

# Estimation du Energy Return on Investment (EROI) sociétal

**Elise Dupont**

iMMC (Institut de mécanique, des matériaux et du génie civil), Université catholique de Louvain

**Marc Germain**

LEM UMR 9221 / [marc.germain@univ-lille.fr](mailto:marc.germain@univ-lille.fr)

**Hervé Jeanmart**

iMMC (Institut de mécanique, des matériaux et du génie civil), Université catholique de Louvain

<https://lem.univ-lille.fr/>

Les documents de travail du LEM ont pour but d'assurer une diffusion rapide et informelle des résultats des chercheurs du LEM. Leur contenu, y compris les opinions exprimées, n'engagent que les auteurs. En aucune manière le LEM ni les institutions qui le composent ne sont responsables du contenu des documents de travail du LEM. Les lecteurs intéressés sont invités à contacter directement les auteurs avec leurs critiques et leurs suggestions.

Tous les droits sont réservés. Aucune reproduction, publication ou impression sous le format d'une autre publication, impression ou en version électronique, en entier ou en partie, n'est permise sans l'autorisation écrite préalable des auteurs.

Pour toutes questions sur les droits d'auteur et les droits de copie, veuillez contacter directement les auteurs.

The goal of the LEM Discussion Paper series is to promote a quick and informal dissemination of research in progress of LEM members. Their content, including any opinions expressed, remains the sole responsibility of the authors. Neither LEM nor its partner institutions can be held responsible for the content of these LEM Discussion Papers. Interested readers are requested to contact directly the authors with criticisms and suggestions.

All rights reserved. Any reproduction, publication and reprint in the form of a different publication, whether printed or produced electronically, in whole or in part, is permitted only with the explicit written authorization of the authors.

For all questions related to author rights and copyrights, please contact directly the authors.

# Estimation du Energy Return on Investment (EROI) sociétal

Elise Dupont\*

Marc Germain<sup>†</sup>

Hervé Jeanmart\*

Juillet 2020

## Abstract

Il est acquis que l'accès à des ressources d'énergie primaire abondantes et de qualité est un facteur essentiel de prospérité des sociétés humaines. Pour mesurer cette qualité (entendue comme la plus ou moins grande facilité avec laquelle le système énergétique peut les transformer en énergie utile à la société), le concept de EROI (Energy Returned on Investment) est largement utilisé. Mais à ce jour, peu d'estimations de cet indicateur existent au niveau sociétal.

Cet article vise en premier lieu à estimer le EROI sociétal au moyen d'un modèle macroéconomique simple comprenant deux secteurs, un secteur énergétique et un secteur final agrégeant le reste de l'économie. Pour l'année 2017 et au niveau mondial, on obtient un EROI proche de 12. L'estimation du NER (Net Energy Ratio), un deuxième indicateur plus complet que le EROI, conduit à la répartition suivante de l'énergie finale : les consommations énergétiques (directe et indirecte) des secteurs énergétique et final représentent respectivement 8% et 14% du total, les 78% restant contribuant à la consommation totale (privée et publique) et à la croissance économique.

Ces chiffres se révèlent peu sensibles aux variations de certains paramètres du modèle. En outre, la calibration du modèle sur la période 1990-2017 révèle que le EROI et le NER n'ont pas connu de variations significatives pendant les 30 dernières années.

---

\*iMMC (Institut de mécanique, des matériaux et du génie civil), Université catholique de Louvain

<sup>†</sup>LEM-CNRS (UMR 9221), Université de Lille et IRES, Université catholique de Louvain

# 1 Introduction

Il est acquis que l'accès à des ressources d'énergie primaire abondantes et de qualité est un facteur essentiel de prospérité des sociétés humaines. Par qualité de ces ressources, on entend la plus ou moins grande facilité avec laquelle le système énergétique peut les transformer en énergie utile à la société. Un concept largement utilisé pour mesurer cette qualité est celui du EROI (Energy Returned on Investment)<sup>1</sup>, défini comme le rapport entre l'énergie produite par une technologie ou un système énergétique et toute l'énergie qui a dû être investie, de manière directe ou indirecte, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au démantèlement du site en fin de vie. Pour peu que les mêmes frontières soient utilisées (ce qui est l'objet d'un certain nombre d'articles, voir notamment [Murphy et al. \(2011\)](#); [Brandt et Dale \(2011\)](#)), cet indicateur permet alors de comparer la rentabilité énergétique de différents processus de production d'énergie.

Ce ratio peut concerner l'étude d'un site bien spécifique, de toute une filière, ou peut même être appliqué à l'ensemble du secteur énergétique d'une économie. S'il existe de très nombreuses études consacrées au EROI d'un site ou d'une filière, celles qui se situent au niveau d'une économie ou d'une société sont nettement plus rares. La présente étude se situe au niveau le plus agrégé puisqu'elle vise, entre autres, à estimer le EROI de l'économie mondiale.

La littérature concernant l'étude du EROI au niveau sociétal (pour reprendre les termes de [Hall et al. \(2009\)](#)) concerne principalement l'estimation d'une borne inférieure en dessous de laquelle un mode de vie prospère ne serait pas soutenable. [Hall et al. \(2009\)](#) estiment qu'il faudrait que les principaux combustibles offrent un EROI autour de 5 pour maintenir "tout ce que nous appelons la civilisation", mais ce chiffre résulte d'une estimation éclairée (educated guess), pas d'un calcul. Sur la base d'une approche liant l'Indice du Développement Humain (IDH) avec le EROI et appliquée à un large échantillon de pays, [Lambert et al. \(2014\)](#) montrent que (i) EROI sociétal et IDH sont positivement corrélés<sup>2</sup> et (ii) sauf exception, les pays avec un niveau de développement élevé (au delà de .75) sont caractérisés par un EROI sociétal au delà de 20. Au moyen d'une équation économétrique reliant taux de croissance, dépenses consacrées à l'énergie, formation de capital et population pour les Etats-Unis, [Court et Fizaine \(2016\)](#) estiment à 11 le EROI minimal pour qu'il y ait croissance économique. Une étude récente de [Court \(2019\)](#) montre que le EROI sociétal minimum au niveau mondial a décliné d'un peu plus de 20 en 1900, pour se stabiliser autour de 6 depuis les années 70. Cette évolution est le résultat d'améliorations significatives d'efficacité de conversion d'énergie primaire en énergie finale, celles-ci s'étant cependant ralenties ces dernières décennies. [Brandt \(2017\)](#) utilise un modèle input/output d'une économie fictive à 4 secteurs, dont les coefficients techniques intersectoriels sont estimés à partir de données états-uniennes et exprimés en ordre de grandeur (c-à-d en puissances de 10). Ce modèle conduit à un EROI sociétal minimum autour de 5. En effet, sous ce seuil, les besoins (notamment en capital) du secteur énergétique deviendraient trop lourds à supporter pour l'économie.

Globalement, on constate que les estimations du EROI sociétal minimum varient sensiblement d'une contribution à l'autre. Ces variations peuvent découler de différences au niveau (i) de la méthodologie, (ii) du concept de EROI choisi ou encore, (iii) de l'objec-

---

1. La traduction française du EROI est le TRE (taux de retour énergétique). Cependant, étant donné que EROI est une terminologie plus répandue, nous gardons cet acronyme dans la suite de ce travail.

2. La relation est cependant non linéaire (au sens où l'IDH augmente de moins en moins vite avec le EROI sociétal) et se caractérise par un effet de saturation.

tif que la borne inférieure au EROI sociétal est supposée refléter. Il en découle que les estimations sont difficilement comparables.

Contrairement aux précédentes contributions, le modèle MEDEAS de [Capellán-Pérez et al.](#) ([2019](#), [2020](#)) vise (entre autres) à décrire l'évolution du EROI sociétal effectif (et non celle d'une borne inférieure). Le EROI du système énergétique est calculé de manière endogène, sur base d'une revue détaillée des analyses de cycle de vie des différentes sources d'énergie, et en incluant les installations annexes nécessaires à gérer l'intermittence des énergies renouvelables (stockage, surdimensionnement des capacités de production et adaptation du réseau). Pour 2015, en prenant en compte un facteur supplémentaire de conversion d'énergie primaire en énergie finale, ils obtiennent au niveau mondial un EROI égal à 12.

Dans cet article, nous proposons, au moyen d'un modèle macroéconomique simple, une estimation du EROI sociétal au niveau mondial, robuste à des variations des paramètres non observés du modèle. L'estimation est réalisée pour la période 1990-2017. Par sa démarche modélisatrice, l'article se rapproche des contributions de Capellán-Pérez et al. Mais à la différence de MEDEAS qui ne fait intervenir que des flux énergétiques pour estimer le EROI, notre modèle fait intervenir des flux (et donc des unités) tant économiques qu'énergétiques.

Le EROI ne tient compte que des consommations directes (la consommation intermédiaire énergétique) et indirectes (les consommations intermédiaire non énergétique et de capital) du secteur énergétique. En conséquence, il ne permet pas de calculer l'énergie finale réellement disponible pour la demande finale (somme de la consommation privée et publique et de l'investissement net) car il ignore la consommation intermédiaire et de capital du reste de l'économie. C'est pourquoi nous proposons d'estimer un second indicateur introduit par [Fagnart et Germain](#) ([2016](#)), appelé le "Net Energy Ratio" (NER) de l'économie<sup>3</sup>. Ce concept est plus riche que le EROI, dans la mesure où il tient compte des consommations intermédiaires et de capital de *l'ensemble de l'économie*. Ce faisant, il sera possible de déterminer la fraction de l'énergie finale produite par le secteur énergétique *vraiment utile*, c'est-à-dire celle qui contribue soit à la consommation (privée et publique), soit à la croissance économique.

La structure de l'article est la suivante. La section 2 présente les équations du modèle. La section 3 décrit comment le modèle est calibré, et présente les estimations du EROI sociétal et du NER relatives à 2017. Vu l'incertitude concernant certains paramètres du modèle, nous effectuons dans la section 4 une analyse de sensibilité destinée à tester la robustesse des estimations obtenues à la section précédente. La section 5 vise à estimer le EROI sociétal et le NER pour les années entre 1990 et 2017. La dernière section conclut.

## 2 Le modèle

### 2.1 Caractéristiques générales

Le modèle (décrit par la Figure [1](#)) est celui d'une économie fermée, avec deux secteurs d'activité : (i) le secteur énergétique (SE) qui produit de l'énergie finale à destination du reste de l'économie et (ii) le secteur final (SF) qui produit un bien à tout faire, appelé bien final. Celui-ci est utilisé tant pour la consommation que pour l'investissement. La

---

3. Ce concept, qui mesure la part de l'énergie produite qui est disponible pour la demande finale, est à différencier du NER tel que défini par [Brandt et Dale](#) ([2011](#)), qui est une variante du EROI mesurant le rapport entre l'énergie nette produite et l'énergie investie.

production du SE se répartit entre consommations intermédiaires des deux secteurs et livraisons à la consommation finale<sup>4</sup>. Afin d’alléger le modèle et d’en faciliter la calibration, la consommation intermédiaire de biens finaux n’est pas prise en compte. Les deux secteurs utilisent deux facteurs de production : le capital et l’énergie finale. Le stock de capital de l’économie se répartit entre les deux secteurs selon leurs besoins respectifs.

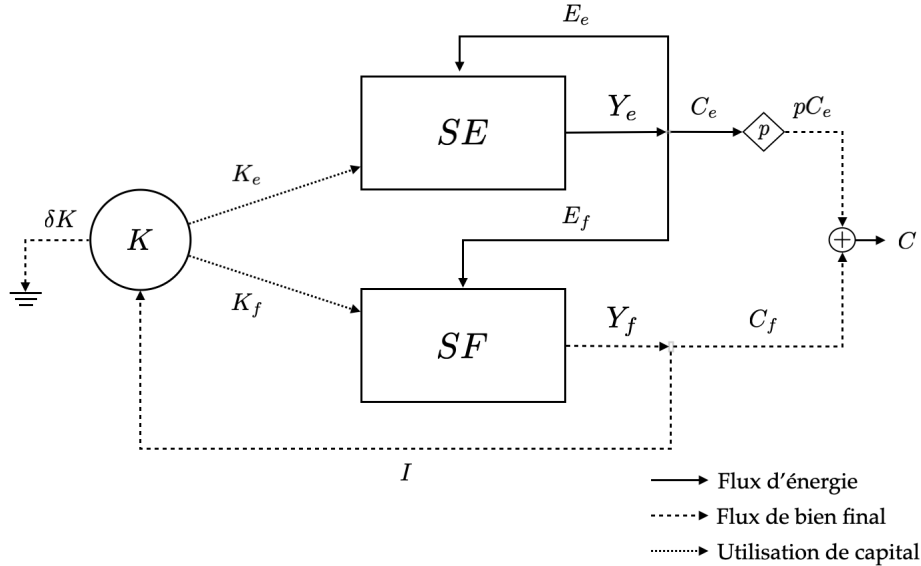


FIGURE 1 – Représentation schématique du modèle.

## 2.2 Les équations du modèle

Les secteurs énergétique et final sont respectivement indicés par  $e$  et  $f$ . Le modèle est dynamique au sens où les variables dépendent du temps. Cependant, afin d’alléger les écritures, la dépendance par rapport au temps est omise.

Production sectorielle et consommations de facteurs sont liées par les relations suivantes :

$$Y_i = \frac{K_i}{v_i} = \frac{E_i}{q_i} \quad (1)$$

où :

- $Y_i$ ,  $K_i$ , et  $E_i$  désignent respectivement la production, le stock de capital, et l’énergie du secteur  $i$ . Production et consommations énergétiques sont mesurées en unités d’énergie ( $ue$ ), production de biens et stocks de capital en unités de bien final ( $ub$ ).
- $v_i$  et  $q_i$  désignent respectivement les intensités en capital et en énergie du secteur  $i$ , c’est-à-dire les quantités de ces facteurs par unité produite. Ces intensités sont susceptibles d’évoluer au cours du temps en fonction de l’évolution de la technologie.

Le stock de capital total se répartit entre les deux secteurs :

$$K = K_e + K_f \quad (2)$$

4. Par consommation finale, nous entendons la consommation privée (des ménages) et publique (de l’Etat).

L'intensité en capital de l'économie est définie quant à elle par le rapport entre le capital total et le  $PIB$  :

$$v = \frac{K}{PIB} \quad (3)$$

L'accumulation du capital est décrite par :

$$\Delta K = I - \delta K \quad (4)$$

où  $I$  et  $K$  sont respectivement l'investissement (brut) et le stock de capital total de l'économie (en  $ub$ ).  $\delta$  désigne le taux de dépréciation moyen du capital ( $0 < \delta < 1$ ). Il est une moyenne pondérée des taux de dépréciation sectoriels :

$$\delta = \frac{\delta_e K_e + \delta_f K_f}{K} \quad (5)$$

Notons qu'à l'état stationnaire,  $\Delta K = 0$  et donc  $I = \delta K$  (l'investissement sert uniquement à remplacer la dépréciation du capital).

La production du SF se répartit entre livraisons à la consommation finale (définie comme la consommation privée et publique de biens finaux) et investissement :

$$Y_f = C_f + I \quad (6)$$

La production du SE se répartit entre consommation finale énergétique et consommations intermédiaires sectorielles :

$$Y_e = E_e + E = E_e + E_f + C_e \quad (7)$$

où  $E$  désigne la production nette du SE (c'est-à-dire hors autoconsommation).

Le prix du secteur final est choisi comme numéraire et égal à 1. En notant  $p$  le prix réel de l'énergie (en  $ub/ue$ ), les valeurs ajoutées des deux secteurs sont :

$$\begin{aligned} VA_f &= Y_f - pE_f = (1 - pq_f)Y_f \\ VA_e &= p(Y_e - E_e) = pE \end{aligned} \quad (8)$$

La consommation *totale* est définie comme la somme des consommations finales (de biens finaux et d'énergie) :

$$C = C_f + pC_e$$

Par définition, le  $PIB$  est la somme des valeurs ajoutées sectorielles. On obtient par conséquent :

$$\begin{aligned} PIB &= Y_f - pE_f + pE \\ &= Y_f + pC_e \end{aligned} \quad (9)$$

La deuxième égalité découle de (7) et décompose le  $PIB$  en terme de livraisons sectorielles à la demande finale.

Le taux d'épargne macroéconomique est défini par :

$$s = \frac{I}{PIB} \quad (10)$$

Il s'agit de la part du  $PIB$  qui est investie dans la production de capital, la part restante étant consacrée à la consommation totale.

## 2.3 EROI

Le calcul du EROI suit la démarche de [Fagnart et Germain \(2016\)](#). Pour produire  $Y_e$ , le SE a consommé (i)  $E_e$  au titre d'autoconsommation énergétique (en  $ue$ ) et (ii)  $\delta_e K_e$  au titre de consommation de capital (en  $ub$ ). Comme le EROI comptabilise uniquement des flux sous forme d'énergie, il est nécessaire d'estimer le flux d'énergie *grise* inclus dans le flux de capital  $\delta_e K_e$ , c-à-d toute l'énergie qu'il a fallu mettre en oeuvre pour produire, installer, entretenir et démanteler la fraction du stock de capital du SE consommée pendant la période considérée.

Notons  $\widetilde{\delta_e K_e}$  l'énergie grise contenue dans le flux mesurant la dépréciation du capital  $\delta_e K_e$ . Comme la production finale est supposée homogène et qu'il faut  $E_f ue$  pour produire  $Y_f ub$ , on peut estimer cette énergie grise par :

$$\widetilde{\delta_e K_e} = \frac{E_f}{Y_f} \delta_e K_e = q_f \delta_e v_e Y_e \quad (11)$$

en vertu de [\(1\)](#)<sup>5</sup>.

Le EROI s'écrit alors :

$$EROI = \frac{Y_e}{E_e + \widetilde{\delta_e K_e}} = \frac{Y_e}{E_e + q_f \delta_e v_e Y_e} = \frac{1}{q_e + q_f \delta_e v_e} \quad (12)$$

en vertu de l'équation précédente et [\(1\)](#).

Le EROI calculé ici correspond au concept de GEER (gross external energy ratio) tel que défini par [Brandt et Dale \(2011\)](#). Il consiste à exclure au numérateur et au dénominateur du EROI l'énergie produite directement autoconsommée par le processus. On différencie donc entre l'énergie finale autoconsommée au sein du secteur énergétique (comptabilisée) et celle autoconsommée au sein d'un site de production bien particulier (non comptabilisée).

Pour les processus avec une fraction significative d'énergie autoconsommée, le GEER est significativement plus grand que le GER (gross energy ratio), où cette énergie autoconsommée se retrouve tant au numérateur qu'au dénominateur<sup>6</sup>. Le GEER est choisi ici pour le calcul du EROI car (i) il est consistant avec la définition d'autoconsommation du système énergétique de l'IEA et (ii) il est plus pertinent pour évaluer la capacité d'un processus à générer un surplus d'énergie pour la société ([Arvesen et Hertwich \(2015\)](#)).

## 2.4 Pertes au sein de l'économie

La production vraiment *utile* de l'économie est celle qui sert à la consommation totale et à la croissance économique. Elle est mesurée par le Produit Intérieur Net ( $PIN$ ), égal au  $PIB$  moins la consommation de capital, où encore à la somme de la consommation totale et de l'investissement net ( $C + I_{net}$ ). En suivant l'approche de [Fagnart et Germain \(2016\)](#), on établit la relation suivante entre  $PIN$  et production du SE (voir Annexe [7.1](#)) :

$$PIN = ((1 - \delta_f v_f) (1 - q_e) - q_f \delta_e v_e - ((1 - \delta_f v_f) - p q_f) \zeta) PIN_{max} \quad (13)$$

5. Cette estimation repose sur le contenu énergétique de la part de l'investissement (au temps  $t$ ) ayant servi à remplacer le capital devenu obsolète (au temps  $t$ ). Une autre approche aurait consisté à estimer l'énergie grise contenue dans le stock de capital sur la base du contenu énergétique des investissements passés. Comme  $q_f$  décroît dans le temps (à cause des gains d'efficacité énergétique), cette approche conduirait à une estimation plus élevée de l'énergie grise contenue dans le flux mesurant la dépréciation du capital.

6. Pour la production mondiale d'électricité par exemple, [Kis et al. \(2018\)](#) obtiennent une estimation de 7.4 pour le GER et 11.3 pour le GEER.



où  $\zeta = C_e/Y_e$ .  $PIN_{max} = \frac{Y_e}{q_f}$  correspond à la production utile *maximale*, qui serait obtenue si toute la production du SF pouvait être consacrée à la consommation finale  $C_f$  ou à l'investissement net  $I_{net}$ . Mais seule une fraction de cette quantité théorique y contribue, car il y a des "pertes" (au sens de réductions de  $PIN_{max}$ ) au sein de l'économie :

- la première perte vient des consommations intermédiaires et de capital (CIK) des deux secteurs. La fraction de  $PIN_{max}$  perdue par ce biais est mesurée par  $P_1 = 1 - ((1 - \delta_f v_f)(1 - q_e) - q_f \delta_e v_e)$ .
- la deuxième partie est liée à  $C_e$ , la partie de la production énergétique livrée directement aux ménages et qui n'est pas disponible pour le SF. La perte de production de biens finaux qui en résulte vaut  $\frac{1 - \delta_f v_f}{q_f} C_e$ . Comme  $C_e = \zeta Y_e$ , la fraction de  $\frac{Y_e}{q_f}$  perdue via  $C_e$  vaut  $(1 - \delta_f v_f)\zeta$ . Cependant, la perte de production de biens finaux est compensée par  $pC_e$ , la valeur des livraisons énergétiques aux ménages. Mesurée en terme de fraction de  $\frac{Y_e}{q_f}$ , cette compensation vaut  $pq_f\zeta$ . En conséquence, la fraction perdue de  $PIN_{max}$  liée à  $C_e$  vaut au final  $P_2 = ((1 - \delta_f v_f) - pq_f)\zeta$ .

Compte tenu de ce qui précède, (13) devient :

$$PIN = (1 - P_1 - P_2)PIN_{max}$$

Dans le cas particulier où  $\zeta = 0$ ,  $P_2 = 0$  et on retrouve le résultat de [Fagnart et Germain \(2016\)](#). Ils définissent la valeur  $1 - P_1$  comme le Net Energy Ratio (NER) de l'économie, c-à-d la fraction de l'énergie finale produite par le SE après déduction des besoins en énergie (directs et indirects) des deux secteurs. Ce concept est plus riche que le EROI, dans la mesure où il tient compte des pertes liées aux CIK de *l'ensemble de l'économie*, alors que le EROI ne tient compte que des pertes liées aux CIK du SE.

Remarquons enfin que dans le cas où  $\delta_f = 0$  (pas de consommation de capital dans le SF) et  $\zeta = 0$ , alors (13) se réduit à :

$$\begin{aligned} PIN &= (1 - q_e - q_f \delta_e v_e)PIN_{max} \\ &= \left(1 - \frac{1}{EROI}\right) PIN_{max} \end{aligned}$$

Ce n'est que dans ce cas très particulier que le EROI détermine seul la fraction utile de  $PIN_{max}$ .

Les résultats ci-dessus sont ordonnés dans le Tableau 1. La première colonne renseigne les pertes considérées (dans un ordre croissant) et la 2ème les valeurs du  $PIN$  correspondantes.  $PIN_{max}$ ,  $PIN_{EROI}$  et  $PIN_{NER}$  sont des valeurs théoriques, tandis que la dernière ligne correspond au  $PIN$  réellement observé. Les différentes pertes se mesurent par la différence entre 2  $PIN$ s successifs (par exemple,  $PIN - PIN_{NER}$  mesure la perte de  $PIN$  due à  $C_e$ ).

Pertes	PIN
Nulles	$PIN_{max} = \frac{Y_e}{q_f}$
CIK SE	$PIN_{EROI} = \left(1 - \frac{1}{EROI}\right) \frac{Y_e}{q_f}$
CIK SE+SF	$PIN_{NER} = (1 - P_1) \frac{Y_e}{q_f}$
CIK SE+SF + $C_e$	$PIN = (1 - P_1 - P_2) \frac{Y_e}{q_f}$

Tableau 1 – Pertes et PIN correspondants.

### 3 La calibration de référence

Dans un premier temps, nous calibrons le modèle sur base d'observations au niveau mondial relatives à une année dite de référence. Ensuite, nous réalisons une analyse de sensibilité concernant des paramètres du modèle qui doivent être estimés et dont les valeurs sont donc caractérisées par une certaine incertitude. On verra que la calibration de référence est robuste aux variations de ces paramètres, car le système énergétique actuel repose principalement sur des apports en énergie sous forme directe.

#### 3.1 Données observées

Par la suite, les unités de bien final ( $ub$ ) et d'énergie ( $ue$ ) du modèle théorique sont traduites en unités réelles. Ainsi les flux de biens finaux sont exprimés en dollars US de 2010 (US\$2010), tandis que les flux énergétiques sont exprimés en tonnes équivalent pétrole (tep). L'année de référence est 2017, la dernière année pour laquelle l'IEA fournit des données publiques de production et de consommations d'énergie au niveau mondial. Notons que le modèle n'enregistre que des flux d'énergie finale.

**Données énergétiques** Au niveau production et consommations d'énergie finale, les statistiques de l'IEA fournissent les données suivantes :

- Consommation finale totale (usages non-énergétiques inclus) :  $Cft = 9717$  Mtep (millions de tep)
- Autoconsommation :  $A = 817$  Mtep
- Usages non-énergétiques :  $UNE = 879$  Mtep
- Consommation des ménages :  $C_e = 3359$  Mtep, en considérant que l'on compte comme consommation directe d'énergie finale par les ménages toute la consommation d'énergie résidentielle (2064 Mtep) et 46.1% de l'énergie dédiée au transport (2808 Mtep)<sup>7</sup>.

La fraction des usages non énergétiques dans la consommation finale vaut donc 9% en 2017.

De même que Capellán-Pérez *et al.* (2020), nous ne comptabilisons pas les usages non énergétiques dans la production énergétique (qui sont supposés faire partie de la production de biens finaux). De ce fait, les données précédentes de l'IEA demandent de légères adaptations : (i) Les usages non énergétiques sont retirés de la consommation finale d'énergie et (ii) l'autoconsommation et la production nette du SE sont réduites proportionnellement au prorata de la fraction des usages non énergétiques dans la consommation d'énergie finale. D'où les flux énergétiques du modèle suivants :  $Y_e = Cft + A - UNE = 9655$  Mtep,  $E_e = (1 - .09)A = 743$  Mtep,  $E = Y_e - E_e = 8912$  Mtep, et  $E_f = E - C_e = 5554$  Mtep.

Il en découle directement l'intensité énergétique du SE :  $q_e = \frac{E_e}{Y_e} = 7.7\%$ . Notons que 62% de l'énergie nette  $E$  (hors autoconsommation  $E_e$ ) est destinée aux livraisons au SF, le reste (38%) allant à la consommation directe des ménages.

Il importe de préciser que l'autoconsommation au sens de l'IEA comprend toutes les consommations d'énergie finale des industries du SE destinées au chauffage, à l'éclairage et au fonctionnement des différents équipements utilisés pour l'extraction et la transformation d'énergie primaire (essentiellement des combustibles fossiles) en énergie finale. En revanche, d'autres consommations sont exclues, par exemple le charbon brûlé dans les centrales électriques sur les sites d'extraction, ainsi que le gaz brûlé lors de l'extraction. Dans ces

---

7. Voir Ribeiro *et al.* (2007) pour la répartition par mode de transport de l'énergie dédiée au transport au niveau mondial.

deux cas en effet, il s'agit d'une autoconsommation d'énergie *primaire* qui n'entre pas dans la comptabilité puisque cette énergie n'a jamais quitté les sites de production. Cela correspond bien au concept de GEER choisi pour le EROI (voir section 2.3).

**Données économiques** La Banque Mondiale fournit les données suivantes :

- *PIB* mondial :  $PIB_{2017} = 80250$  GUS\$2010 et  $PIB_{2016} = 77796$  GUS\$2010 (milliards de US\$2010). On en déduit le taux de croissance de l'économie en 2017 :

$$g_{2017} = \frac{PIB_{2017} - PIB_{2016}}{PIB_{2016}} = 3.15\%$$

- Taux d'épargne :  $s = 25.23\%$ .

### 3.2 Paramètres estimés

A partir des variables du modèle définies à la section 2, on peut calculer deux paramètres intéressants, à savoir la part de la valeur ajoutée du SE dans le *PIB* et le taux de partage du stock de capital entre les deux secteurs. A la différence du taux d'épargne, ces paramètres ne sont pas directement observables. Mais ils peuvent être estimés à partir de la littérature. Il en va de même pour le taux de dépréciation du capital car celui-ci est composé d'équipements à longue durée de vie (ex. les bâtiments) et d'autres à très courte durée de vie (ex. les ordinateurs).

On se propose ci-dessous de déterminer des intervalles de valeurs raisonnables pour chacun de ces paramètres. Ce qui permettra d'effectuer à la section 4 une analyse de sensibilité (autour de la valeur centrale de l'intervalle), afin d'évaluer à quel point la calibration du modèle est sensible ou non à ces variations.

**Taux de dépréciation du capital** Comme l'indique (4), le capital se déprécie de façon exponentielle. Le taux de dépréciation est cependant différent selon le secteur (cfr. (5)). Le taux de dépréciation  $\delta_i$  du secteur  $i$  peut être approximé par :

$$\delta_i \approx \frac{1}{T_i} \tag{14}$$

où  $T_i$  désigne la durée de vie moyenne du capital. Concernant le SF, la Banque Centrale Européenne estime  $T_f$  autour de 20 ans (European Central Bank (2006)). Pour le Canada,  $T_f$  est estimé (i) à environ 25 ans pour les bâtiments et (ii) entre 11 et 15 ans pour les machines et équipements (Statistics Canada (2007)). Ceci nous conduit à choisir 20 ans comme valeur de référence pour  $T_f$ , avec un intervalle de variation égal à  $[15, 25]$  années.

Bien que certains modèles considèrent un stock de capital homogène (à l'exemple de celui de Dale *et al.* (2012) qui supposent que  $T_e = T_f = 20$  ans), on peut argumenter que les infrastructures du SE ont une plus longue durée de vie. Pour le Canada, les durées de vie moyenne des raffineries de pétrole et des usines de traitement du gaz naturel sont estimées à 23 et 25 ans respectivement. Pour les machines et équipements liés à la production d'électricité, les valeurs oscillent entre 23 et 37 ans pour les plus gros composants (générateurs de vapeur, turbines, moteurs) et 15 ans pour les plus petits équipements (Statistics Canada (2007)). Ceci nous conduit à choisir 25 ans comme valeur de référence pour  $T_e$ , avec un intervalle de variation entre 20 et 30 ans.

**Part du secteur énergétique dans le PIB** On définit  $\alpha$  comme la part de la valeur ajoutée du SE dans le PIB :

$$\alpha = \frac{VA_e}{PIB} = \frac{pE}{PIB} \quad (15)$$

où la deuxième égalité découle de (8).

Au niveau mondial, Kümmel *et al.* (2015) donne une estimation de 5%, tandis que Ayres *et al.* (2013) donne une fourchette entre 4 et 8%. Les estimations de Court et Fizaine (2016) pour le monde sont également dans cet intervalle. Etant donné ces estimations, la valeur de référence choisie pour  $\alpha$  est de 6%, avec un intervalle de variation égal à [4, 8]%. L'énergie, bien qu'indispensable à toute activité économique, ne représente donc qu'une petite fraction de la valeur ajoutée de l'économie.

**Part du capital consacrée au SE** Le taux de partage du capital entre les deux secteurs est défini comme :

$$\mu = \frac{K_e}{K} \quad (16)$$

Nous recourons au modèle de Dale *et al.* (2012) pour l'estimation de  $\mu$ . La calibration de ce modèle renseigne, pour 2010 et exprimés en terme de contenu énergétique, des stocks de capital industriel et énergétique respectivement égaux à 4000 EJ et 280 EJ, ce qui donne  $\mu = 6.54\%$ . Nous retiendrons l'intervalle [3, 10]% pour l'analyse de sensibilité.

### 3.3 Paramètres calibrés

Les estimations de  $T_i$  et  $\mu$  permettent de calculer le taux de dépréciation moyen  $\delta$ , qui est la moyenne pondérée des taux de dépréciation sectoriels. En effet, (5) implique :

$$\delta = \frac{\frac{K_e}{T_e} + \frac{K_f}{T_f}}{K} = \frac{\mu}{T_e} + \frac{1 - \mu}{T_f} \quad (17)$$

Partant du taux de croissance de l'économie, l'intensité capitalistique de l'économie  $v$  (le rapport  $\frac{K}{PIB}$ ) peut être calculée. En effet,  $v$  et  $g$ , le taux de croissance du PIB, sont liés par la relation suivante (voir Annexe 7.2) :

$$g = g_k - g_v = \frac{s}{v} - \delta - g_v \quad (18)$$

où pour toute variable  $x$ ,  $g_x = \frac{\Delta x}{x}$ . On vérifie empiriquement que  $v$  a été approximativement constant ces dernières décennies, autrement dit que  $g_v \approx 0$  (voir Annexe 7.3). Puisque dans ce cas  $g_k = g$ , (18) implique :

$$v = \frac{s}{g_k + \delta} \quad (19)$$

Connaissant  $v$  et le PIB, le stock de capital  $K$  peut être calculé via (3). Avec l'estimation de  $\mu$ , on détermine alors les stocks de capital des deux secteurs ( $K_e$  et  $K_f$ ).

$\alpha$  étant estimé et PIB et  $E$  observés, le prix de l'énergie peut être déduit de (15) qui implique en effet :

$$p = \frac{\alpha PIB}{E}$$

. La production du SF  $Y_f$  découle alors de (9).

Connaissant  $E_e, E_f$  et  $Y_e$  (observés),  $Y_i$  et  $K_i, i = e, f$  (calibrés plus haut), les paramètres technologiques  $q_f, v_f$  et  $v_e$  sont directement calculables via (1). Avec l'ensemble des paramètres techniques ( $v_i, q_i, \delta_i, i = e, f$ ), on trouve finalement les valeurs du EROI sociétal via (12) et des différentes pertes décrites à la sous-section 2.4.

### 3.4 Résultats

Les résultats pour la calibration de référence ( $\mu = 6.5\%$ ,  $\alpha = 6\%$ ,  $T_e = 25$  ans et  $T_f = 20$  ans) sont reprises dans le Tableau 2.

$v_f$	$q_f$	$v_e$	$q_e$	$v$	EROI	NER
2.96	0.07	1.68	0.08	3.1	12.24	0.78

Tableau 2 – Résultats pour la calibration de référence (2017).

Le Tableau 2 fournit les informations suivantes :

- Le paramètre d’autoconsommation du SE ( $q_e$ ) indique que 8% de l’énergie finale est autoconsommée par le SE.
- Au vu de l’intensité énergétique du SF ( $q_f$ ), il faut 0.07 tep pour produire mille US\$2010 de biens finaux.
- L’intensité capitalistique du SE ( $v_e$ ) indique que 1680 US\$2010 de capital installé sont nécessaires pour produire une tep d’énergie finale.
- L’intensité capitalistique du SF ( $v_f$ ) indique qu’il faut (presque) 3 US\$2010 de capital installé pour produire 1 US\$2010 de bien final.
- Au vu de l’intensité capitalistique de l’économie ( $v$ ), il faut un peu plus de 3 US\$2010 de capital installé pour produire 1 US\$2010 de *PIB*. Cette valeur, cohérente avec la littérature, découle directement des valeurs observées du taux de croissance, du taux d’épargne et de la valeur estimée du taux de dépréciation du capital (cfr. 18).

#### 3.4.1 Estimation du EROI sociétal

Pour les valeurs de référence des paramètres, on trouve un EROI sociétal proche de 12. Ce chiffre correspond au EROI du système énergétique actuel calculé par Capellán-Pérez *et al.* (2019).

Au vu de (12) et du Tableau 2, on constate que c’est surtout la valeur de  $q_e$  qui détermine le EROI du système énergétique actuel. En effet,  $q_e$  tourne autour de 8% alors que le produit  $q_f \delta_e v_e$  est de 0.5%.  $q_e$  représente donc 94% du dénominateur du EROI. Cela signifie que l’essentiel des dépenses énergétiques du SE actuel se fait sous forme de consommation directe d’énergie finale, celles liées aux infrastructures ne représentant qu’une petite fraction du total.

Ce résultat est en accord avec Dale *et al.* (2012), qui postule dans le cadre de son modèle GEMBA que la production d’énergie finale au moyen de combustibles fossiles suppose 90% d’apports énergétiques sous forme directe. Il est également cohérent avec les travaux de Gagnon *et al.* (2009), qui étudient le retour énergétique de la production de pétrole et de gaz au niveau mondial. Leurs résultats indiquent que les apports d’énergie sous forme indirecte représentaient 11% du total des apports énergétiques en 1992 et 9% en 2006. Pour obtenir ces chiffres, ils recourent à des données de production des puits de pétrole et de gaz des Etats-Unis et du Royaume-Uni, et de dépenses des compagnies pétrolières liées à l’exploration, au développement, à l’extraction et à la production. Brandt (2017) postule également que 10% de l’énergie produite par les combustibles fossiles est directement autoconsommée, et 1% sous forme indirecte (ce qui correspond à 91% des inputs sous forme directe et 9% sous forme indirecte).

### 3.4.2 Calcul du NER

$P_1 =$	21.84
$CIK\ SE$	8.17
$+CIK\ SF$	13.67
$P_2 =$	28.31
$Pertes\ d'ub$	29.64
$-pC_e$	1.33
$P_1 + P_2$	50.14

Tableau 3 – Décomposition des différentes pertes pour la calibration de référence.

L'estimation des différentes pertes de PIN décrites dans la section 2.4 sont reprises dans le Tableau 3. Les pertes liées aux consommations intermédiaires et en capital (CIK) des deux secteurs s'élèvent à 22%. Ces pertes sont inégalement réparties entre les deux secteurs : 8.3% pour le SE, 13.7% pour le SF. En se limitant au concept de EROI (qui permet d'obtenir la CIK du seul SE), on n'enregistre donc pas les pertes non négligeables liées à la CIK du SF.

Le NER ( $= 1 - P_1$ ) vaut 78%. A cause de la CIK des deux secteurs, un peu moins des 4/5 de l'énergie finale peut potentiellement servir à la production *utile* de biens finaux (destinée soit à la consommation totale ou à la croissance du stock de capital).

Mais ce potentiel n'est pas atteint loin s'en faut. Le Tableau 3 montre que les pertes les plus importantes sont liées à la consommation énergétique  $C_e$ . Partant du rapport  $\zeta = C_e/Y_e$  égal à 35% en 2017 et après prise en compte de la CIK du SF (mesurée par  $(1 - \delta_f v_f) \frac{Y_e}{q_f}$ ), la perte de production utile de biens finaux s'élève à 30% de  $PIN_{max}$ . Cette perte n'est que très faiblement compensée par la valeur de la consommation énergétique des ménages  $pC_e$  (1.3% de  $PIN_{max}$ ). Cette dernière observation suggère que le PIN serait plus élevé si (au moins une partie de) l'énergie consommée par les ménages était plutôt affectées à la production de biens finaux. A investissement net donné, la consommation totale  $C$  serait également plus élevée (puisque  $C = C_f + pC_e = PIN - I_{net}$ ).

Par analogie à la définition du EROI qui est le rapport entre production et CIK du SE, on peut définir ici le ratio entre le PIN et les CIK des deux secteurs. On obtient alors un ratio de 4.5 ( $=1/0.22$ ). Il faut donc investir l'équivalent d'une unité de bien final pour en produire 4.5 unités *utiles*.

## 4 Analyse de sensibilité

Comme mentionné plus haut, il existe une incertitude concernant les paramètres estimés  $\alpha$ ,  $\mu$ ,  $T_e$  et  $T_f$ . Or le prix de l'énergie  $p$ , la production de biens finaux  $Y_f$ , et l'intensité énergétique du SF  $q_f$  dépendent des données observées et de  $\alpha$ . L'intensité en capital de l'économie  $v$  dépend de  $\mu$ . Et  $K_f$  et  $K_e$  dépendent de  $v$  et de  $\mu$ , tout comme les paramètres technologiques  $v_e$  et  $v_f$ . Il importe donc de savoir si la calibration de la section précédente est sensible ou non à une variation des paramètres estimés.

Les intervalles de variation des paramètres estimés avec leurs valeurs de référence sont renseignés dans le Tableau 4. Les calibrations obtenues en fonction des différentes combinaisons possibles d'estimations de  $\alpha$  et  $\mu$  sont reprises dans le Tableau 5. Afin de ne pas

	Référence	Min	Max
$T_f$ [années]	20	15	25
$T_e$ [années]	25	20	30
$\alpha$ [/100]	6	4	8
$\mu$ [/100]	6.5	3	10

Tableau 4 – Intervalles de variation des paramètres estimés.

alourdir le tableau, les variations de  $T_e$  et  $T_f$  ne sont pas reprises vu leur peu d'influence sur les résultats de la calibration.

$\mu$ [/100]	3			6.5			10		
	4	6	8	4	6	8	4	6	8
$q_f$	0.0702	0.0708	0.0713	0.0702	<b>0.0708</b>	0.0713	0.0702	0.0708	0.0713
$v$	3.08	3.08	3.08	3.1	<b>3.1</b>	3.1	3.11	3.11	3.11
$v_f$	3.04	3.06	3.08	2.94	<b>2.96</b>	2.98	2.84	2.86	2.89
$v_e$	0.77	0.77	0.77	1.68	<b>1.68</b>	1.68	2.59	2.59	2.59
$q_f \delta_e v_e$ [/100]	0.22	0.22	0.22	0.47	<b>0.48</b>	0.48	0.73	0.73	0.74
<i>EROI</i>	12.64	12.64	12.64	12.24	<b>12.24</b>	12.23	11.87	11.87	11.86
<i>NER</i> [%]	78.07	77.96	77.85	78.27	<b>78.16</b>	78.05	78.46	78.36	78.25
$P_1 =$	21.93	22.04	22.15	21.73	<b>21.84</b>	21.95	21.54	21.64	21.75
<i>CIK SE</i>	7.91	7.91	7.91	8.17	<b>8.17</b>	8.18	8.42	8.43	8.43
<i>+CIK SF</i>	14.01	14.12	14.23	13.56	<b>13.67</b>	13.77	13.12	13.22	13.32
$P_2 =$	28.63	28.13	27.64	28.8	<b>28.31</b>	27.81	28.96	28.48	27.98
<i>Pertes d'ub</i>	29.51	29.46	29.42	29.68	<b>29.64</b>	29.6	29.84	29.81	29.77
$-pC_e$	0.88	1.33	1.79	0.88	<b>1.33</b>	1.79	0.88	1.33	1.79
$P_1 + P_2$	50.55	50.17	49.78	50.53	<b>50.14</b>	49.76	50.5	50.12	49.73

Tableau 5 – Calibrations pour différentes valeurs de  $\alpha$  et  $\mu$  (valeur de référence et valeurs extrêmes).

On observe que certains paramètres calibrés sont très stables. C'est notamment le cas de l'intensité énergétique du SF  $q_f$ . Le *PIB* et  $E$  étant observés, ils ne varient pas avec  $\alpha$ . Une variation de  $\alpha$  implique alors une variation proportionnelle du prix de l'énergie  $p$  (vu (15)).  $C_e$  étant observé, ce prix permet de calculer la production  $Y_f$  (via (9)). Mais même si  $p$  devient plus élevé, la contribution de  $pC_e$  au *PIB* demeure très faible et donc  $Y_f$  varie très peu avec  $\alpha$ .  $E_f$  étant observé, cela explique que  $q_f$  varie également très peu avec  $\alpha$ . Un raisonnement similaire explique pourquoi  $q_f$  est insensible aux variations de  $\mu$ .

L'intensité capitalistique de l'économie  $v$  est calculée à partir de (19). Or (i)  $s$  et  $g_K = g$  sont observés et ne dépendent pas de  $\alpha$  et  $\mu$  et (ii)  $\delta$  varie très peu en fonction des paramètres estimés. Il en découle que  $v$  est également peu sensible à la variation de ces derniers.

Le EROI sociétal varie entre 11.86 et 12.64, avec une valeur de référence égale à 12.24. Le EROI est très peu sensible aux variations de  $\alpha$ . Ceci est dû au fait qu'il est principalement

déterminé par  $q_e$ , qui est observé et donc ne dépend pas des paramètres estimés (cfr. sous-section 3.4.1). En effet  $q_e$  vaut 7.7%, tandis que le produit  $q_f \delta_e v_e$  vaut au plus 0.74% (pour la valeur maximale de  $\mu$ ). Ce produit varie surtout à cause de la variation de l'intensité capitalisque du secteur énergétique  $v_e$ <sup>8</sup>. Mais dans tous les cas, il demeure faible et  $q_e$  reste prédominant dans la détermination du EROI. Cette observation est à nouveau inhérente à la structure actuelle du secteur énergétique.

Si le EROI est très peu sensible aux variations de  $\alpha$ , le tableau montre qu'il est un peu plus sensible aux variations de  $\mu$ . Il diminue lorsque  $\mu$  augmente vu qu'une plus grande partie du capital disponible doit être consacrée au secteur énergétique. A production énergétique  $Y_e$  donnée, il en découle que l'intensité capitalisque du secteur énergétique  $v_e$  augmente.

On notera que les valeurs calibrées des différentes pertes sont elles aussi très robustes à la variation des paramètres  $\alpha$  et  $\mu$ . La seule variation plus importante est observée au niveau du prix de l'énergie et donc de  $pC_e$ . Mais sa part dans le PIN reste cependant faible.

## 5 Evolution passée

Sur base des statistiques de l'IEA, il est possible de répéter l'exercice de calibration du modèle pour les 30 dernières années et ainsi d'observer les évolutions temporelles des paramètres techniques, du EROI et du NER. Ces évolutions sont décrites par les figures suivantes.

**Intensité énergétique du SE  $q_e$**  L'évolution de ce paramètre ne présente pas de tendance claire. On observe une légère hausse de  $q_e$  (traduisant une diminution de l'efficacité énergétique) depuis 1990 jusqu'à un maximum qui correspond approximativement à la dernière crise financière, suivie d'une légère diminution ces 10 dernières années. L'intensité énergétique du SE est soumise à deux mécanismes agissant en sens opposés. D'une part, le progrès technique tend à faire baisser  $q_e$ . D'autre part, l'exploitation de sources d'énergie primaire toujours plus difficiles d'accès tend à augmenter  $q_e$ . La Figure 2 suggère que ces deux mécanismes se sont plus ou moins équilibrés.

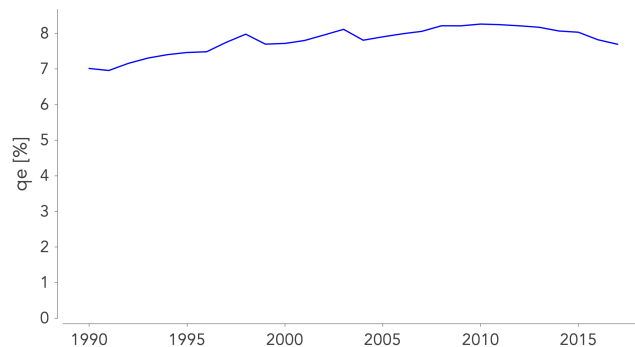


FIGURE 2 – Evolution de  $q_e$ , l'intensité énergétique du SE.

En décomposant  $q_e$  entre les principales sources d'énergie finale (par ordre décroissant

8. Comme on l'a vu plus haut,  $q_f$  augmente très peu avec  $\alpha$ . Il faudrait des valeurs de  $\alpha$  beaucoup plus élevées pour observer une influence sensible de ce paramètre sur  $q_f$ , et donc sur le EROI.



de leur part dans la consommation finale d'énergie en 2017, i.e. : pétrole 40%, électricité 19%, charbon 15%, biomasse 11%, et gaz naturel 10%), on peut faire les observations suivantes (voir Figure 3) :

- L'intensité énergétique de la production de pétrole diminue légèrement depuis 1990, passant de 6.3% à moins de 5% en 2017. Ce dernier chiffre pourrait être dû à des prix très bas forçant l'utilisation des puits les plus rentables uniquement.
- L'intensité énergétique de la production d'électricité diminue également légèrement depuis 1990, passant de 10.2% à 9.2%. Ceci est dû au fait que de nombreuses centrales ont été construites ces dernières années, en partie en remplacement de vieilles centrales moins performantes.
- On observe des fluctuations importantes pour le charbon.
- L'intensité énergétique de la production de gaz naturel augmente sensiblement depuis 1990, passant de 12 à 16%.

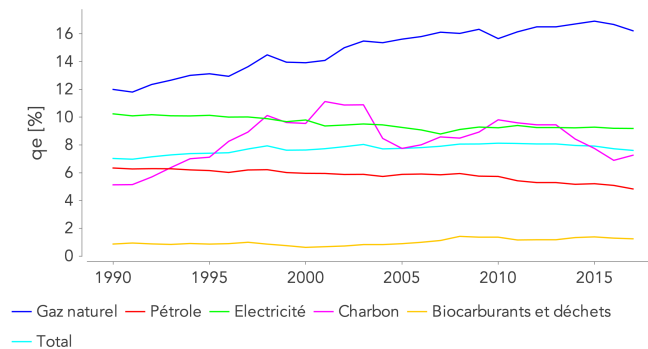


FIGURE 3 – Evolution de l'intensité énergétique du SE, par source d'énergie finale.

**Intensité énergétique du SF  $q_f$**  La tendance est globalement à la baisse ( $q_f$  diminue de 1.06% en moyenne entre 1990 et 2017), traduisant les gains d'efficacité énergétique au niveau de la production de biens finaux (voir Figure 4).

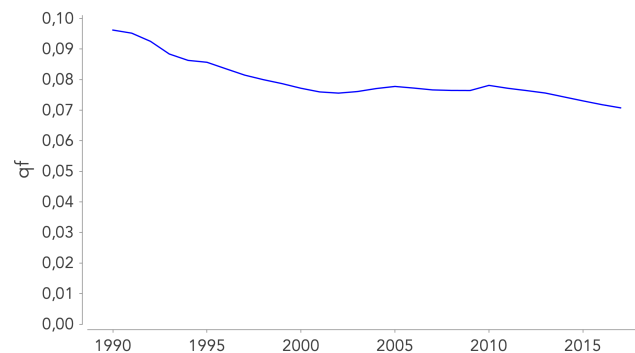


FIGURE 4 – Evolution de  $q_f$ , l'intensité énergétique du SF.

**Intensités capitalistiques  $v_e$  et  $v_f$**  Si on ignore les pics observés en 2009 (traduisant la baisse brutale du taux de croissance, due elle-même à la dernière grande crise financière),

ces paramètres sont relativement stables pendant la période analysée. Cette stabilité est cohérente avec celle de l'intensité capitaliste de l'économie (mesurée par le rapport  $v = K/PIB$ ), qui est un fait stylisé observé pour ces dernières décennies (Madsen *et al.* (2012); Jones (2016)) (voir Figure 5).

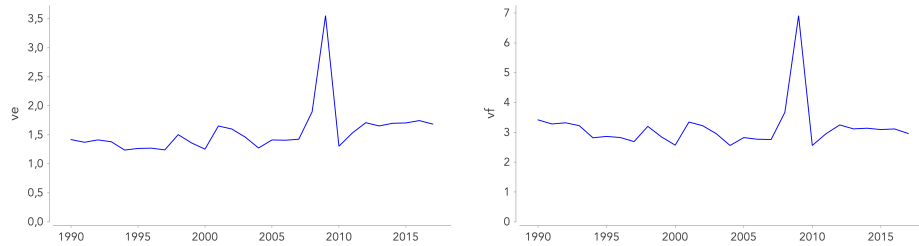


FIGURE 5 – Evolution des intensités capitalistes  $v_e$  et  $v_f$ .

**EROI** L'évolution de cette grandeur ne présente pas de tendance claire. Ceci est cohérent avec le fait qu'il en va de même de  $q_e$ , le principal déterminant du EROI. Si on se concentre sur la période 1990-2010 on pourrait conclure à une décroissance monotone du EROI, mais il a ensuite connu une légère hausse sur la période 2010-2017. Il faudra attendre les données des dernières années pour voir si cette hausse se confirme ou non (voir Figure 6).

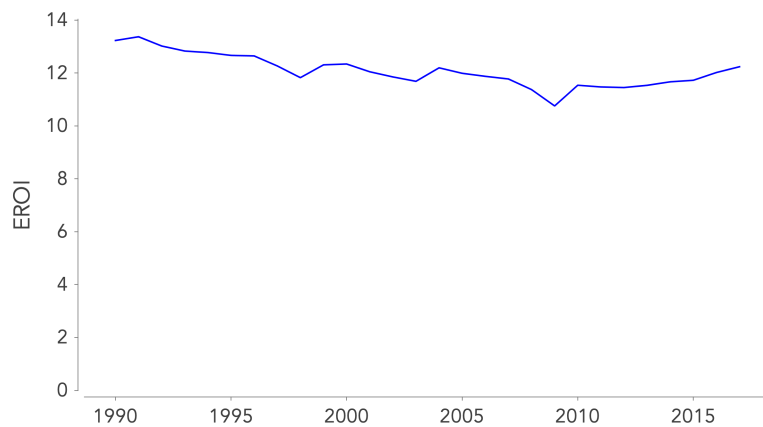


FIGURE 6 – Evolution du EROI.

**NER** A l'exception d'un pic vers le bas (dus à ceux de  $v_e$  et  $v_f$  et donc lié à la dernière grande crise financière), cette grandeur demeure plus ou moins constante. Les consommations intermédiaires et de capital de l'économie représentent donc une fraction stable du rapport  $Y_e/q_f$  pendant la période analysée (voir Figure 7).

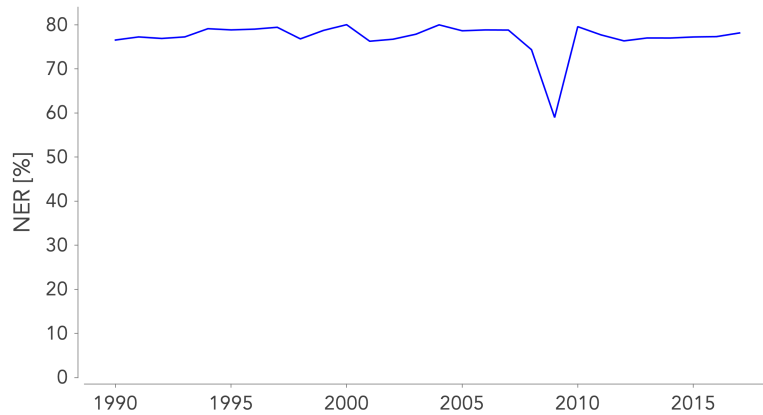


FIGURE 7 – Evolution du NER.

## 6 Conclusion

Cet article commence par développer un modèle macroéconomique simple à deux secteurs. Le secteur énergétique produit un flux d'énergie finale dont une partie est livrée directement à la consommation finale (privée et publique) et l'autre au secteur final. Le secteur final produit un bien à tout faire utilisé soit pour la consommation finale, soit pour renouveler (et éventuellement accroître) le stock de capital mis à la disposition des deux secteurs. Sur base de la calibration des paramètres techniques (intensités sectorielles en énergie et en capital, taux de dépréciation du capital), deux indicateurs sont ensuite calculés : (i) le EROI, défini comme le rapport entre l'énergie finale produite et la consommation énergétique (directe et indirecte) du secteur énergétique, et (ii) le NER, qui mesure la fraction de l'énergie finale réellement disponible, c-à-d déduction faite des besoins en énergie (directs et indirects) des deux secteurs.

Le modèle calibré au niveau mondial pour l'année de référence 2017 conduit à un EROI sociétal autour de 12. Cela signifie que 8% ( $= 1/EROI$ ) de l'énergie finale est consommée par le secteur énergétique lui-même, 92% ( $= 1 - 1/EROI$ ) restant disponible pour le reste de l'économie. Notre estimation du EROI est supérieure à la plupart des (rares) valeurs *planchers* proposées par la littérature concernant cet indicateur. Le NER est quand à lui estimé à 78%. Il en découle que la consommation (directe et indirecte) du secteur final représente 14% ( $= 92 - 78$ ) de l'énergie finale produite.

L'analyse du dénominateur du EROI révèle que 94% des apports totaux d'énergie au secteur énergétique se font sous forme directe. Ce résultat, en accord avec la littérature, illustre le fait que le système énergétique mondial actuel repose principalement sur les combustibles fossiles, dont les procédés d'exploration, d'extraction et de transformation exigent des quantités importantes d'énergie directe.

Une analyse de sensibilité est ensuite réalisée concernant des paramètres du modèle qui ont dû être estimés et dont les valeurs sont caractérisées par une certaine incertitude : la

part de la valeur ajoutée du secteur énergétique dans le PIB, la répartition du stock de capital entre les deux secteurs, et les taux de dépréciation du capital sectoriels. Globalement, les résultats de la calibration du modèle se révèlent peu sensibles aux variations de ces paramètres, en particulier le EROI et le NER qui dépendent principalement de données énergétiques qui sont observées.

La calibration du modèle sur la période 1990-2017 révèle que le EROI et le NER n'ont pas connu de variations significatives pendant les 30 dernières années. On constate seulement une faible diminution du EROI jusqu'à la crise de 2009, suivie d'une légère hausse par après.

Des travaux futurs pourraient exploiter ce modèle pour évaluer comment le EROI et le NER évolueraient avec une transition orientée vers un système énergétique basé principalement sur des énergies renouvelables intermittentes. En effet, une telle transition serait susceptible de profondément modifier la structure du système énergétique, ainsi que les besoins en capital de l'économie.

## 7 Annexes

### 7.1 Dérivation de (13)

Par rapport à Fagnart et Germain (2016), (i) il n'y a pas de consommation intermédiaire livrée par le SF au SE ou à lui-même et (ii) il y a en revanche livraison du SE à la consommation privée et publique ( $C_e \neq 0$ ). (1), (4), (5), (6), (7) impliquent les équations suivantes liant les productions sectorielles  $Y_i$  et les consommations finales  $C_i$  ( $i = e, f$ ) :

$$\begin{aligned} Y_e &= q_e Y_e + q_f Y_f + C_e \\ Y_f &= \delta_e v_e Y_e + \delta_f v_f Y_f + C_f + \Delta K \end{aligned}$$

Il en découle le système suivant :

$$\begin{cases} (1 - q_e)Y_e - q_f Y_f = C_e \\ -\delta_e v_e Y_e + (1 - \delta_f v_f)Y_f = C_f + \Delta K \triangleq D_f \end{cases} \quad (20)$$

En isolant  $Y_f$  dans la première équation et en substituant cette valeur dans la seconde, on trouve la relation suivante entre  $Y_e$ ,  $C_e$  et  $D_f$  :

$$(1 - \delta_f v_f) \frac{(1 - q_e)Y_e - C_e}{q_f} - \delta_e v_e Y_e = D_f$$

Soit  $\zeta = C_e/Y_e$  la fraction de la production énergétique vendue à la consommation finale. Alors l'équation précédente devient :

$$D_f = \left( (1 - \delta_f v_f) \frac{1 - q_e - \zeta}{q_f} - \delta_e v_e \right) Y_e$$

Cette équation donne la quantité de biens qui peut être livrée à la demande finale (somme de la consommation et de l'investissement net) à partir d'une certaine quantité d'énergie finale.

Le produit intérieur net (PIN) est égal au *PIB* moins la consommation de capital. (6) et (9)  $\Rightarrow PIN = C_f + I + pC_e - \delta K = C_f + \Delta K + pC_e = D_f + pC_e$ . En conséquence, on a

$D_f = PIN - pC_e$  et l'équation précédente donne une équation pour  $PIN$  en fonction des paramètres techniques, de la fraction  $\zeta$  et de la production  $Y_e$  :

$$PIN = \left( (1 - \delta_f v_f) \frac{1 - q_e - \zeta}{q_f} - \delta_e v_e \right) Y_e + p\zeta Y_e$$

ce qui conduit à (13).

## 7.2 Lien entre $v$ , $g$ et $g_K$

(4), (10) et (3) permettent d'écrire :

$$\Delta K = sPIB - \delta K = \left( \frac{s}{v} - \delta \right) K$$

Donc le taux d'accroissement du capital  $g_K$  est donné par :

$$g_k = \frac{\Delta K}{K} = \frac{s}{v} - \delta$$

Soit  $g$  le taux d'accroissement du  $PIB$  :  $g = \frac{\Delta PIB}{PIB}$ . Partant de (3) on peut écrire au premier ordre,  $g_v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta K}{K} - \frac{\Delta PIB}{PIB}$ , ce qui implique l'équation (18) :

$$g = g_k - g_v = \frac{s}{v} - \delta - g_v$$

La croissance du  $PIB$  résulte de la croissance du stock de capital et de la décroissance de l'intensité en capital de l'économie.

## 7.3 Validation de $g_v = 0$

Dans le cadre de la calibration de référence, on a considéré que l'intensité capitaliste de l'économie ( $v = \frac{K}{PIB}$ ) était constante, et que par conséquent  $g_v$  était nul. Cette hypothèse peut être validée comme suit. Si on fait l'exercice d'estimer  $v$  pour les années 1990 à 2017 via l'équation précédente et qu'on observe son évolution a posteriori, on observe que ce paramètre est plus ou moins constant, *quelle que soit l'hypothèse que l'on a posée a priori* pour son taux de variation  $g_v$ . Dès lors, on peut valider par l'absurde le postulat de départ  $g_v = 0$ .

## Références

- A. ARVESEN et E. G. HERTWICH : More caution is needed when using life cycle assessment to determine energy return on investment ( EROI ). *Energy Policy*, 76:1–6, 2015. ISSN 0301-4215. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.025>.
- R. U. AYRES, J. C. J. M. van den BERGH, D. LINDENBERGER et B. WARR : The underestimated contribution of energy to economic growth. *Struct. Chang. Econ. Dyn.*, 27:79–88, 2013. ISSN 0954349X. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.strueco.2013.07.004>.
- A. R. BRANDT : How Does Energy Resource Depletion Affect Prosperity? Mathematics of a Minimum Energy Return on Investment ( EROI ). *Biophys. Econ. Resour. Qual.*, 2(1):1–12, 2017. ISSN 2366-0120.

- A. R. BRANDT et M. DALE : 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*, 4:1211–1245, 2011.
- I. CAPELLÁN-PÉREZ, I. de BLAS, J. NIETO, C. de CASTRO, L. J. MIGUEL, O. CARPINTERO, M. MEDIAVILLA, L. F. LOBEJON, N. FERRERAS-ALONSO, P. RODRIGO, F. FRECHOSO et D. ALVAREZ-ANTELO : MEDEAS : a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints. *Energy Environ. Sci.*, (February), 2020.
- I. CAPELLÁN-PÉREZ, C. de CASTRO, L. JAVIER et M. GONZÁLEZ : Dynamic Energy Return on Energy Investment ( EROI ) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies Energy Return On energy Invested Energy Stored On energy Invested. *Energy Strateg. Rev.*, 26(July):100399, 2019. ISSN 2211-467X. URL <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>.
- V. COURT : An Estimation of Different Minimum Exergy Return Ratios Required for Society. *Biophys. Econ. Resour. Qual.*, 4(3):1–13, 2019. ISSN 2366-0120. URL <https://doi.org/10.1007/s41247-019-0059-6>.
- V. COURT et F. FIZAINÉ : Energy expenditure , economic growth , and the minimum EROI of society Energy expenditure , economic growth , and the minimum EROI of society. *Energy Policy*, 95(June 2018):172–186, 2016. ISSN 0301-4215. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.039>.
- M. DALE, S. KRUMDIECK et P. BODGER : Global energy modelling - A biophysical approach (GEMBA) Part 2 : Methodology. *Ecol. Econ.*, 73:158–167, 2012. ISSN 09218009. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.10.028>.
- EUROPEAN CENTRAL BANK : Estimates of the Euro Area capital stock. *ECB Mon. Bull.*, (May):45–47, 2006.
- J.-F. FAGNART et M. GERMAIN : Net energy ratio , EROEI and the macroeconomy. *Struct. Chang. Econ. Dyn.*, 37:121–126, 2016.
- N. GAGNON, C. A. S. HALL et L. BRINKER : A Preliminary Investigation of Energy Return on Energy Investment for Global Oil and Gas Production. (September), 2009.
- C. A. S. HALL, S. BALOGH et D. J. R. MURPHY : What is the minimum EROI that a sustainable society must have ? *Energies*, 2009. ISSN 19961073.
- C. I. JONES : *The Facts of Economic Growth*, vol. 2. Elsevier B.V., 1 éd., 2016. URL <http://dx.doi.org/10.1016/bs.hesmac.2016.03.002>.
- Z. KIS, N. PANDYA et R. H. KOPPELAAR : Electricity generation technologies : Comparison of materials use, energy return on investment, jobs creation and CO<sub>2</sub>emissions reduction. *Energy Policy*, 120(May):144–157, 2018. ISSN 03014215. URL <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.033>.
- R. KÜMMEL, D. LINDENBERGER et F. WEISER : The economic power of energy and the need to integrate it with energy policy. *Energy Policy*, 86:833–843, 2015.

- J. G. LAMBERT, C. A. S. HALL, S. BALOGH, A. GUPTA et M. ARNOLD : Energy, EROI and quality of life. *Energy Policy*, 64:153–167, 2014. ISSN 03014215.
- J. MADSEN, V. MISHRA et R. SMYTH : Is the output-capital ratio constant in the very long run? *Discuss. Pap. Dep. Econ. issn 1441-5429*, (March), 2012.
- D. J. MURPHY, C. A. S. HALL, M. DALE et C. CLEVELAND : Order from chaos : A preliminary protocol for determining the EROI of fuels. *Sustainability*, 2011. ISSN 20711050.
- K. RIBEIRO, S. KOBAYASHI, M. BEUTHE, J. GASCA, D. GREENE, D. S. LEE, Y. MUROMACHI, P. J. NEWTON, S. PLOTKIN, D. SPERLING, R. WIT, P. J. ZHOU, O. R. DAVIDSON, P. R. BOSCH, R. DAVE et U. KINGDOM : Transport and its infrastructure. *In Clim. Chang. 2007 Mitigation. Contrib. Work. Gr. III to Fourth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang. [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2007.
- STATISTICS CANADA : Depreciation Rates for the Productivity Accounts. *Can. Product. Rev.*, 2007.