

L'impact de l'énergie sur le développement des sociétés humaines et l'économie globale

Gérard Bonhomme⁽¹⁾ (gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr) et Henri Safa⁽²⁾ (henri.safa@cea.fr)

(1) Institut Jean Lamour, Campus Artem, Université de Lorraine, 2 allée André Guinier, 54000 Nancy

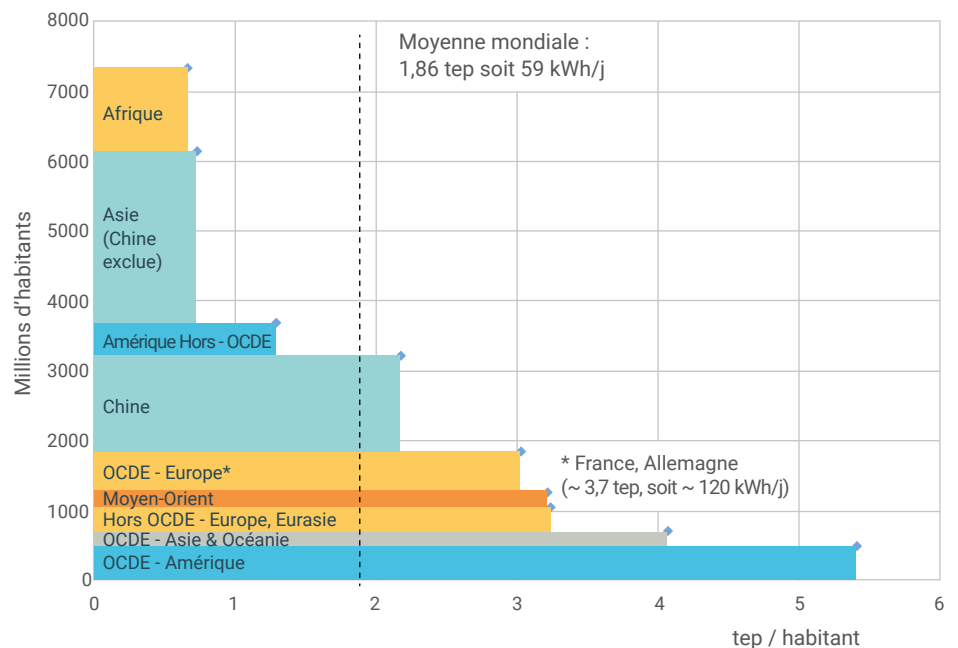
(2) CEA, Direction des programmes, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette

Alors que le poids réel de l'énergie dans l'économie est encore souvent largement sous-estimé dans nombre de modèles macro-économiques, l'article explicite la forte interrelation qui existe entre l'énergie, le développement humain et l' conomie. Dans un contexte de nécessaire croissance des besoins au niveau mondial, et devant l'impérieuse nécessité de décarboner les usages, quelques pistes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, s'appuyant sur des innovations techniques, sont discutées.

