala universitet, Teknisk- naturvetenskaplig fakultet UTH-enheten.
- Mann, S., de Wild-Scholten, M., Fthenakis, V., Sark, W., Sinke, W. (2014). The energy payback time of advanced crystalline silicon PV modules in 2020: A prospective study. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(11), 1180-1194.
- Miquel, C. (2009) *Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental*. HESPUL Energies Renouvelables et Efficacité Energétique
- Moriarty, P., Honnery, D. (2011) What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 244-252.
- Moriarty, P., Honnery, D. (2016) Can renewable energy power the future? *Energy Policy*, 93, 3-7.
- Mulder, K., Hagens, N. (2008) Energy return on investment: Toward a consistent framework. *Ambio*, 37(2), 74-79.
- Murphy, D. J., Hall, C. A. S. (2010) Year in review – EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185(1), 102-118.
- 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*, 3(10), 1888-1907.
- Murphy, D., Carbajales-Dale, M., Moeller, D. (2016) Comparing Apples to Apples: Why the Net Energy Analysis Community Needs to Adopt the Life-Cycle Analysis Framework. *Energies*, 9(11), 917.
- Odum, H. (1973) Energy, Ecology, and Economics. *Ambio*, 2(6), 220-227. [CrossRef]
- Palmer, G., Floyd, J. (2017) An Exploration of Divergence in EPBT and EROI for Solar Photovoltaics. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 2(4), 1-20.
- Prieto, P., Hall, C. A. S. (2013) *Spain's Photovoltaic Revolution : The Energy Return on Investment*. New York: Springer.
- Rao, R. R., Mani, M., Ramamurthy, P. C. (2018). An updated review on factors and their inter-linked influences on photovoltaic system performance. *Heliyon*, 4(9), E00815.
- Raugei, M., Fullana-i-Palmer, P., Fthenakis, V., (2012). The Energy Return on Energy Investment (EROI) of Photovoltaics: Methodology and Comparisons with Fossil Fuel Life Cycles. *Energy Policy*, 45, 576-582.
- Raugei, M. (2013) 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*, 59, 781-782.
- Raugei, M., Carbajales-Dale, M., Barnhart, C. J., 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*, 82(C), 1088-1091.
- Raugei, M., Leccisi, E. (2016) A comprehensive assessment of the energy performance of the full range of electricity generation technologies deployed in the United Kingdom. *Energy Policy*, 90, 46-59.

- Raugei, M., Sgouridis, S., Murphy, D., Fthenakis, V., Frischknecht, R., Breyer, C., Bardi, U., Barnhart, C., Buckley, A., Carbajales-Dale, M., Csalal, D., de Wild-Scholten, M., Heath, G., Jæger-Waldau, A., Jones, C., Keller, A., Leccisi E., Mancarella, P., Pearsall, N., Siegel, A., Sinke, W., Stolfz, P. (2017). Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response. *Energy Policy*, 102(C), 377-384.
- Raugei, M., Leccisi, E., Fthenakis, V., Moragas, R., Simsek, Y. (2018a). Net energy analysis and life cycle energy assessment of electricity supply in Chile: Present status and future scenarios. *Energy*, 162, 659.
- Raugei, M., Leccisi, E., Azzopardi, B., Jones, C., Gilbert, P., Zhang, L., Zhou, Y., Mander, S., Mancarella ; P. (2018b). A multi-disciplinary analysis of UK grid mix scenarios with large-scale PV deployment. *Energy Policy*, 114, 51-62.
- Raugei, M., Frischknecht, R., Olson, C., Sinha, P., Heath, G. (2016) *Methodological Guidelines on Net Energy Analysis of Photovoltaic Electricity* (Report IEA-PVPS T12-07:2016). International Energy Agency (IEA)
- Rye, C. D., Jackson, T. (2018) A review of EROEI-dynamics energy-transition models. *Energy Policy*, 122, 260-272.
- Trainer, T. (2013) 100% Renewable supply? Comments on the reply by Jacobson and Delucchi to the critique by Trainer. *Energy Policy*, 57, 634-640.
- Trainer, T. (2018) Estimating the EROI of whole systems for 100% renewable electricity supply capable of dealing with intermittency. *Energy Policy*, 119, 648-653.
- Weißbach, D., Ruprecht, G., Huke, A., Czarski, K., Gottlieb, S., Hussein, A. (2013) Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. *Energy*, 52, 210-221.
- Wetzel, T., Borchers, S. (2015) Update of energy payback time and greenhouse gas emission data for crystalline silicon photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(10), 1429-1435.
- IEA (2018) World Energy Outlook. Dans IEA – Publications – WEO – WEO 2018. Récupéré le 28/12/2018 de <https://www.iea.org/weo/weo2018/secure>
- Wu, P., Ma, X., Ji, J., Ma, Y. (2017) Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback of Solar Photovoltaic Systems and a Case Study. *Energy Procedia*, 105, 68-74.
- Yue, D., You, F., Darling, S. (2014). Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis. *Solar Energy*, 105(C), 669-678.
- Zhang, Y., Colosi, L. (2013) Practical ambiguities during calculation of energy ratios and their impacts on life cycle assessment calculations. *Energy Policy*, 57, 630-633.