

Réflexions autour de la notion d'EROI. Illustration avec le photovoltaïque et l'hydrogène

Par Didier PILLET

Membre permanent du Conseil général de l'économie

Dans le cadre de la transition énergétique et du processus de décarbonation de l'économie, les énergies « bas-carbone » sont appelées à jouer un rôle de premier plan. On pense bien sûr aux énergies renouvelables telles que le photovoltaïque et l'éolien, ainsi qu'au nucléaire dont l'empreinte carbone reste à ce jour relativement basse. Cependant, s'agissant de l'implémentation de leurs infrastructures de base, ces systèmes énergétiques restent pour l'heure encore fortement dépendants des énergies fossiles. Ces dernières présentant encore de nos jours des ratios énergétiques (EROI) relativement favorables, ce qui influe sur les EROIs des systèmes photovoltaïques et éoliens, et qui conduit à surestimer leurs performances énergétiques. Un regard attentif des principes physiques à la base de l'évaluation des EROIs de ces deux systèmes, fondés tous les deux sur l'exploitation de flux énergétiques, permet par ailleurs de mieux cerner leur potentiel réel sur le plan des performances énergétiques. Un éclairage est tout particulièrement apporté concernant le photovoltaïque pour ce qui concerne le périmètre à prendre en compte dans l'évaluation de l'énergie consommée dans le cadre de l'implémentation de ce système énergétique. Enfin, la façon dont intervient la notion de rendement dans l'évaluation des EROIs, une notion particulièrement sensible pour ce qui concerne la production de l'hydrogène, fait ressortir toute l'importance qu'il y a à disposer d'une base énergétique sous-jacente à la fois abondante, bon marché, et présentant des EROI relativement élevés, autant d'éléments indispensables à la bonne marche de l'économie, et qui complique singulièrement le processus de sa décarbonation.

Introduction

Le calcul de l'EROI (*Energy Return Over energy Invested* ou Taux de Retour Énergétique, TRE, en français) est souvent présenté comme devant nécessairement aboutir à des valeurs supérieures à l'unité mais est-ce toujours le cas ? Et un EROI inférieur à l'unité fait-il sens ? Que se passe-t-il lorsque plusieurs formes d'énergie interviennent dans le calcul de ce ratio ? Par ailleurs, quels liens peut-on établir entre la notion d'EROI, dont on s'attache d'une manière générale à vérifier qu'il est bien supérieur à l'unité, et la notion de rendement intervenant dans les processus physique de conversion, dont on sait qu'il présente des valeurs systématiquement inférieures à l'unité ? Dans cet article, nous serons amenés à revisiter quelques principes physiques qui, de manière générale, sous-tendent le fonctionnement des systèmes énergétiques à la base du fonctionnement de nos sociétés.

Nous aborderons ces questions à travers quelques exemples emblématiques, en traitant notamment le cas du photovoltaïque et de l'hydrogène, actuellement au cœur des stratégies de transition énergétique et de décarbonation, stratégies dont nous examinerons les conditions de réalisation, en se replaçant dans une perspective élargie à l'ensemble des énergies bas-carbone.

Une énergie présentant un EROI inférieur à l'unité : est-ce problématique ?

La notion d'EROI¹ est, de manière classique, souvent illustrée par la nécessité pour un être vivant de ne pas dépenser plus d'énergie dans la recherche de sa nourriture, que celle nécessitée par son métabolisme. De la même manière, transposé dans le cadre du fonctionnement d'une économie, ce principe implique que l'énergie dépensée pour extraire l'énergie indispensable au fonctionnement de cette économie n'excède pas la quantité minimale nécessaire au maintien de cette dernière.

Pourtant, en prenant l'exemple du secteur alimentaire², ce n'est pas ce que l'on observe dans la mesure où, au sein des pays développés tout au moins, le ratio dit « de la fourche à la fourchette » peut aller jusqu'à

¹ Pour plus de détails sur la notion d'EROI, voir dans ce numéro, l'article de Jacques Treiner et Gérard Bonhomme.

² Ce sujet est traité plus en détail dans l'article de Félix Lallemand, inclus également dans ce numéro.

des valeurs de l'ordre de 1 à 8³. Autrement dit, dans ce cas extrême, pour une calorie arrivant dans l'assiette, l'ensemble de la filière aura dépensé l'équivalent énergétique de 8 calories.

L'explication de ce qui peut paraître une anomalie se trouve, on le sait, dans la très forte dépendance de cette filière aux énergies hydrocarbonées, à savoir le pétrole et le gaz, ce qui, par exemple, peut faire dire à certains que l'agriculture devrait en fait être définie comme une sorte de « pétroculture », tant est grande cette dépendance. À y regarder de plus près, on assiste en fait, dans ce cas précis, à une conversion énergétique passant d'une énergie hydrocarbonée, à une énergie protéinique. Et comme dans tout processus de conversion d'une forme d'énergie en une autre, il existe des pertes que l'on traduit par un rendement, dont la valeur est systématiquement inférieure à l'unité.

Ces pertes sont bien sûr payées par le surplus énergétique procuré, de manière sous-jacente, par les systèmes énergétiques présentant des ratios énergétiques favorables, au premier rang desquels figurent les systèmes pétroliers, gaziers, mais aussi charbonniers. Ces systèmes ont en plus la particularité d'offrir des quantités d'énergie à la fois abondantes et relativement peu chères, tout au moins encore pour les deux à trois décennies à venir, et en excluant bien entendu les fluctuations conjoncturelles des prix de l'énergie.