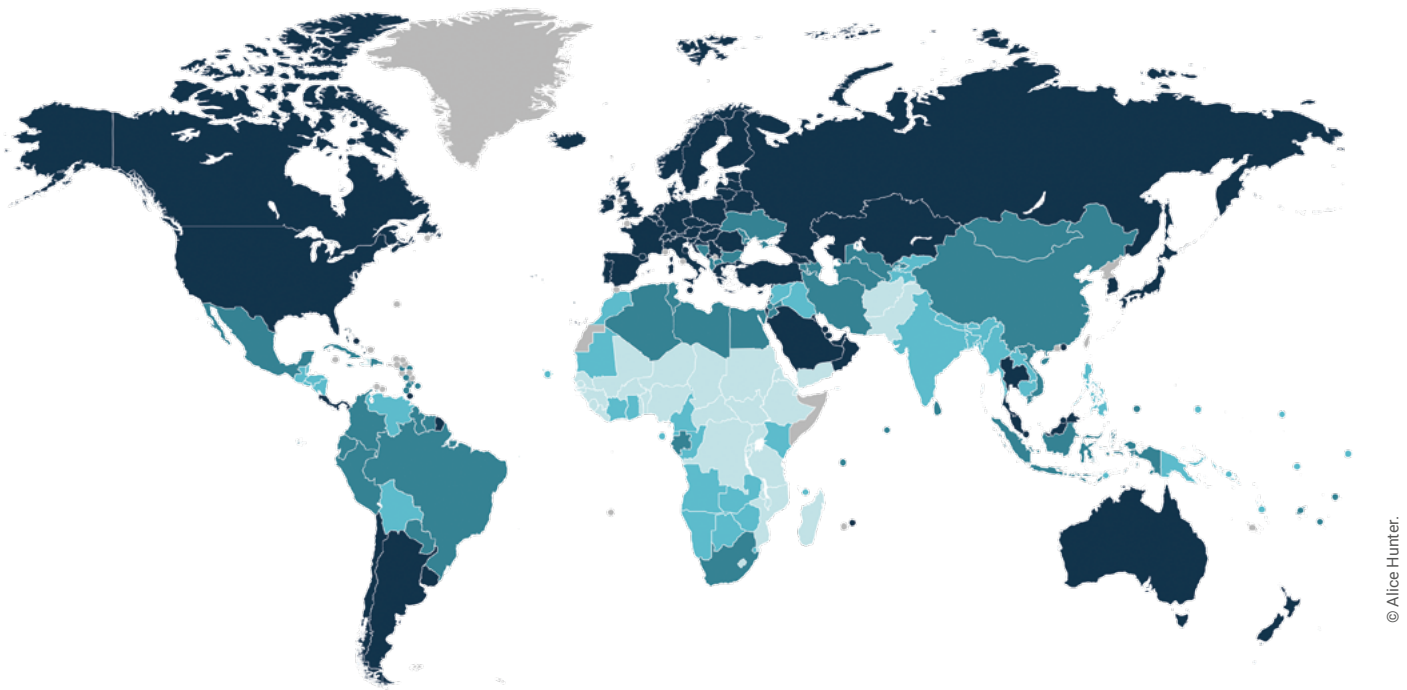
L'accès à l'énergie est une condition du développement des sociétés humaines. Il en va de ces dernières comme des êtres vivants qui les constituent : ce sont du point de vue thermodynamique des systèmes ouverts, qui ne peuvent se maintenir et croitre en complexité et organisation sans apports suffisants en énergie et en ressources. La dynamique des processus évolutifs et d'auto-organisation dans la nature est régie par les lois de la thermodynamique, auxquelles les sociétés humaines ne peuvent pas non plus se soustraire.

Les distributions régionales de consommation primaire et de PIB par tête dans le monde, montrées dans les figures 1 et 2, affichent dans leur très grande hétérogénité une similitude frappante.

C'est une simple manifestation, bien qu'à gros traits, de la corrélation entre consommation d'énergie et PIB, que nous allons analyser plus en détails. La distribution géographique de consommation d'énergie primaire (fig. 1) montre aussi qu'une bonne moitié de la population mondiale



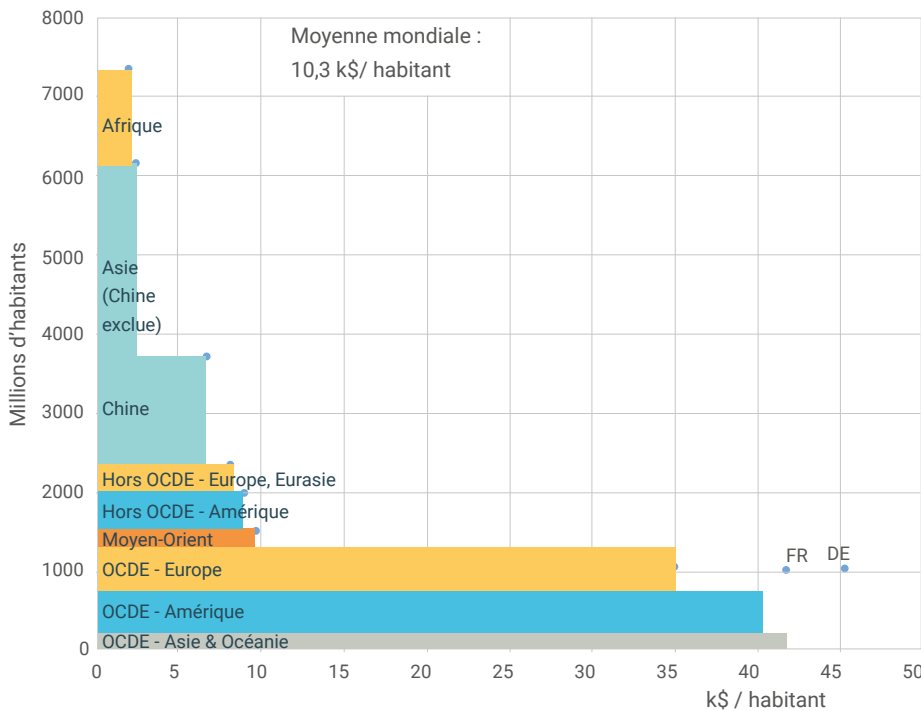
1. Répartition régionale de la consommation annuelle d'énergie primaire par habitant exprimée en tep par habitant (1 tep = 11, 63 MWh).   partir de données de l'Agence internationale de l'énergie (IEA, www.iea.org/).



© Alice Hunter.

0,800-1,000 (très élevé) 0,700-0,799 (élevé) 0,555-0,699 (moyen) 0,350-0,554 (faible) données inexistantes

Carte des pays du monde par catégorie d'indice de développement humain (IDH), selon l'ONU en 2021.



2. Répartition mondiale du produit intérieur brut (PIB) par habitant (à partir de données de l'IEA).

doit se contenter actuellement d'environ un tiers de la moyenne mondiale par tête, alors que nous en consommons le double en France. Il ne pourra y avoir d'accès au développement et à plus de services pour toute l'humanité sans croissance de la consommation énergétique. L'évolution démographique et le développement impliquent une croissance des besoins énergétiques au niveau mondial.

Tout d'abord, nous discuterons le rôle de l'énergie dans l'évolution des sociétés humaines à partir de principes familiers aux physiciens, puis en observant la relation entre l'Indice de Développement Humain (IDH) et la consommation d'énergie par habitant. Nous rapporterons ensuite les résultats totalement concordants de deux approches différentes, qui prouvent le rôle capital de l'énergie dans la formation du PIB. Ce rôle est encore largement sous-estimé par de nombreux économistes, alors que l'énergie constitue la mesure universelle des transformations de la matière associées à la création de biens et de services. Dans une dernière partie, nous montrerons que certaines innovations technologiques permettent d'ouvrir des pistes de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

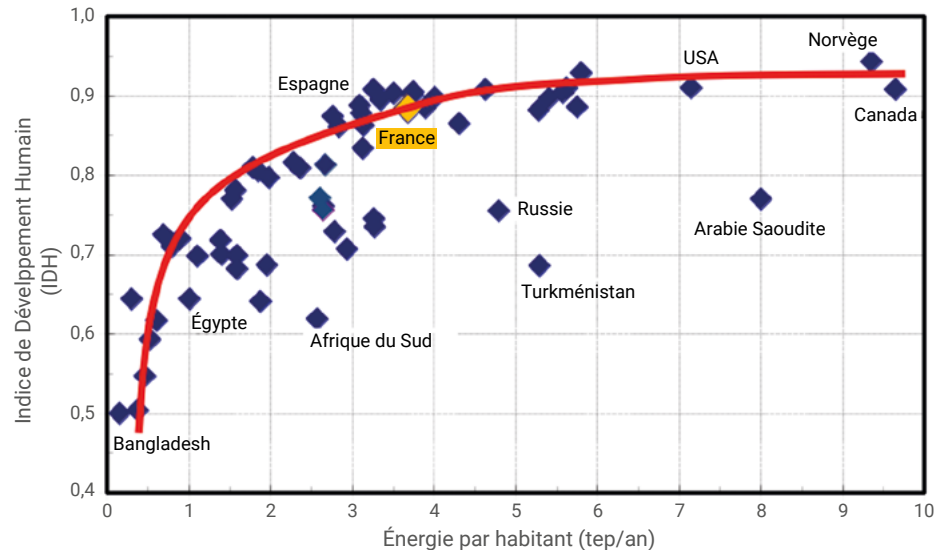
>>>

Énergie et macro-économie

Énergie et dynamique d'évolution

Tout au long de leurs cycles de vie, les échanges des organismes vivants avec l'environnement sont régis par les lois de la thermodynamique. Ce sont des systèmes ouverts qui ne peuvent se développer et maintenir leur état organisé que grâce à des apports suffisants en nourriture. Rappelons pour fixer les idées que la consommation d'énergie associée à notre métabolisme est de 3 kWh/jour, ce qui correspond à une puissance moyenne de 130 W, dont seulement 30 à 40 W sont convertis en travail musculaire. La majorité est consommée en processus chimiques et pour le maintien de notre température corporelle. Elle est dissipée finalement sous forme de chaleur dans l'environnement, ce qui conduit à une production d'entropie, en accord avec le premier et le second principe de la thermodynamique. Les sociétés humaines considérées sous l'angle de leurs échanges d'énergie et de ressources avec leur environnement ne peuvent pas échapper à ces deux principes fondamentaux.

C'est grâce au rôle moteur de l'énergie, qui permet la formation et le maintien de structures stables, que les organismes vivants et les sociétés se développent et peuvent se maintenir. Les processus d'extinction, de développement, ou d'émergence de nouvelles structures sont toujours reliés à des variations de l'énergie accessible. Ce fut le cas pour les sociétés humaines, dont l'évolution a correspondu à des sauts dans la capacité à transformer la matière, grâce tout d'abord à la maîtrise du feu, puis de l'agriculture, et enfin à l'utilisation des ressources fossiles. Ainsi, alors que pour les groupes de chasseurs-cueilleurs la consommation énergétique moyenne par individu, nourriture comprise, après la domestication du feu, est estimée à 6 kWh/j (en gros 2 kWh de nourriture et 1 kg de bois), dans les premières sociétés agraires cette consommation saute à 14 kWh/j, puis à 30 kWh/j durant le Moyen Âge européen, et enfin s'élève après la révolution industrielle à plus de 100 kWh/j dans nos sociétés développées^(a).



3. Indice de développement humain en fonction de la consommation d'énergie, exprimée en tep/an (1 tep = 11,63 MWh). Source : H. Safa [10]

Corrélativement, l'accès à de nouvelles ressources énergétiques a conduit à la création de nouvelles structures sociales, plus complexes, organisées à plus grande échelle et nécessitant pour le maintien de leur consommation une part de plus en plus importante de l'énergie disponible. Intuitivement, on conçoit que ce poids grandissant dans la consommation énergétique des infrastructures et superstructures partagées entre les individus d'une société développée pourrait être mesuré en comparant consommation totale et consommation directe des ménages. Actuellement, cette dernière ne représente en gros que 35 à 40 % de la consommation totale (précisément 36 % pour l'électricité en France en 2019), alors que chez les chasseurs-cueilleurs elle représente la quasi-totalité.

La dynamique de l'évolution cosmique (cf. par exemple E. Chaisson [1]) et de la sélection naturelle au sein du vivant a incité certains chercheurs, à la suite des intuitions de Lotka (1922) [2], à rechercher un principe supplémentaire permettant de donner une base physique aux observations. (On pourra par exemple se reporter aux travaux de Martyushev [3] qui a proposé un principe de production maximale d'entropie, et à la discussion de Herrmann-Pillath [4] pour en savoir plus sur ce domaine de recherches). Mais même sans avoir à se fonder sur un tel principe, les observations

montrent clairement qu'aussi bien une plante, un animal ou une société humaine ne peut se maintenir s'il reçoit trop peu (eau, nourriture, énergie) de son environnement, ou trop !

La transposition des contraintes imposées par la thermodynamique, à une société humaine permet de comprendre que pour se maintenir et se développer cette société ne doit consacrer qu'une fraction de ses ressources énergétiques à l'obtention de ces mêmes ressources. Il a pu ainsi exister des sociétés de chasseurs-cueilleurs qui ont pu connaître une relative « abondance [5] » lorsque cette fraction était faible. Mais c'est surtout pour cela que le charbon puis le pétrole et le gaz ont permis l'essor de nos sociétés industrielles. Ces sources d'énergie ont progressivement été utilisées de préférence à la biomasse, car elles renferment deux à trois fois plus d'énergie par unité de masse^(b). La densité énergétique est cruciale, particulièrement pour des usages mobiles. La notion de taux de retour énergétique, mesurée par l'EROI (de l'acronyme anglais "Energy Return On Investment") constitue l'un des principaux critères physiques à utiliser pour évaluer des sources d'énergie ou des systèmes énergétiques complets. Elle sera discutée dans l'article suivant de G. Bonhomme et J. Treiner (p. 24). L'application de ce concept à une société a été étudiée par Lambert et Hall [6] qui définirent un EROI sociétal.

- 1• E. J. Chaisson, "Energy Flows in Low-Entropy Complex Systems", *Entropy*, **17** (2015) 8007-8018.
- 2• A. J. Lotka, "Contribution to the Energetics of Evolution", *PNAS*, **8**(6) (1922) 147-151, et "Natural Selection as a Physical Principle", *PNAS*, **8**(6) (1922) 151-154.
- 3• L.M. Martyushev et V.D. Seleznev, "Maximum entropy production principle in physics, chemistry and biology", *Physics Reports* **426** (2006) 1-45.
- 4• C. Herrmann-Pillath, "Energy, growth, and evolution: Towards a naturalistic ontology of economics", *Ecological Economics* **119** (2015) 432-442.
- 5• M. Sahlins, *Âge de pierre, âge d'abondance - L'économie des sociétés primitives*, Gallimard, (1976), 420 p. (ISBN 978-2-07-029285-1).
- 6• J. G. Lambert et al., "Energy, EROI and quality of life", *Energy Policy*, **64** (2014) 153-167.
- 7• R. Kümmel, *The Second Law of Economics: Energy, Entropy, and the Origins of Wealth*, Springer, