

# Concepts et chiffres de l'énergie : Conversion d'énergie et analyse sur cycle de vie

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Delphine CHAREYRON - Hélène HORSIN MOLINARO  
Bernard MULTON

Édité le  
25/01/2021

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

*Le dossier « Concepts et chiffres de l'énergie » est co-rédigé et co-publié avec le site [Culture Sciences Physique](#). Les données sont tirées de nombreuses références (rapports de groupes de recherche, publications dans des revues spécialisées, rapports d'instituts nationaux...).*

Dans cette ressource, nous nous intéressons à la notion de cycle de vie de tout produit et plus particulièrement des convertisseurs d'énergie qui ont, comme principale caractéristique de consommer (convertir en réalité) de l'énergie (primaire ou finale<sup>1</sup> selon leur position dans le système énergétique) durant leur phase d'usage.

Dans la ressource « Concepts et chiffres de l'énergie : Comment définir le rendement d'un convertisseur d'énergie ? » [1], nous nous sommes intéressés aux notions de rendement qui caractérisent usuellement les convertisseurs d'énergie (à partir d'énergie primaire : électronucléaire, éolienne... ou à partir d'énergie finale : moteur thermique, chaudière, ampoule électrique, etc.). Nous avons pu nous rendre compte que la notion de rendement pouvait être restreinte au périmètre du convertisseur seul (en raisonnant en puissance ou en énergie) mais qu'elle pouvait également être étendue bien au-delà, en considérant l'origine de l'énergie finale consommée, les phases d'extraction des matériaux et de fabrication, etc., bien sûr, sa phase de fonctionnement « normal », enfin sa déconstruction et ou son recyclage, autrement dit : l'ensemble de son cycle de vie.

Du seul point de vue énergétique, seule la totalité de l'énergie **primaire non renouvelable**, consommée sur toute la vie du produit, doit être considérée car elle correspond à des ressources définitivement (aux échelles de temps humaines) détruites, contrairement aux énergies renouvelables de flux qui sont continûment approvisionnées par les cycles naturels.

Dans cette ressource, nous allons présenter ce qu'est l'analyse sur cycle de vie, qui peut être réalisée sur tout convertisseur d'énergie, de la même manière que sur tout produit [2].

## 1 – Cycle de vie d'un produit

Lorsque l'on s'intéresse au cycle de vie d'un produit, on prend en compte toute sa vie : de l'énergie et des matières premières nécessaires à sa construction, jusqu'à sa destruction et son recyclage, figure 1 [3] [4], tout en définissant cependant un périmètre précis. Ce périmètre joue un rôle important et doit être le plus étendu possible (le plus étendu serait le « système Terre » tout entier !). Par exemple, dans le périmètre, se trouvent la zone géographique d'origine des matières premières ainsi que celle d'utilisation du produit, incluant, le cas échéant, un mix énergétique connu de production des formes d'énergie finale mises en jeu.

---

<sup>1</sup> On retrouvera les définitions des énergies finale et primaire dans le [glossaire](#) du dossier Concepts et chiffres de l'énergie