Par ailleurs, pour ce qui concerne en particulier le secteur alimentaire, si des énergies fossiles abondantes et peu chères contribuent effectivement à procurer une alimentation abondante, et surtout bon marché, sa dépendance aux énergies hydrocarbonées ne tarde pas à se signaler par une flambée des prix alimentaires lorsque les prix de ces énergies subissent eux-mêmes une envolée. C'est par exemple ce qui s'est produit en 2007-2008 avec la forte augmentation des prix du pétrole, et qui s'est traduit par ce que l'on a appelé les émeutes de la faim.

Plus récemment la brusque montée des prix du gaz observée en 2021-2022 a, cette fois-ci, entraîné une pression passagère à la hausse du prix des engrais azotés, ce qui, prolongé sur une plus grande période, ne manquerait pas de se répercuter sur les prix pratiqués tout le long de la chaîne de production alimentaire.

On voit donc que, pour un système énergétique donné, un EROI inférieur à l'unité peut faire sens si l'on considère qu'il correspond à une conversion énergétique permettant de produire une énergie sous une forme utile à une application donnée. Ainsi, si le gaz et le pétrole ne sont pas assimilables tels quels par un organisme vivant, leur utilisation dans le convertisseur constitué de l'ensemble de la chaîne alimentaire permet d'obtenir la forme d'énergie appropriée pour ce même organisme.

On l'a vu avec l'alimentaire, mais on pourrait également, autre exemple parmi bien d'autres, évoquer la fabrication de carburant synthétique à partir de charbon (CTL, ou *Coal to Liquid*) qui est un autre type de conversion énergétique, permettant cette fois-ci de produire une

forme d'énergie assimilable par un moteur à combustion interne. Il y a là aussi un prix énergétique à payer, celui correspondant aux pertes de conversion, ces dernières se traduisant, comme on l'a vu, par un rendement inférieur à l'unité.

Le point important à retenir pour toutes ces configurations d'EROI inférieur à l'unité, c'est qu'elles ne sont pas nécessairement problématiques, mais qu'elles ne peuvent être viables énergétiquement et économiquement que dans la mesure où elles sont supportées par des sources d'énergie, à la fois abondantes, bon marché et présentant des ratios énergétiques importants. C'est bien sûr, comme signalé plus haut, le rôle joué actuellement, et en tout premier lieu par les énergies fossiles : pétrole, gaz, mais aussi charbon.

Qu'en est-il d'une énergie présentant un EROI supérieur à l'unité ?

On pourrait affirmer d'emblée d'une énergie dont l'EROI est supérieure à 1 qu'elle ne pose *a priori* pas de problème de viabilité. Qu'en est-il en réalité ? Pour répondre à cette question, il faut revenir sur ce qui a permis, et qui permet encore, l'obtention de ces ratios énergétiques supérieurs à l'unité.

Tout d'abord un constat : en matière énergétique, aucune transformation, ni aucune conversion ne peut se réaliser sans pertes. Cette affirmation est une simple conséquence des lois de la physique, en l'occurrence celles de la thermodynamique, qui nous autorisent ici à généraliser les observations faites à partir des quelques exemples donnés plus haut. Dit autrement, les processus de conversion énergétique présentent tous, systématiquement, des rendements inférieurs à l'unité.

Comment alors expliquer l'existence d'EROIs supérieurs à l'unité ? Ce paradoxe n'est bien sûr qu'apparent comme on va le voir dans deux contextes particuliers, à savoir : le cas des énergies de stock, et celui des énergies de flux.

Le cas des énergies de stock

Si l'on considère les énergies fossiles, pétrole, gaz et charbon, on parle volontiers, et à juste titre, d'énergie de stocks. Des stocks, fort importants par ailleurs, qui ont été constitués sur des périodes de l'ordre de dizaines de millions d'années, et qui sont à l'origine le résultat de processus de conversion énergétique présentant des rendements de quelques pourcents. Ce sont là des rendements similaires à ceux observés lors de la conversion du rayonnement solaire en matières organiques et végétales, celles-ci assurant par là même une fonction de stockage de l'énergie solaire. Des rendements certes faibles, mais qui sur des durées de l'ordre de dizaines de millions d'années ont conduit à la constitution des stocks très importants de matières énergétiques fossiles que nous avons appris à exploiter pour assurer à la fois notre développement économique, ainsi que les progrès techniques qui ont permis la progression de notre niveau de vie.

³ Ce ratio varie bien évidemment d'une région à l'autre, ou d'un pays à l'autre.

Du point de vue de la comptabilité énergétique, ces stocks ont pu être exploités en ne considérant que le coût énergétique associé à leur extraction, leurs contenus énergétiques intrinsèques pouvant être considérés comme un cadeau de la nature, et donc gratuits d'un point de vue économique. C'est ainsi que, à ses débuts dans les années 1930, le développement de l'industrie pétrolière au Texas a pu présenter un ratio énergétique (EROI) de l'ordre de 100 :1 en sortie de puits, c'est à dire que pour extraire 100 barils de pétrole, il n'en coûtait qu'un seul baril. On constate depuis une lente érosion de ce ratio, traduisant la difficulté croissante qu'il y a à extraire ce pétrole dont les gisements exploités sont de plus en plus profonds et difficiles d'accès.

Ce qui est dit ici avec le pétrole peut être repris pour le charbon et le gaz naturel, dont les stocks ont été de la même manière constitués sur de très grandes périodes, selon des processus présentant des rendements relativement faibles, et dont on jouit actuellement sans contrepartie aucune, si ce n'est à travers les coûts minimaux, à la fois économique et énergétique, nécessités pour leur extraction.

