

Énergie. Sources primaires et formes secondaires

François Le Tacon

Avant-propos

L'énergie est un concept abstrait, difficile à définir, dont l'origine vient du grec ancien *force en action*. Sa définition scientifique a été progressivement élaborée depuis un siècle et demi par divers physiciens. L'énergie découle des propriétés de la matière et peut être décrite mathématiquement. Elle est caractérisée par la capacité d'un système à changer d'état en induisant un mouvement, de la chaleur ou un rayonnement électromagnétique. L'énergie peut se décliner en différentes formes pouvant dans certains cas se convertir en l'une ou l'autre : énergie de masse, énergie gravitationnelle, énergie radiative, énergie thermique, énergie chimique, énergie mécanique, énergie électro- magnétique. L'unité de mesure est le joule¹.

Les sources primaires d'énergie sont celles qui existent du fait de la constitution du monde. Elles peuvent être captées de différentes manières et transformées en formes secondaires qui seront affectées à différents usages. La quantité d'énergie secondaire est donc tributaire de celles des sources primaires. Une forme d'énergie pouvant être transformée en une autre, la confusion est fréquente entre sources d'énergie primaire et formes secondaires d'énergie. Un exemple récent de confusion est un ouvrage de 2019 intitulé, *Hydrogène, le nouveau pétrole*². L'auteur tente de faire croire que l'hydrogène pourra remplacer le pétrole dans un futur plus ou moins proche. Il récidive avec *Mégavagues ou scénario pour un monde post-carbone* paru en 2021. De même, dans la campagne pour l'élection présidentielle française de 2022, certains candidats n'hésitent pas à présenter l'hydrogène comme une alternative à la crise énergétique qui se profile. Encore plus grave, la confusion est entretenue dans des revues scientifiques. Or, l'hydrogène n'est pas une source primaire d'énergie et ne peut en aucun cas remplacer le pétrole. L'hydrogène est une forme secondaire d'énergie qui n'est disponible que si elle est produite à l'aide d'une source d'énergie primaire ou par une autre forme d'énergie secondaire comme l'électricité. Dans la presse, l'électricité est aussi très souvent présentée comme une source d'énergie pouvant être une alternative aux énergies fossiles. C'est ainsi que la transformation du parc automobile à moteur thermique en parc à moteur électrique est présentée comme une possibilité de réduction de l'empreinte carbone, alors qu'il n'en est rien si l'électricité est produite à partir d'énergie fossile. De même pour décarboner le transport aérien, le moteur à hydrogène est présenté comme la solution du futur. De tels écrits ou de tels propos ont des conséquences graves : ils induisent en erreur les lecteurs ou les auditeurs et les dissuadent d'adopter des comportements qui pourraient contribuer à résoudre la crise énergétique vers laquelle le monde se dirige.

Les sources primaires d'énergie

Les sources primaires d'énergie sont soit inhérentes aux propriétés de la planète terre, soit proviennent de l'extérieur de la planète. Sur terre il existe quatre types d'énergie primaire, *l'énergie de masse* ou énergie nucléaire définie par la célèbre équation d'Einstein, *l'énergie géothermique* provenant de la chaleur du noyau de la planète, *l'énergie chimique* provenant

¹ Un joule correspond à 0,238 calorie, une unité de mesure historique ancienne. 1 eV (electron-volt) = 1,602.10⁻¹⁹ J (joules). 1 kWh (kilowattheure) = 3,6.10⁶ J. 1 tep (tonne équivalent pétrole) = 4,186.10¹⁰ J.

² Il s'agit d'un ouvrage de Thierry Lepercq, fondateur d'une entreprise de panneaux solaires, rachetée par Engie en 2015, et créateur de Soladvent, une entreprise dite d'hydrogène vert.

de molécules naturellement présentes et dont certaines liaisons atomiques peuvent être rompues pour produire de la chaleur, *l'énergie fossile* accumulée dans les sédiments depuis l'apparition de la photosynthèse. Ces quatre types d'énergie sont non renouvelables, mais l'énergie de masse et l'énergie géothermique peuvent être considérées comme illimitées. La terre reçoit deux types d'énergie en provenance de l'extérieur : *l'énergie gravitationnelle* et *l'énergie solaire*. Ces deux types d'énergie qui arrivent en flux continu sont dites renouvelables.

Ces six types d'énergie primaires se déclinent en divers sous types. Par exemple, l'énergie de masse se divise en énergie de fission et énergie de fusion. L'énergie géothermique se subdivise en géothermie de surface de basse température, de moyenne profondeur ou de grande profondeur à haute énergie. L'énergie fossile provenant de la matière organique issue de la photosynthèse et qui s'est accumulée dans les sédiments se décline en charbon, pétrole, gaz, lignite, tourbe et autre. L'énergie chimique est constituée de molécules minérales réduites pouvant fournir de l'énergie par des réactions d'oxydation. Les substrats énergétiques sont divers : H_2 , CH_4 , CO , S , H_2S , NH_4 , NO_2 , N_2O , Fe^{++} et Mn^{++} . L'oxygène est actuellement le plus souvent l'accepteur terminal d'électrons. Mais en son absence, comme c'était le cas avant l'apparition de la photosynthèse, d'autres accepteurs d'électrons peuvent être utilisés tels les sulfates. Cette énergie est très limitée et n'est utilisable que par des organismes chimio-lithotrophes qui produisent ou ont produit une faible partie de la matière organique fossile comparée à celle issue de la photosynthèse. L'énergie gravitationnelle peut être exploitée par l'intermédiaire de l'énergie marémotrice issue des variations de l'attraction locale de la lune (et dans une certaine mesure du soleil) consécutive au mouvement relatif de la lune par rapport à la terre. L'énergie gravitationnelle de la terre est aussi indirectement ou secondairement exploitée dans l'énergie hydraulique ou marémotrice par utilisation de *l'énergie potentielle gravitationnelle* qui est acquise par un gain de hauteur. Dans le cas de l'énergie hydraulique, le gain en hauteur de l'eau est le résultat de l'effet de l'énergie solaire qui transforme l'eau liquide en vapeur, c'est-à-dire en nuages, alors que dans le cas de l'énergie marémotrice, le gain en hauteur est d'origine gravitationnelle externe. L'énergie solaire se décline en de multiples sous types suivant la manière dont elle est captée : biomasse, énergie hydraulique, énergie éolienne, énergie solaire thermique ou photovoltaïque, énergie des courants marins, etc.

Les formes secondaires d'énergie

Sauf exception, les énergies primaires ne sont pas exploitables directement. Elles doivent être transformées. Les principales formes secondaires d'énergie sont la chaleur, l'électricité, des éléments ou composés chimiques comme l'hydrogène, le méthane, l'alcool, le méthanol ou par tout un ensemble d'hydrocarbures. Le mode de transformation le plus courant a d'abord été la combustion qui, par oxydation, permet d'obtenir de la chaleur³. Cette réaction implique la perte d'un électron par l'atome oxydé et inversement un gain d'un électron pour l'atome provoquant l'oxydation⁴. C'est le phénomène d'oxydo-réduction. Le concept d'électromagnétisme s'est développé au XIX^e siècle et a permis la mise en œuvre de l'énergie électrique dans les domaines industriels ou domestiques.

L'électricité

Toutes les formes primaires d'énergie peuvent être transformées en énergie électrique qui peut être elle-même transformée en énergie lumineuse, en chaleur, en énergie mécanique ou

³ Une des premières sources de chaleur a été obtenue par combustion du bois. Son carbone est oxydé en CO_2 .

⁴ L'oxydation peut être réalisée par un corps autre que l'oxygène.

en énergie chimique. L'énergie électrique, déjà très développée dans de multiples domaines, est appelée à devenir majoritaire dans le secteur automobile. Le passage du moteur thermique au moteur électrique dans l'équipement des véhicules permettra de diminuer la pollution des centres urbains en particules fines et en NO_x . En termes de bilan de carbone, la situation est tout autre. En effet la production d'une voiture, à puissance égale, coûte plus cher en carbone à la construction qu'une voiture à moteur thermique en raison du coût d'extraction des métaux rares nécessaires à la fabrication des batteries. D'autre part, le rendement des opérations nécessaires à la production d'énergie électrique est toujours inférieur à un. Cependant, avec le temps, le bilan carbone devient favorable à la voiture électrique. Mais tout dépend de l'origine de l'électricité. Au niveau mondial, l'électricité d'origine renouvelable ou nucléaire reste très minoritaire. L'essentiel de l'énergie électrique produite est d'origine fossile. Le passage de la voiture thermique à la voiture électrique ne fait que déplacer le problème et ne résout en rien le problème des émissions de CO_2 dans les pays qui produisent leur électricité à partir d'énergie fossile⁵.