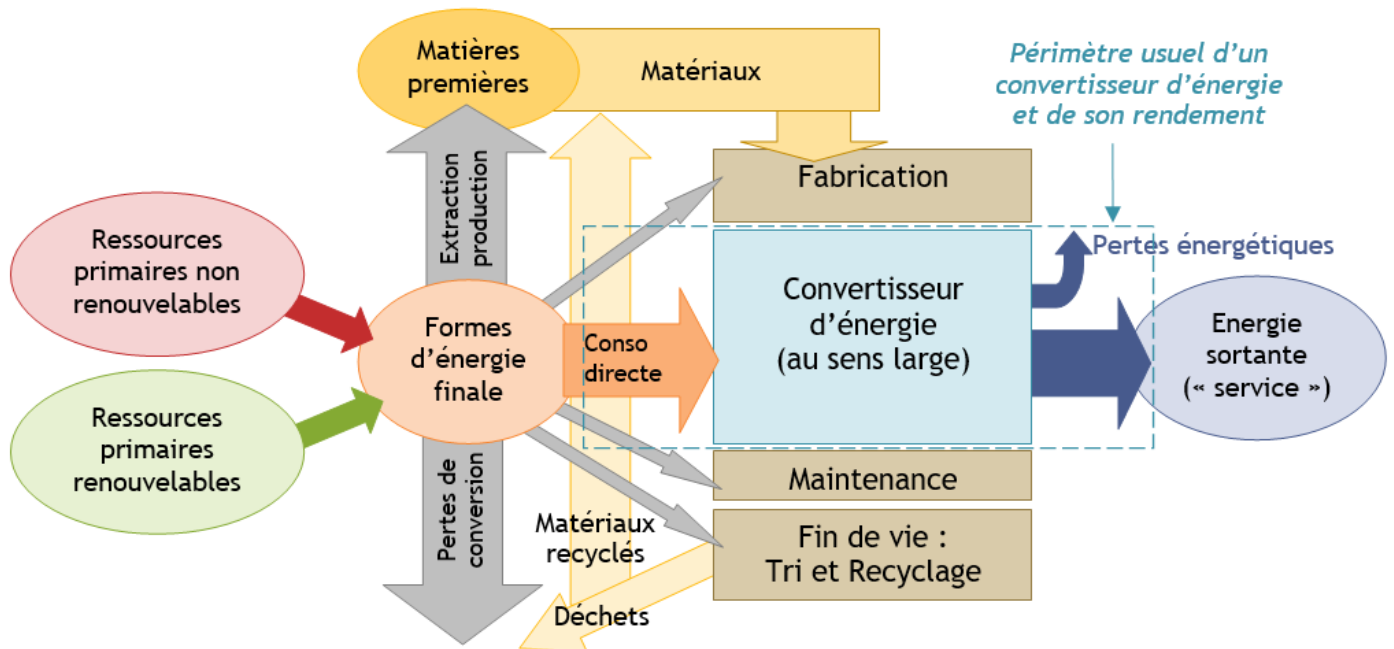


Figure 1 : Énergie consommée sur le cycle de vie d'un convertisseur, prise en compte de l'énergie grise, source B. Multon [1] [3]

L'ADEME a réalisé une courte vidéo<sup>2</sup> pour sensibiliser et expliquer au public le cycle de vie d'un produit, figure 2.

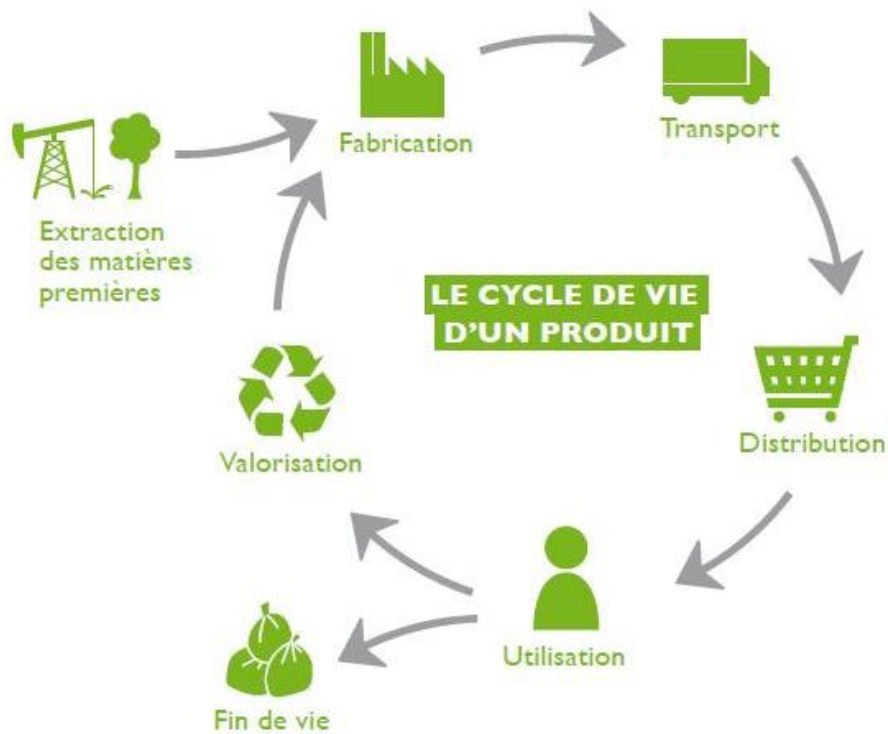


Figure 2 : Schéma du cycle de vie d'un produit, source [5]

Adopter le point de vue de cycle de vie d'un produit, permet de l'étudier dans sa globalité, et surtout de mieux le concevoir, en considérant les étapes de sa fabrication jusqu'à la prise en charge de ses déchets et son recyclage, c'est-à-dire l'éco-concevoir. En dehors de la conception, l'analyse

<sup>2</sup> Le cycle de vie d'un produit, qu'est-ce que c'est ? Vidéo de l'ADEME : [https://www.youtube.com/watch?v=SJq7i\\_3UODM](https://www.youtube.com/watch?v=SJq7i_3UODM)

sur cycle de vie permet de comparer des produits différents mais permettant de satisfaire le même besoin.

## 2 – Définition de l'analyse sur cycle de vie (ACV)

Les fondements de l'analyse sur cycle de vie (ACV, en anglais : LCA pour Life Cycle Assessment) ont émergé dans les années 70 [6]. L'ACV s'est progressivement formalisée jusqu'à sa normalisation durant les années 2000. Au sein de la famille ISO 14000 des normes internationales pour le management environnemental [7], elle fait désormais l'objet de normes (ISO 14040:2006 et ISO 14044:2006 [8] [9]) qui fournissent une base de travail et de calcul [10]. Ces deux normes s'intéressent uniquement aux impacts environnementaux, des considérations sociales, sociétales et économiques pourraient aussi entrer dans la balance [11].