Pour ce qui concerne l'uranium dont on tire de l'énergie très majoritairement à partir de ^{235}U , l'un de ses isotopes, la constitution de ses stocks est de nature très différente de celle des énergies fossiles. Ceux-ci se sont en effet constitués à la suite de l'effondrement du cœur d'étoiles massives, donnant lieu aux événements de type « supernovæ » intervenant à partir de la fusion du fer, les mécanismes de fusion nucléaire des éléments au-delà du fer étant endothermiques. La matière externe de ces étoiles, soufflée par l'onde de pression générée par le contre-choc de la matière interne se fracassant sur le cœur, est alors traversée, durant une poignée de secondes, par un énorme flux de neutrinos et de neutrons, ces derniers étant à l'origine de la formation des éléments plus lourds que le fer, dont l'uranium, par captures successives. Comme pour les autres énergies de stocks évoquées ci-dessus, la ressource uranium est également soumise à un phénomène de déplétion, conduisant de la même façon à une lente érosion des ratios énergétiques de cette filière énergétique⁴.

Le cas des énergies de flux

Avec les énergies de flux, il ne s'agit plus d'extraire des matières énergétiques, mais de capter l'énergie portée par un flux. Cela s'accompagne généralement d'une conversion d'une forme d'énergie à une autre.

C'est ainsi le cas du rayonnement solaire capté par un ensemble de cellules photovoltaïques dont la fonction est de transformer le rayonnement électromagnétique du flux solaire, en électricité. Du point de vue énergétique, et pour être plus précis, l'opération consiste à convertir l'énergie des photons émis par une source lumineuse (ici le soleil), en une énergie électrochimique qui consiste à faire passer les électrons présents au sein de la cellule, d'un niveau de potentiel électrique, à un niveau supérieur, permettant ainsi la circulation d'un

courant électrique lorsque les deux pôles du groupe de cellules sont refermés sur un récepteur.

Nombre d'exemples pourraient être donnés pour illustrer la séquence captation-conversion. Parmi ceux-ci, on peut bien sûr citer les systèmes éoliens où de l'énergie mécanique, portée par l'air en mouvement, est convertie là aussi en électricité, mais selon un autre principe que dans le cas du photovoltaïque, en l'occurrence celui basé sur l'induction magnétique. Un autre exemple intéressant est celui des grands barrages hydroélectriques où c'est cette fois-ci de l'énergie gravifique qui intervient en convertissant l'énergie potentielle de gravitation, en énergie mécanique, elle-même convertie en énergie électrique par turbinage de l'eau de pluie captée sur l'ensemble du bassin versant du cours d'eau alimentant le barrage.

Pour chacun des systèmes énergétiques basés sur des énergies de flux, le calcul de l'EROI tire avantageusement partie du caractère gratuit, au sens monétaire et énergétique, de l'énergie associée à ces flux (par exemple, solaire, éolien, hydroélectricité)⁵. Cela conduit généralement à des ratios supérieurs à l'unité. Ceux-ci seront plus ou moins importants selon les rendements associés aux processus de conversion, ainsi que selon la quantité d'énergie utilisée lors des phases de construction des infrastructures et d'exploitation de ces dernières.

Si l'on devait illustrer les propos ci-dessus à partir d'un système énergétique, le cas de la pompe à chaleur (PAC) s'y prêterait fort bien. Ainsi, à partir du schéma simplifié de principe d'une PAC en mode chauffage (voir la Figure 1 de la page suivante), on voit que l'expression du *Coefficient de performance* (COP), $\varepsilon = Q_2/W$, ne fait intervenir que la chaleur utile Q_2 , ainsi que le travail W qui est l'unique composante « payante », au sens économique, de l'expression du COP. En revanche, la chaleur Q_1 , qui est fournie par l'environnement extérieur, est considérée comme gratuite et n'intervient donc pas dans le calcul du COP. Ce prélèvement de chaleur est bien sûr compensé par les apports de chaleur extérieurs, comme l'énergie solaire.

On aura noté au passage la relation $Q_2 = Q_1 + W$ qui est la traduction du principe de conservation de l'énergie,

⁵ À y regarder de plus près les quelques exemples donnés ici peuvent se ramener à l'énergie dispensée par le soleil qui alimente de fait : 1) le cycle de l'eau (avec très schématiquement les étapes suivantes : évaporation → condensation → précipitation → puis stockage dans les barrages hydroélectriques et retour dans le milieu naturel) ; 2) les différentiels de pression au sein de l'atmosphère, entre les zones équatoriales chaudes et les zones polaires, ceci se traduisant par des mouvements de masses d'air, plus ou moins importants selon les paramètres d'insolation. Par ailleurs si l'on remonte un peu plus la chaîne énergétique, on constatera que ce flux d'énergie solaire est en fait alimenté par l'énorme masse d'hydrogène transformée chaque instant en hélium au centre du soleil, où de l'énergie nucléaire est ainsi convertie en chaleur, de l'hydrogène constitué par ailleurs dans les toutes premières minutes d'existence de l'Univers (voir « Les 3 premières minutes de l'Univers », par Steven Weinberg). Et à chacune de ces étapes de conversion sont bien sûr attachés des processus physiques présentant des rendements inférieurs à l'unité, voire très inférieurs pour l'énergie solaire captée par la surface terrestre.

⁴ Voir à ce sujet, dans ce même numéro, l'article de J. W. Storm van Leeuwen et Didier Pillet.