Biocarburants et biogaz

La biomasse peut être utilisée de diverses manières : en combustion directe, par fabrication de biocarburants, par méthanisation (biogaz) ou par pyrolyse et gazéification. Les biocarburants de première génération sont soit des biodiésels ou esters d'huile végétale (huile de palme, de tournesol ou de colza), soit de l'éthanol obtenu après fermentation des sucres. Par fermentation anaérobie de divers résidus (végétaux, animaux, fongiques ou bactériens) on obtient un biogaz composé de méthane (CH_4), de gaz carbonique et de diverses impuretés. Ce biogaz peut être brûlé pour obtenir de la chaleur ou de l'électricité ou être purifié en biométhane utilisable par des véhicules à moteur ou par injection dans le réseau de gaz naturel⁶. Des carburants de seconde génération pourraient aussi être obtenus par voie thermochimique, pyrolyse ou gazéification. La gazéification est un procédé ancien qui permet d'obtenir un mélange de monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H_2)⁷.

La ressource est le facteur limitant de la bio-industrie en raison de la compétition potentielle avec la production à objectif alimentaire et la nécessité de protéger les espaces naturels. Il est impossible de remplacer l'essentiel des énergies fossiles par ces formes d'énergie issue de la biomasse. Le remplacement ne peut être que très partiel.

L'hydrogène

L'hydrogène ou dihydrogène (H_2) est une forme d'énergie qui peut être obtenue de plusieurs manières différentes : soit à partir de l'hydrolyse de l'eau, soit à partir de méthane et d'eau, soit à partir de charbon ou de biomasse (gazéification). La réduction de l'eau peut se faire par électrolyse, c'est-à-dire en utilisant comme source d'énergie de l'électricité, soit par photolyse en utilisant l'énergie solaire, autrement dit les photons. C'est ce qui se produit indirectement dans la photosynthèse par une suite de réactions très complexes. Des tentatives de photolyse de l'eau par bio mimétisme moléculaire sont envisagées, mais sont loin d'avoir

⁵ La situation est différente dans les pays qui produisent leur électricité sans énergie fossile (pays scandinaves avec l'énergie hydroélectrique, France avec l'énergie nucléaire et l'énergie hydroélectrique).

⁶ Le méthane peut être transformé en carburant liquide, le méthanol. Le méthanol peut aussi être obtenu par d'autres voies comme celle de l'acide formique.

⁷ Le gazogène est un procédé inventé au XIX^e siècle et permettant d'alimenter un moteur par gazéification du bois. Par précombustion incomplète on obtient du monoxyde de carbone qui peut être oxydé en CO_2 et donc être utilisé dans un moteur à explosion. Des véhicules à gazogène ont été construits en quantité importante pendant la Seconde Guerre mondiale.

abouti (Aukauloo, Leibl, Rotherford, 2007). En dehors de l'électrolyse ou de la photolyse de l'eau, l'hydrogène peut être obtenu par divers procédés chimiques à partir de composés carbonés. C'est ainsi que la moitié de l'hydrogène produit dans le monde provient actuellement du « vaporeformage » du méthane (*steam methane reforming* ou SMR), 30% de l'oxydation partielle du pétrole et un peu plus de 15% par gazéification du charbon⁸.

Une fois produit, l'hydrogène peut être directement utilisé comme combustible par combinaison avec l'oxygène. Dans un moteur de fusée spatiale, l'hydrogène et l'oxygène se combinent dans une chambre de combustion et la vapeur d'eau ainsi produite à haute température est éjectée par une tuyère, ce qui permet d'obtenir d'énormes poussées. Il n'est pas possible d'utiliser des moteurs aussi puissants pour l'aviation. Il est par conséquent envisagé d'utiliser l'hydrogène liquide pour alimenter des turbines à gaz modifiées, ce qui est loin d'être opérationnel, même si différentes compagnies fantasment sur cette possibilité. Une autre solution serait la mise en œuvre de piles à combustible hydrogène pour alimenter des moteurs électriques. La création des piles à hydrogène date du XIX^e siècle. Son principe est simple : il repose sur la décomposition de la réaction d'oxydation de l'hydrogène⁹. Dans un moteur thermique la combustion de l'hydrogène produit de la chaleur. Dans une pile à combustible sa combinaison avec l'oxygène produit de l'électricité. Si le principe de la pile à combustible est simple, sa mise en œuvre est complexe et elle n'est pour l'instant utilisée que dans les missions spatiales. La technologie va cependant rapidement progresser. En 2016 à Berlin, Alstom a présenté un projet de train à hydrogène. En 2018, les deux premières rames sont entrées en service en Allemagne où 41 sont actuellement en commande. Une rame de ce train à hydrogène d'Alstom, le Coradia iLint, a été mis en service en Suède en août 2021. Récemment, quatre régions françaises (Grand Est, Bourgogne-Franche-Comté, Auvergne Rhône-Alpes et Occitanie) ont commandé à Alstom des rames à pile d'hydrogène pour remplacer les rames TER diesel sur les lignes non électrifiées. Cependant, ces projets sont ponctuels et ne sont pas appelés à se développer. Pour le rail, l'électrification restera en effet la solution majoritaire. Pour le transport aérien, l'avion à hydrogène relève d'effets d'annonce. Il en est de même pour les véhicules automobiles.

Conclusions

Il y a trop souvent confusion entre énergies primaires et énergies secondaires. Les formes d'énergies secondaires sont toutes tributaires des ressources primaires et accréditer l'idée qu'elles peuvent être une alternative à l'utilisation de l'énergie fossile relève du fantasme. La naissance d'un monde décarboné ne peut être envisagée par une plus grande utilisation de formes secondaires d'énergie comme l'électricité ou l'hydrogène. L'énergie fossile couvre actuellement 82 % des besoins de la planète. Les solutions pour assurer l'approvisionnement énergétique d'un monde à 10 milliards d'habitants ne sont guère encourageantes. Penser qu'en 2050, 75 ou 80% de l'énergie utilisée dans le monde pourrait être renouvelable n'est pas crédible. La fusion nucléaire éventuellement doublée de surgénération ne peut être une solution que pour quelques pays à technologie avancée et à condition que l'opinion ne la rejette pas¹⁰. La maîtrise de l'énergie de fusion est pour l'instant hypothétique. La réduction

⁸ Actuellement, les procédés de production de l'hydrogène à partir d composés carbonés se traduisent par le rejet de 10 à 20 tonnes de CO₂ par tonne de dihydrogène produite.

⁹ Au contact de l'anode et avec un catalyseur, la molécule de dihydrogène se transforme en ions H⁺ ou protons et produit des électrons qui induisent un courant électrique. Inversement, à la cathode, la molécule d'oxygène O₂ est réduite et accepte des électrons en se transformant en anion O²⁻. Enfin à la cathode les protons se combinent aux anions oxygènes et forment de l'eau.

¹⁰ La France prendra prochainement la décision de renouveler son parc nucléaire vieillissant par la construction de six réacteurs EPR de nouvelle génération.

drastique de la consommation énergétique mondiale reste une solution minoritaire dans l'opinion et nécessiterait un profond bouleversement de nos comportements¹¹.

Références

A. AUKAULOO, W. LEIBL, and A. RUTHERFORD, 2007. Water photolysis by molecular biomimetics; La photolyse de l'eau par biomimetisme moléculaire. *Actualité chimique*, 308-309.

Gérard BONHOMME, 2020. Débat : L'hydrogène produit par les seules renouvelables ? Ni possible, ni durable. *The Conversation*, <https://theconversation.com/debat-lhydrogene-produit-par-les-seules-renouvelables-ni-possible-ni-durable-148663>

Brenda JOHNSTON, Michael C. MAYO, Anshuman KHARE, 2005. Hydrogen: the energy source for the 21st century. *Technovation*, 25, 6, 569-585.

LAU HON CHUNG, SEERAM RAMAKRISHNA, KAI ZHANG, ADIYODI VEETIL RADHAMANI, 2021. The Role of Carbon Capture and Storage in the Energy Transition, *Energy & Fuels*, 35, 9, 7364-7386.

Thierry LEPERCQ, 2019. *Hydrogène, le nouveau pétrole*, Cherche Midi.

Thierry LEPERCQ, 2021. *Mégavagues. Scénario pour un monde post-carbone*, Dunod.

François LE TACON, 2021. Transition énergétique, fiction ou réalité ? <https://www.academies-cna.fr/transition-energetique-fiction-ou-realite/>

Anastasios MELIS, Thomas HAPPE, 2001. Hydrogen Production. Green Algae as a Source of Energy. *Plant Physiology*, 127, 3, 740-748.

SEYED EHSAN HOSSEINI, MAZLAN ABDUL WAHID, 2020. Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy. *International Journal of Energy Research*. <https://doi.org/10.1002/er.4930>

¹¹ Tous nos remerciements vont à notre confrère Jean-Louis Rivail qui a bien voulu corriger cet article.