L'analyse sur cycle de vie constitue une démarche indispensable pour mener à bien des démarches d'éco-conception [12] et de management environnemental. Dans ce contexte, les enjeux énergétiques et climatiques sont des moteurs tant du point de vue des choix que des normes soumises aux entreprises [13].

Les critères sont nombreux : quantité de matières premières utiles, dont les matières premières énergétiques non renouvelables, utilisation de ressources primaires ou recyclées et recyclables, pollution (eau, air, sol), contribution au réchauffement climatique global (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O,... rejetés), dégradation de la couche d'ozone, impacts sur les écosystèmes et la biodiversité, toxicité, etc. (figure 3).



Figure 3 : Impacts potentiels environnementaux associés à l'analyse sur cycle de vie.

*\*L'eutrophisation des milieux aquatiques est un déséquilibre du milieu provoqué par l'augmentation de la concentration de nutriments (azote et phosphore) dans le milieu. Elle est caractérisée par une croissance excessive de plantes et d'algues invasives qui asphyxient les écosystèmes, source Consumer's behaviour in assessing environmental impact of consumption [14]*

## 3 – Méthodologies pour réaliser l'analyse sur cycle de vie

Il existe de nombreuses **méthodes et bases de données** pour déterminer les effets ou dommages des substances utilisées sur l'environnement. Il s'agit de créer un inventaire et de lister, à chaque étape de la vie de l'objet, les éléments à prendre en compte et leur pondération dans le calcul final réalisé par des logiciels, en fonction des méthodes choisies. C'est un travail long, qui demande de l'organisation, beaucoup de données et n'est pas forcément facilement harmonisable mondialement. En effet l'impact dépend de nombreux paramètres locaux comme la distribution de la population humaine, les écosystèmes, les zones géographiques...

Les usages envisagés, dont leur durée, sont des paramètres aussi très importants. Il est d'ailleurs possible d'effectuer une analyse dynamique considérant l'évolution prévue d'un mix énergétique.

Il peut y avoir des effets dont les causes sont directement liées à la conception du produit et d'autres qui sont des conséquences plus lointaines ; par exemple la participation à la dégradation de la couche d'ozone engendre une augmentation des rayons UV touchant le sol et cause ensuite des problèmes de santé pour l'homme.

L'Union Européenne s'inscrit dans cette démarche et développe des outils de travail et d'évaluation des analyses de cycles de vie pour rendre compte de l'empreinte écologique de la consommation des citoyens européens, figure 4.

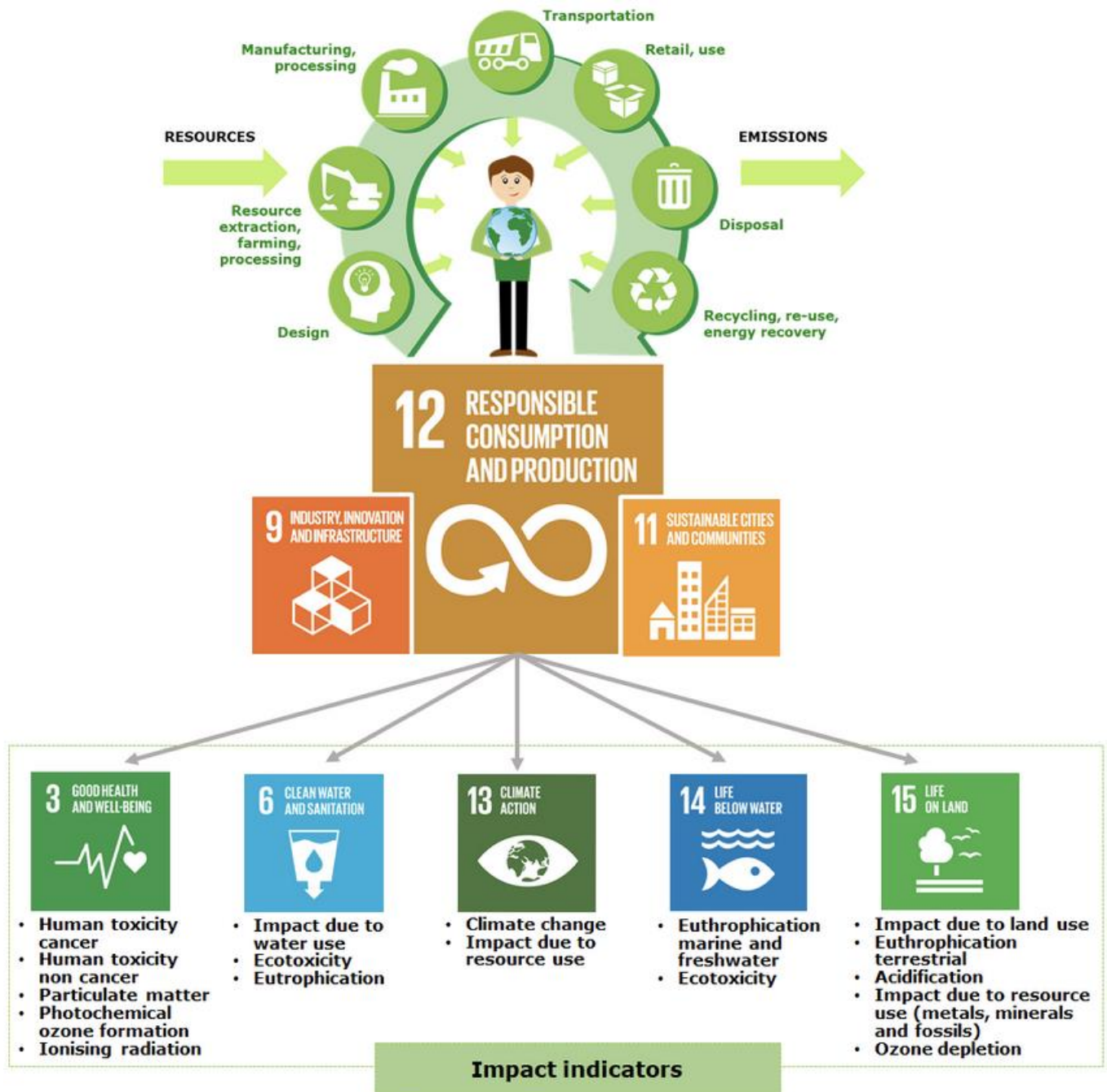


Figure 4 : Indicateurs et évaluation de l'impact environnemental de l'UE (LCA : Life Cycle Analysis), source Sustainable Consumption [14]

En janvier 2021, les indicateurs pour évaluer les impacts environnementaux de la consommation de l'UE étaient : 12-Production et consommation responsable ; 9-Industrie, innovation et infrastructure ; 11-Villes et communautés durables ; 3-Bonne santé et bien-être ; 6-Eau propre et assainissement ; 13-Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques ; 14-Vie aquatique ; et 15-Vie terrestre [14].

Ces indicateurs sont issus des 17 objectifs de développement durable [15] pour parvenir à un avenir meilleur et plus durable pour tous définis par les Nations Unies. Ils répondent aux défis mondiaux auxquels nous sommes confrontés, notamment ceux liés à la pauvreté, aux inégalités, au climat, à la dégradation de l'environnement, à la prospérité, à la paix et à la justice, figure 5.

## **OBJECTIFS** **DE DÉVELOPPEMENT DURABLE**



Figure 5 : Les 17 Objectifs de développement durable définis par les Nations Unies, source [15].

### 4 – Complexité des résultats

Il faut garder en tête que malgré le cadre donné par les normes, l'analyse sur cycle de vie d'une filière (par exemple un type de convertisseur d'énergie) est très complexe. Les résultats peuvent différer d'une étude à l'autre, en fonction de la localisation de l'installation et des caractéristiques spécifiques du système, mais également parfois en fonction des critères retenus. En effet, il arrive malheureusement que de complexes ACV servent à justifier des produits, c'est pourquoi il est fondamental de conserver un esprit très critique lors de la lecture de rapports d'ACV.

Comme nous venons de le voir, une quantité énorme de données est à collecter pour une seule étude sur cycle de vie. Ainsi, dans le cas présent de filières énergétiques, il est important d'observer différentes sources et de les analyser avec une grande attention pour obtenir des résultats pertinents.

### 5 – Analyses sur cycle de vie de filières énergétiques

Dans cette dernière partie, on propose de présenter rapidement quelques résultats d'études dont le nombre augmente sans cesse.

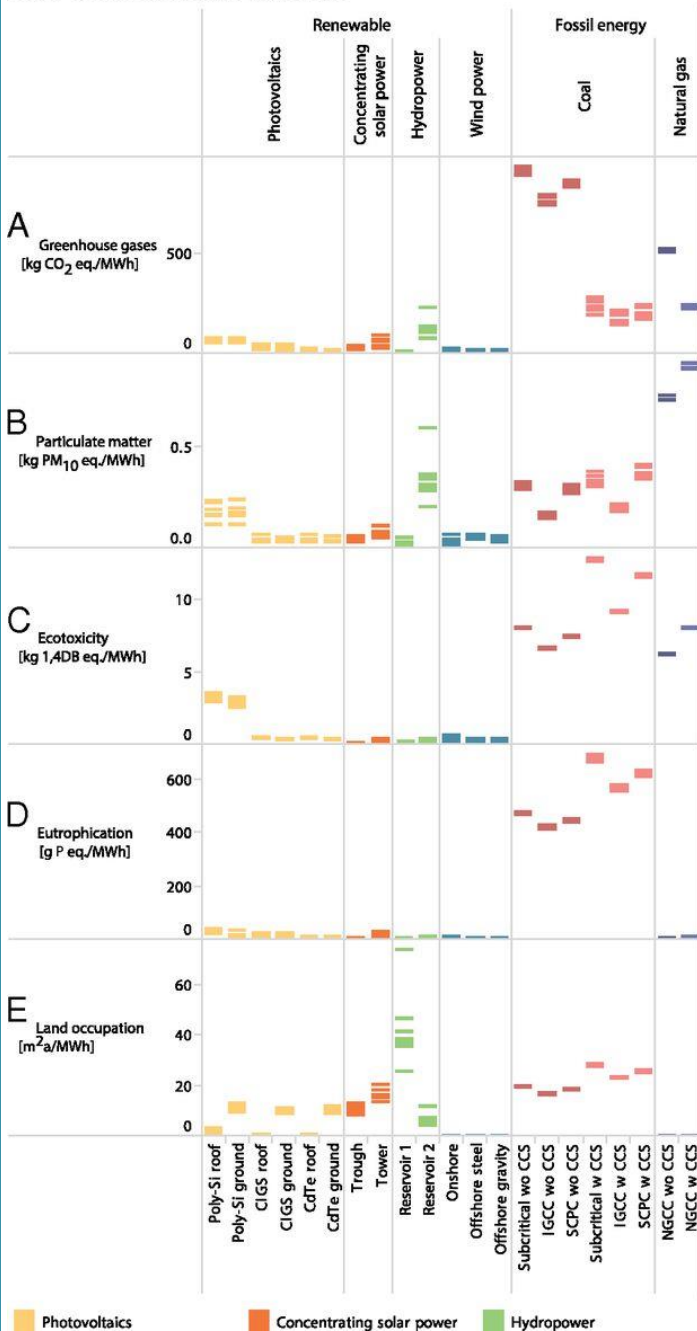
Comme nous l'avons évoqué plus haut, il est très difficile d'effectuer des comparaisons sur différentes filières de conversions d'énergie à cause des spécificités territoriales, économiques et propres à chaque territoire. On trouve néanmoins des études comparatives pour lesquelles, en majeure partie, on ne s'intéresse, qu'aux rejets de CO<sub>2</sub> parmi tous les autres critères cités précédemment.



Dans d'autres études plus complètes, on voit apparaitre beaucoup plus de facteurs environnementaux comme : la quantité de particules rejetées, la toxicité, l'impact sur le territoire (dégradation de l'environnement aquatique et occupation des terres). L'étude prend aussi en compte l'utilisation de minerais non renouvelables (mais recyclables, sauf en cas d'irradiation) : fer, cuivre, l'aluminium, l'énergie non renouvelable et la quantité de ciment utilisée à la fabrication des convertisseurs des filières de production d'électricité (figure 6). Dans cet exemple, les auteurs comparent les filières photovoltaïque, solaire concentrée, hydroélectrique, éolienne, charbon et gaz naturel, ils ont volontairement choisi de ne pas traiter la filière électronucléaire. Lorsqu'il s'agit de comparer des filières technologiques, il est nécessaire d'introduire une unité fonctionnelle, comme le MWh électrique dans la figure 6.

## Environmental impacts and material requirements of power generation technologies

### Unit environmental impacts



### Unit energy and material requirements

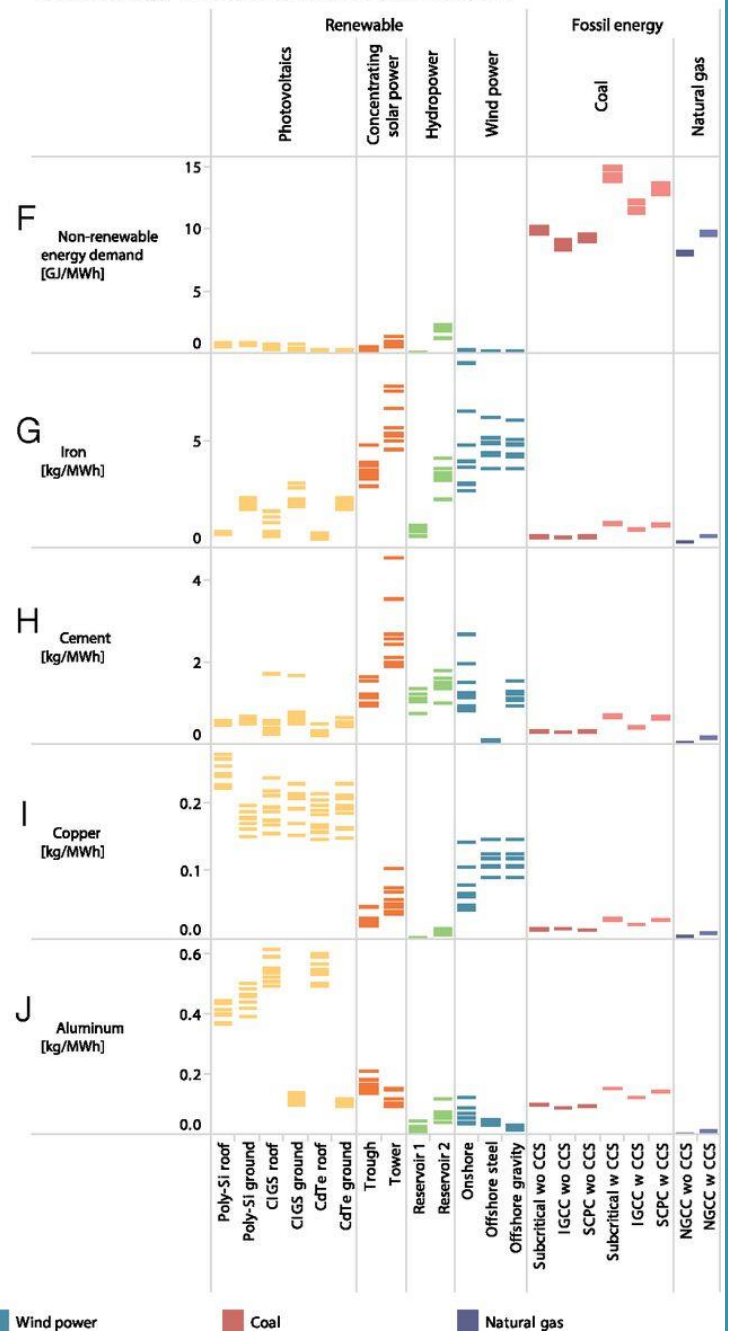


Figure 6 : Comparaison des impacts sur l'environnement à l'aide de l'analyse sur cycle de vie pour différentes filières de production d'énergie électrique, source [16]

Dans cette étude on réalise que quels que soient les convertisseurs d'énergie étudiés, leur impact n'est pas neutre sur l'environnement. En effet, par exemple, ce n'est pas la conversion d'énergie solaire en électricité à l'aide d'un panneau photovoltaïque qui va émettre du CO<sub>2</sub>, mais sa construction. De même, pour le solaire concentré, les éoliennes et les barrages, la quantité de ciment nécessaire est importante.

Comme nous l'avons vu dans la ressource « [Concepts et chiffres de l'énergie : Réserves et ressources en énergie et matières premières non énergétiques](#) » [17], il y a une pression forte sur les ressources minérales non énergétiques et les filières de recyclage commencent tout juste à se développer.

Dans le cas des barrages, le fait d'inonder de vastes superficies de terres végétalisées peut constituer une importante source d'émission de méthane durant la phase d'exploitation. C'est particulièrement le cas dans les forêts équatoriales non déforestées avant remplissage de la retenue d'eau, où de très grandes quantités de biomasse vont se décomposer de façon anaérobie et avoir une contribution au réchauffement global du même ordre de grandeur, voire supérieure à une production électrique identique à partir de combustibles fossiles.

Si l'on considère l'ensemble du cycle de vie et l'épuisement de ressources renouvelables, ce calcul du rendement d'un convertisseur conduit ainsi à des résultats très différents de ceux habituellement présentés.

Par exemple, dans le cas du nucléaire, les étapes nécessaires sont :

- Obtenir du combustible fissile : extraire les minéraux radioactifs (aujourd'hui de l'uranium naturel) dans des mines, transformer et transporter les minéraux vers les sites de transformation, enrichir l'uranium naturel pour augmenter sa teneur en isotope 235 (0,2% à l'état naturel et 3 à 4% pour qu'il devienne fissile) ;
- Fabriquer la centrale : nécessité de rassembler une grande quantité de fer, ciment, etc. ;
- Transformer l'énergie thermique nucléaire en électricité : dans le réacteur, la fission des atomes d'uranium produit une grande quantité de chaleur. Cette chaleur fait augmenter la température de l'eau qui circule autour du réacteur (circuit primaire). Le circuit primaire communique sa chaleur à un second circuit (appelé circuit secondaire) pour générer de la vapeur. La vapeur sous pression est détendue dans une turbine qui entraîne à son tour un alternateur. Enfin, comme dans toutes les installations de production électrique de grande puissance, un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour permettre son transport dans les lignes très haute tension [18].

Chaque étape de transformation de l'énergie entraîne irrémédiablement des pertes. Quel est le rendement, quels sont les impacts, de cette chaîne d'étapes depuis la mine à l'électricité produite, en passant par la construction de la centrale ?

Les analyses sur cycle de vie sont éminemment complexes, et ne sont pas développées ici. Par ailleurs un exemple de calcul de rendement soutenable est proposé dans la ressource « [Conversion d'énergie et efficacité énergétique](#) » (paragraphe 6.3 et 6.4) [3] en se basant sur le rapport de l'énergie finale produite ramenée à l'énergie consommée durant toute la vie de l'installation. Le rendement soutenable est calculé pour deux cas de conversion d'énergie (électronucléaire et photovoltaïque).

Autre exemple, dans le cas de l'éolien, les étapes nécessaires sont :

- Fabriquer l'éolienne : nécessité de rassembler une grande quantité de fer, ciment, etc. ;
- Transformer l'énergie mécanique en électricité : le vent vient mettre en rotation la turbine de l'éolienne qui, selon les cas, entraîne un multiplicateur de vitesse à engrenages. Ce

dernier entraîne en rotation un générateur électrique associé à un convertisseur électronique de puissance. Un transformateur situé à l'intérieur du mât, élève ensuite la tension du courant électrique produit par la chaîne de conversion pour être transporté dans un câble souterrain ou sous-marin jusqu'à un autre transformateur qui élève encore sa tension pour le transport sur les lignes très haute tension.

De la même manière pour cette filière, chaque étape de transformation de l'énergie entraîne irrémédiablement des pertes. Quel est le rendement, quels sont les impacts, de cette chaîne d'étapes depuis la construction de l'éolienne la mine à l'électricité produite ?



Figure 7 : Centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine, source [19]



Figure 8 : Parc éolien, source [18]

## 6 – Conclusion

Les analyses sur cycles de vie permettent de prendre en compte un grand nombre de critères environnementaux afin de considérer la totalité du cycle du convertisseur d'énergie à l'intérieur d'un périmètre le plus étendu possible. Elles sont de plus en plus reconnues comme étant la meilleure façon de réduire nos impacts environnementaux et le nombre d'études est en pleine croissance. La figure 9 présente le nombre de publications scientifiques éditées par an contenant les mots *Life Cycle Assessment energy* dans la base de recherche de l'éditeur *Science Direct* regroupant plus de 3 400 journaux scientifiques.

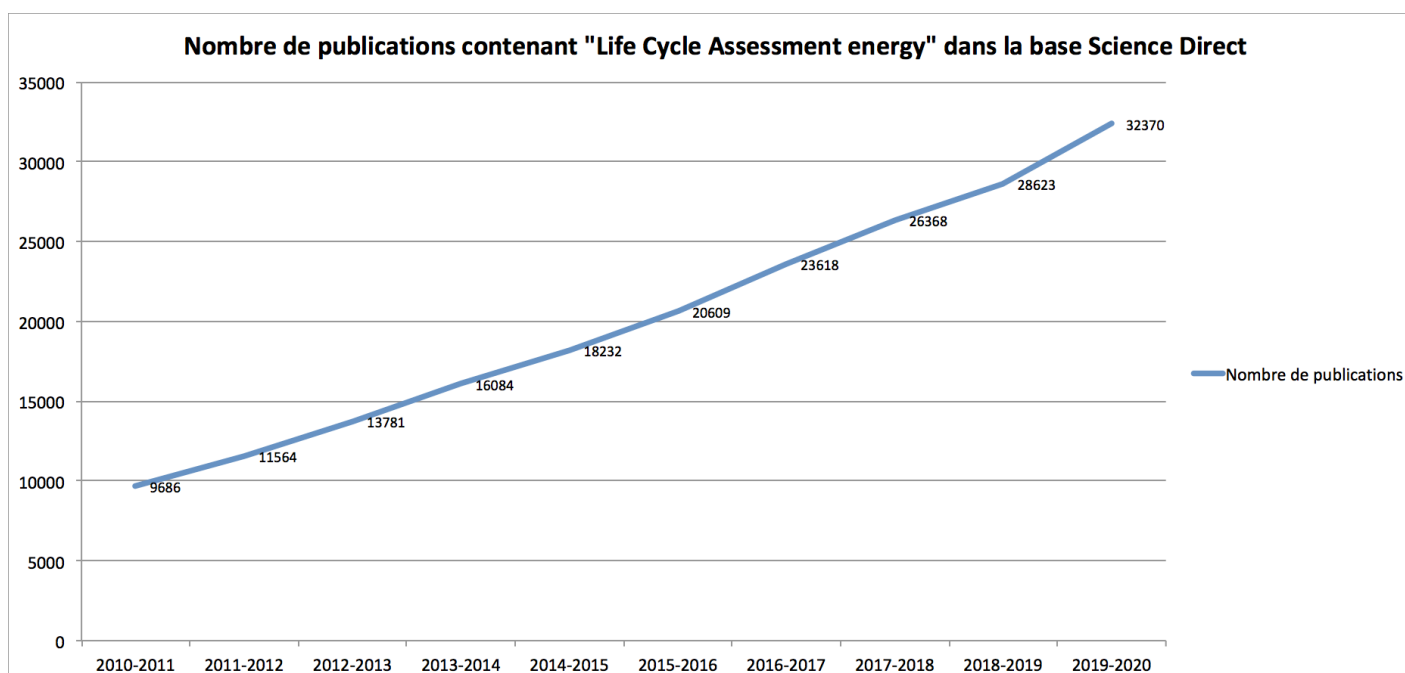


Figure 9 : Évolution du nombre de publications sur l'analyse sur cycle de vie en rapport avec l'énergie entre 2010 et 2020, source d'après [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

En novembre 2020, on comptait 168 916 articles cumulés correspondants à ces termes.



En effet, la situation environnementale de notre planète encourage le développement de telles études. Actuellement de nombreux minéraux dont le sable, consommé essentiellement pour la production de béton, sont sous pression. L'effondrement de la biodiversité et le dérèglement climatique nous obligent à trouver des solutions pour réduire au maximum nos impacts environnementaux et, en particulier, nos rejets de gaz à effet de serre, notamment le CO<sub>2</sub> (principalement issus de la transformation énergétique des combustibles fossiles). Enfin, d'un point de vue purement énergétique, il paraît tout à fait légitime de considérer la totalité de la chaîne des transformations, de l'extraction minière jusqu'au recyclage des déchets (à condition qu'ils ne soient pas irradiés) pour pouvoir évaluer de façon pertinente le rendement d'une filière énergétique dans un contexte de développement durable.

### Dossier Concepts et Chiffres de l'Énergie

Retrouvez toutes les ressources du dossier « [Concepts et Chiffres de l'Énergie](#) »

Retrouvez « Concepts et chiffres de l'énergie » sur le site [Culture Sciences Physique](#)

## Références :

- [1]: Concepts et chiffres de l'énergie : Comment définir le rendement d'un convertisseur d'énergie ? D. Chareyron, H. Horsin Molinaro, B. Multon, janvier 2021, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/les-chiffres-de-lenergie-comment-definir-un-rendement](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/les-chiffres-de-lenergie-comment-definir-un-rendement)
- [2]: Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan, O. Jolliet et al., Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 3<sup>ème</sup> édit. 2017
- [3]: Conversion d'énergie et efficacité énergétique, B. Multon, H. Horsin Molinaro, Septembre 2018, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/conversion-denergie-et-efficacite-energetique](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/conversion-denergie-et-efficacite-energetique)
- [4]: L'analyse sur cycle de vie, mis à jour juin 2018, site de l'ADEME, <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>
- [5]: Allongement de la durée de vie des produits, ADEME, Mars 2016, <https://presse.ademe.fr/2016/03/avis-allongement-de-la-duree-de-vie-des-produits.html>
- [6]: Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future, J. B. Guinée and al., 2010, Environ. Sci. Techno 2011, 45, 1, 90-96, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es101316v>
- [7]: La famille 14000 des normes internationales pour le management environnemental, ISO, 2009, [https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/fr/theiso14000family\\_2009.pdf](https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/fr/theiso14000family_2009.pdf)
- [8]: Norme ISO 14040:2006, Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre, <https://www.iso.org/fr/standard/37456.html>
- [9]: Norme ISO 14044:2006, Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices, <https://www.iso.org/fr/standard/38498.html>

[10]: Modèles simplifiés d'Analyse de Cycle de Vie : cadre méthodologique et applications aux filières de conversion d'énergie, Thèse de doctorat de Pierryves Padey, 2013, <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01057847/document>

[11]: L'analyse sur cycle de vie d'un produit ou d'un service, Les cahiers du développement durable (Belgique), <http://les.cahiers-developpement-durable.be/outils/analyse-du-cycle-de-vie/>

[12]: L'éco-production, produire sans détruire, B. Anglade, H. Horsin Molinaro, mai 2020, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/ecoproduction-produire-sans-detruire](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/ecoproduction-produire-sans-detruire)

[13]: Méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), UVED, [http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03\\_010\\_acv\\_1.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_010_acv_1.html)

[14]: European Platform on Life Cycle Assessment.  
<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/sustainableConsumption.html>

[15] Objectifs de développement durable, 17 objectifs pour sauver le monde, Nations Unies, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

[16]: Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies, Proceeding of the National Academy of sciences of the USA, <https://www.pnas.org/content/112/20/6277>

[17]: Concepts et chiffres de l'énergie : réserves et ressources en énergie et matières premières non énergétiques, D. Chareyron, H. Horsin Molinaro, B. Multon, octobre 2020, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/les-chiffres-de-lenergie-reserves-et-ressources-en-energie-et-matieres-premieres-non-energetiques](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/les-chiffres-de-lenergie-reserves-et-ressources-en-energie-et-matieres-premieres-non-energetiques)

[18]: Le fonctionnement d'une centrale nucléaire, EDF, <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-nucleaire>

[19]: Le fonctionnement d'une éolienne, <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-eolienne>