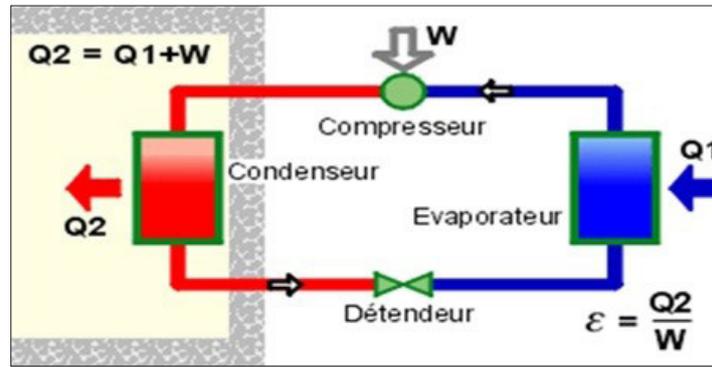


Figure 1 : Échanges énergétiques lors du fonctionnement d'une PAC en mode chauffage (Source : http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaaleur/copy_types-de-pac).

et qui correspond au *premier principe de la thermodynamique*. Mais le *second principe de la thermodynamique* n'est pas bien loin. En effet, le schéma ci-contre, dans sa présentation de la PAC, peut être considéré comme décrivant une situation de fonctionnement idéal, c'est-à-dire sans pertes, et caractérisé par des rendements égaux à l'unité. En réalité, il n'en est rien comme l'illustre la Figure 2 ci-dessous où l'on notera l'influence du périmètre d'évaluation du COP sur les performances de la PAC.

Quelques considérations annexes sur l'EROI

On notera au préalable que si l'évaluation de l'énergie obtenue par un système énergétique ne pose généra-

lement pas de difficulté particulière, il n'en va pas de même de l'énergie relative aux phases de construction/exploitation du système énergétique en question. C'est ce que nous allons illustrer dans les paragraphes qui suivent avec le cas du photovoltaïque, avant d'examiner les enjeux attachés à l'hydrogène dans le cadre de la transition énergétique et de la décarbonation de l'économie.

Impact des consommations énergétiques associées au photovoltaïque

Comme on l'a évoqué ci-dessus, pour un système énergétique, quel qu'il soit, la difficulté majeure relative à l'évaluation d'un ratio énergétique tel que l'EROI, réside dans l'évaluation du périmètre à prendre en compte dans les phases de construction et d'exploitation du système dans son ensemble. C'est notamment

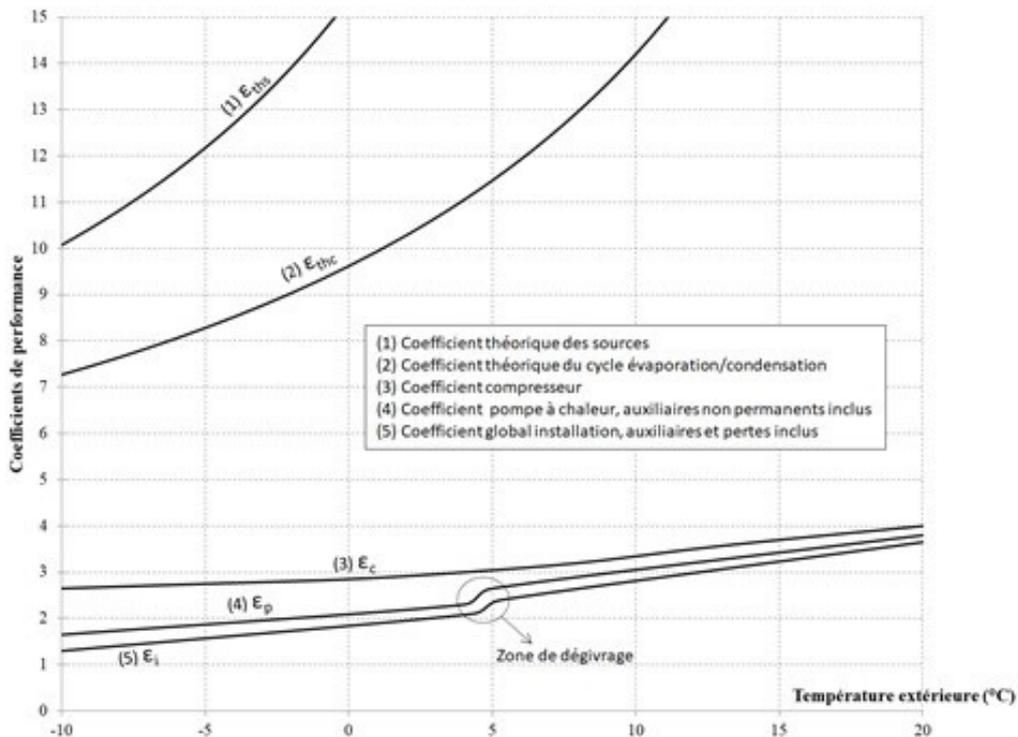


Figure 2 : Coefficients de performance pour une PAC Air-Air, avec une température intérieure de 19°C (Source : *La pompe à chaleur*, Jacques Bernier, 2004, Éd. PYC Livres).

le cas du photovoltaïque où la fourchette des valeurs avancées dans la littérature s'avère très large.

Périmètre associé à la partie haute de la fourchette de valeurs de l'EROI

Dans la partie haute de la fourchette des EROIs du photovoltaïque, on trouve les études traditionnelles d'analyse du cycle de vie et de délai de retour de l'énergie des systèmes solaires photovoltaïques.

Celles-ci donnent souvent des estimations assez favorables, à savoir que l'énergie investie dans la construction de capteurs solaires peut être « remboursée » par le dispositif en un ou deux ans. Ainsi, si la durée de vie des capteurs est de 25 ans, une hypothèse courante, cela donne un retour sur investissement énergétique compris typiquement dans une fourchette allant de 12:1 à 25:1⁶, ce qui représente des ratios plutôt favorables. *N.B.* : la notation utilisée, ici et dans le reste de l'article, pour le calcul de l'EROI indique que ce ratio se rapporte toujours à l'unité.

Cependant, ces analyses ne se concentrent généralement que sur les processus de base de la fabrication de lingots, de *wafers*, de cellules et de modules⁷, bien qu'elles incluent parfois les coûts énergétiques des équipements directs associés tels que : onduleurs, *trackers*⁸, et, le cas échéant, les structures métalliques.

Périmètre associé à la partie basse de la fourchette de valeurs de l'EROI

L'évaluation exhaustive des consommations énergétiques intervenant dans la construction et l'exploitation d'un système énergétique quel qu'il soit, nécessite d'aller plus loin que la prise en compte des consommations énergétiques des processus de base de la fabri-

cation des éléments constitutifs de ce système. À titre d'exemple, s'agissant de l'évaluation de l'EROI associé

au solaire photovoltaïque en Espagne, une démarche intéressante a été entreprise dans ce sens par *Pedro Prieto* et *Charles Hall*⁹. Celle-ci a consisté en l'utilisation de l'ensemble des données tirées de la réalisation de grands projets photovoltaïques espagnols, durant la période allant de 2009 à 2011.

Ainsi, afin d'évaluer ce ratio aussi précisément que possible, Pedro Prieto, alors en charge de ces grands projets, a dépassé le simple inventaire des consommations directes d'énergie en élargissant le périmètre des données énergétiques prises en compte dans l'évaluation de l'EROI, ce qui conduit naturellement bien sûr à diminuer le ratio établi à partir des consommations énergétiques des processus de base.

Pour cette analyse, outre les évaluations des dépenses énergétiques directes, les activités connexes au secteur du photovoltaïque ont été prises en compte, allant des simples activités de terrassement, aux activités financières attachées à la réalisation des projets pilotés par Pedro Prieto, en passant par l'impact associé à l'utilisation de centrales à gaz pour gérer l'intermittence de la production photovoltaïque. Lorsque les évaluations des consommations énergétiques des différents postes considérés se sont avérées malaisées, voire impossibles, l'analyse s'est appuyée sur les montants des dépenses effectuées dans chacun de ces postes. Pour cela un tableau de conversion « énergie<->monnaie » a été utilisé, en distinguant les grands secteurs économiques et industriels.

Au final, la valeur de l'EROI du photovoltaïque obtenue, à l'aide de cette méthodologie, par les auteurs de l'étude, est de l'ordre de 2,45:1, soit une valeur proche de celle obtenue par ailleurs par *Murphy et al.* (2011). Cette valeur s'avère en outre similaire à celle obtenue par ces deux auteurs, en évaluant les coûts énergétiques par la simple multiplication du coût monétaire d'un projet d'un gigawatt, par l'intensité énergétique de l'économie espagnole, soit un EROI de l'ordre de 2,41:1.

Toutefois, dans cette approche, conscients de possibles imprécisions, ou autres biais tels que les double comptages, *Pedro Prieto* et *Charles Hall* ont réalisé une étude de sensibilité de la méthode, ce qui les a conduit à proposer une fourchette d'évaluation de l'EROI du photovoltaïque espagnol comprise entre 1:1 et 7,35:1.

Par comparaison avec la fourchette comprise entre 12:1 et 25:1 donnée plus haut, ces résultats montrent la nécessité qu'il y a, pour le calcul des EROIs, à prendre en compte de manière aussi exhaustive que possible les contributions indirectes de l'énergie consommée dans les phases de construction et d'exploitation d'un système énergétique.

⁶ Voir *Spain's photovoltaic revolution – The energy return on investment*, by Pedro A. Prieto and Charles A.S. Hall, 2013.

⁷ La terminologie utilisée ici est celle correspondant à la chaîne de transformation partant des matières minérales brutes, à la réalisation de modules solaires. Ainsi, en prenant pour exemple la technologie du silicium monocristallin, le *lingot* est la structure cylindrique obtenue par croissance d'une amorce de cristal de silicium. L'étape suivante est le découpage de ce lingot en tranches ("*wafer*" en anglais) de l'ordre de 250 microns. Ensuite, intervient une étape de dopage où certains éléments chimiques (bore et phosphore, dans le cas du silicium) sont implantés dans le substrat de silicium afin de conférer à ce dernier des propriétés semi-conductrices (en constituant ainsi ce que l'on appelle une jonction PN, au comportement similaire à celui d'une diode). Ainsi dopées, les tranches de silicium sont découpées en *cellules*, ces dernières étant ensuite assemblées pour constituer les *modules* solaires recherchés.

⁸ Dans le cas du photovoltaïque, la fonction d'un *tracker* est de suivre la course du soleil afin de maximiser la conversion du rayonnement solaire en électricité. Ainsi, pour un capteur plan ordinaire, il s'agira simplement d'orienter en permanence ce capteur, de sorte qu'il demeure perpendiculaire aux rayons du soleil. Il existe par ailleurs des situations où, en plus du suivi de la course du soleil, il est nécessaire de concentrer le rayonnement capté. C'est par exemple le cas de l'utilisation de cellules solaires comportant 2 jonctions PN, chacune exploitant une partie différente du spectre solaire, ce dernier étant ainsi utilisé de manière plus efficace que dans le cas d'une mono jonction. Néanmoins, afin de compenser le coût important de fabrication de ce type de cellules, la taille du capteur se limite souvent à une seule cellule, d'où la nécessité de concentrer le rayonnement solaire sur cette dernière, par exemple à l'aide de lentilles de Fresnel.

⁹ *ibid.*

Le photovoltaïque : une filière reposant encore trop sur les fossiles

À ce jour, la construction d'un système photovoltaïque, qui nécessite de disposer d'énergie, et de matières premières, repose encore fortement sur la disponibilité d'énergies carbonées, que ce soit pour générer l'électricité nécessaire à tous les étages des processus de fabrication, ou bien encore pour générer la chaleur nécessaire à la transformation de la matière brute pour, par exemple, la fabrication de lingots, sans oublier l'énergie utilisée pour alimenter toute la machinerie de l'extraction et du traitement des minerais.

Ainsi, dans un monde où le mix électrique serait quasiment composé de systèmes d'énergie renouvelable, du type photovoltaïque, il faudrait que ces derniers assurent tous les services aujourd'hui assurés par les énergies fossiles, ce qui, à l'évidence, dégraderait les ratios énergétiques du photovoltaïque, un système énergétique dont on a pu noter le peu de marge disponible. Cela fait ressortir une fois de plus toute l'importance de disposer d'un socle énergétique à la fois ample, peu onéreux et présentant des EROIs confortables, ce dont on bénéficie actuellement avec les trois énergies fossiles que sont, en premier lieu le pétrole, puis le gaz et enfin le charbon.

Pour sortir véritablement cette filière de la dépendance des fossiles, il apparaît donc nécessaire, sans qu'*a priori* cela soit pour autant suffisant, de continuer à travailler sur l'amélioration des rendements des cel-

lules, ce qui augmenterait mécaniquement la quantité d'énergie convertie, et donc l'EROI. Sur ce plan, les développements observés ces dernières années font apparaître des progrès en matière de rendement unitaire, comme illustré par la Figure 3 ci-dessous, où l'on note en particulier l'émergence de technologies prometteuses telles les *perovskites*¹⁰, et surtout les cellules tandem *perovskite/Si*, avec des rendements atteignant respectivement à ce jour 26 et 33 %.

Ces progrès s'accompagnent également d'une réduction du volume des matières nécessaires à la fabrication de ces cellules, ce qui réduit d'autant les consommations énergétiques lors de la fabrication de ces dernières, et améliore donc l'EROI associé à ces filières technologiques.

L'hydrogène dans le cadre de la transition énergétique et de la décarbonation

En matière de décarbonation et de transition énergétique, l'hydrogène est actuellement l'objet d'une attention particulière. Replacé dans la perspective, à horizon 2050, d'une fin programmée des énergies fossiles, ce double objectif est en fait dépendant de la capacité à mobiliser tout le potentiel des énergies peu émettrices de gaz à effet de serre (GES), au premier rang desquelles on trouve le solaire photovoltaïque, l'éolien et le nucléaire. Cela appelle plusieurs commentaires.

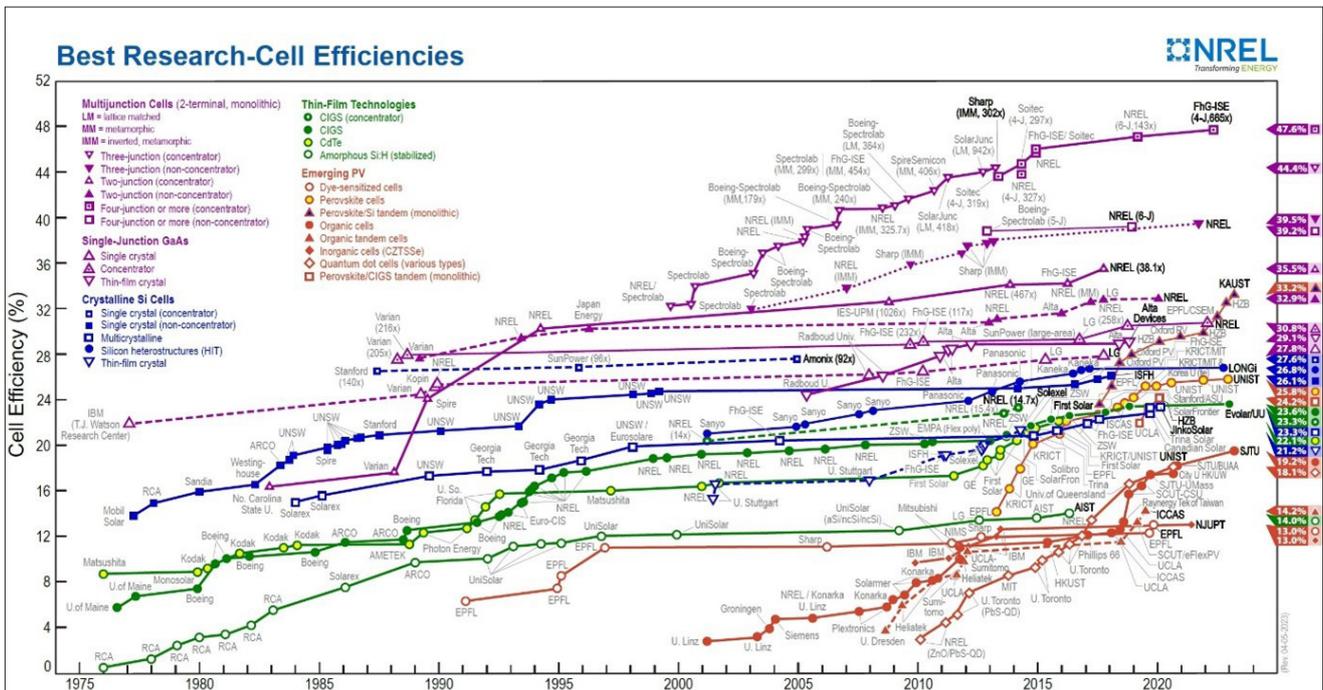


Figure 3 : Performances des diverses technologies de cellules photovoltaïques depuis 1975 (Source : <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf>).

¹⁰ La *pérovskite*, du nom du minéralogiste russe L.A. Perovski, est une structure cristalline commune à de nombreux oxydes. Ce nom a d'abord désigné le titanate de calcium de formule CaTiO_3 , avant d'être étendu à l'ensemble des oxydes de formule générale ABO_3 présentant la même structure. Lorsque ce minéral est associé au silicium, on parle alors de tandem *Perovskite/Si*.

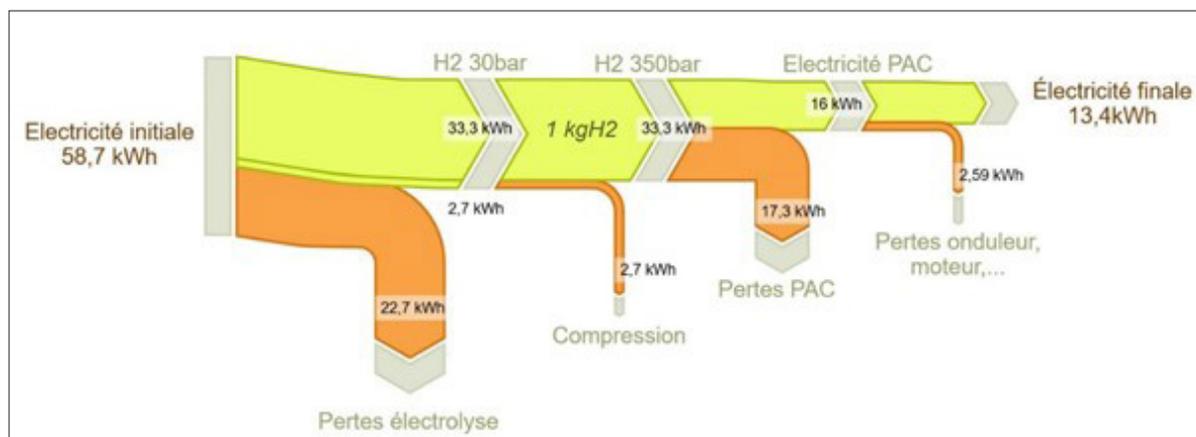


Figure 4 : Rendement de la chaîne hydrogène – cas du “power to H₂ to power” (Source : ADEME, voir https://www.connaissancesdesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/rendement-chaine-h2_fiche-technique-02-2020.pdf).

Une production d'hydrogène au service de la transition énergétique

Il y a tout d'abord la question de la production d'hydrogène, dont on sait qu'elle est affectée d'un rendement inférieur à l'unité, comme illustré par la Figure 4 ci-dessus dans le cas d'une application “power to H₂ to power”.

D'une manière générale, les applications énergétiques basées sur l'hydrogène, s'avèrent très contraintes par le rendement énergétique des conversions successives. Comme cela a été rappelé plus haut, cela n'est guère surprenant compte tenu des rendements associés aux processus de conversion énergétique, systématiquement inférieurs à l'unité. Ainsi, dans la mesure où les meilleures technologies ne permettent pas d'envisager des rendements de la chaîne « électricité-hydrogène-électricité » supérieurs à 30 %, l'EROI associé à cette chaîne ne peut donc guère dépasser 0,3:1.

On se retrouve ainsi dans le cas de figure, évoqué plus haut, d'un EROI inférieur à l'unité. Dans l'exemple considéré ici, l'hydrogène a de fait un rôle de vecteur énergétique¹¹, où production et consommation sont séparées par une étape intermédiaire de stockage, permettant notamment le transport de l'énergie, soit, majoritairement, directement sous forme d'hydrogène (hydrogène comprimé, ou cryogénique), soit sous forme d'ammoniac (NH₃), cette solution s'avérant très prometteuse. Ceci permet, entre autres, de pallier les inconvénients du caractère intermittent des énergies renouvelables de type photovoltaïque et éolien.

¹¹ Jusqu'à très récemment, on admettait que l'hydrogène ne pouvait exister à l'état natif. On sait maintenant que de l'hydrogène est relâché en continu à la surface de la Terre, sans que, à ce jour, l'on puisse le collecter de manière industrielle. Ce phénomène a donné lieu, en 2015, à l'édition d'un livre écrit par deux géologues, Alain Prinzhofer et Éric Deville, intitulé *Hydrogène naturel, la prochaine révolution énergétique ?*. Ainsi, dans ce cas particulier d'une production d'hydrogène à partir du sous-sol terrestre, l'hydrogène se présente en définitive comme une source énergétique, plutôt qu'un vecteur énergétique.

Mais la production d'hydrogène peut également avoir pour but de fournir un carburant décarboné pour des moyens de transport difficilement envisageables sur la seule base d'une utilisation de l'électricité, comme c'est le cas de l'aérien. Notons que la nécessité d'une telle transition de ce secteur vers des énergies décarbonées justifie, comme on a pu le voir plus haut, de passer par un processus de conversion pénalisé par un rendement inférieur à 1, et donc un EROI inférieur à l'unité, pourvu que l'on dispose par ailleurs d'une source énergétique pouvant dégager une marge suffisante permettant de compenser la perte d'énergie correspondant à ce rendement.

Une production d'hydrogène au service de la décarbonation

La question de l'utilisation de l'hydrogène dans le processus de décarbonation évoqué ci-dessus à propos des carburants participe en fait d'une stratégie plus large englobant les processus industriels les plus émetteurs, la priorité étant de décarboner l'hydrogène à usage industriel (raffineries, engrais, sidérurgie). Cependant, à ce jour, la production d'hydrogène reste encore fortement dépendante des énergies fossiles, avec un taux de production de l'ordre de 95 % obtenu à partir du méthane. Le chemin vers la décarbonation totale de l'hydrogène est donc encore long¹².

À terme cela passera par une production d'hydrogène entièrement basée sur des énergies faiblement carbonées, telles que le nucléaire, le photovoltaïque et l'éolien, sans oublier la grande hydroélectricité. Mais on retrouve ici la même difficulté que celle évoquée plus haut avec le photovoltaïque, où était pointé le nécessaire découplage entre production électrique et énergies fossiles, ceci afin de parvenir à une réduction drastique des GES, tout en procurant un socle énergétique suffisant pour assurer le fonctionnement des rouages de l'économie, et répondre ainsi à ses besoins.

¹² Voir le numéro des Annales des Mines consacré à l'hydrogène, https://annales.org/ri/2022/ri_novembre_2022.html

Une transition énergétique et bas-carbone qui s'avère délicate

Si l'on excepte la possibilité de développer les technologies de type CCS (*Carbon capture and storage*, soit en français : *Captage et stockage du carbone*) ou CCUS (*Carbon capture, utilization and Storage*, soit en français : *Captage, utilisation et stockage du carbone*) qui ont d'ores et déjà donné lieu à l'implantation de quelques dizaines d'installations à travers le monde, la disparition à terme des énergies fossiles du mix énergétique, qu'elle soit programmée au regard des enjeux climatiques, ou imposée *in fine* par la géologie, nous conduit à un mix énergétique composé de technologies bas-carbone, dont le solaire photovoltaïque et thermique ; l'éolien ; l'hydroélectricité, la biomasse et le nucléaire.

La double stratégie de transition énergétique et de décarbonation de l'économie suppose bien sûr, comme souligné plus haut, de disposer d'une, ou plusieurs formes d'énergie externes présentant, d'une part, un EROI largement supérieur à l'unité, et d'autre part d'être disponible en quantité suffisante en entrée du système énergétique, de manière à dégager un bilan net en énergie¹³ propre à assurer le fonctionnement de l'économie dans tous ses compartiments. Il faut de surcroît que ces énergies soient faiblement carbonées, ce qui laisse peu de candidats en lice pour réaliser ce double objectif.

Parmi ceux-ci on a vu que le photovoltaïque présente finalement peu de marge de manœuvre sur le plan énergétique. Par ailleurs son implémentation à l'échelle mondiale reste encore très dépendante des énergies fossiles. En conséquence, la suppression de ces dernières du paysage énergétique mondial dégraderait un peu plus les performances de ce système énergétique.

S'agissant de l'éolien, aucune étude similaire à celle menée par Pedro Prieto et Charles Hall n'a pu être repérée par l'auteur de ces lignes. Néanmoins, on peut relever au moins un point commun avec le photovoltaïque, à savoir la dépendance forte existant à ce jour vis-à-vis des fossiles. Pour ce qui concerne l'EROI, les meilleures évaluations (autour de 15 pour l'éolien terrestre) placent l'éolien à des niveaux similaires au photovoltaïque. Une étude approfondie, similaire à celle de Prieto et Hall pour le photovoltaïque, serait cependant nécessaire pour une évaluation plus fine des possibilités de l'éolien dans la perspective de la transition énergétique et bas-carbone.

Enfin, il reste bien sûr à considérer le potentiel du nucléaire dans cette même perspective de transition énergétique et bas-carbone. Le point de vue de l'auteur de ces lignes est qu'il ne faut surtout pas négliger la transition des technologies de réacteurs à neutron thermiques, largement dominantes au niveau mondial à ce jour, pour aller vers des technologies de réacteurs à

neutrons rapides. C'est à dire¹⁴ passer d'une exploitation de ²³⁵U, à celle de ²³⁸U capable à la fois de centupler les perspectives énergétiques du nucléaire sur le long terme, mais aussi de diminuer drastiquement les émissions de GES.

Bibliographie

- AGATOR J.-M., CHÉRON J., NGÔ C. & TRAP G. (2008), *Hydrogène - Énergie de demain ?*, Éd. Omniscience.
- BARDI U. (2015), « Le grand pillage – comment nous épuisons les ressources de la planète », nouveau rapport choc au Club de Rome, Éd. Les petits matins (pour la traduction française).
- BERNIER J. (2004), *La pompe à chaleur : déterminer, installer, entretenir*, Éd. PYC Livres.
- MEADOWS D. (2004), « Les limites à la croissance », Édition spéciale des 50 ans du rapport au Club de Rome, Réédition du rapport "The limits to growth, the 30-Year update", Éd. L'écopoché.
- 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*, repéré à <https://www.mdpi.com/2071-1050/3/10/1888>
- PRIETO P.A. & HAL C.A.S. (2013), *Spain's photovoltaic revolution - The energy return on investment*, Springer, 144 pages.
- PRINZHOFFER A. & DEVILLE É. (2015), *Hydrogène naturel, la prochaine révolution énergétique ?* Éd. Belin.
- RAX J.-M. (2015), *Physique de la conversion d'énergie*, Éd. EDP Sciences.

¹³ Ce bilan peut se résumer assez simplement par la relation : $E_{\text{nette}} = E_{\text{investie}} \cdot (\text{EROI} - 1)$. On voit ainsi que la quantité nette d'énergie, E_{nette} , est d'autant plus grande que la quantité d'énergie disponible pour le système, E_{investie} , est grande, et que la valeur de l'EROI, ici supposée supérieure à l'unité, est grande.

¹⁴ Comme cela est détaillé dans l'article de J. W. Storm van Leeuwen et Didier Pillet du présent numéro.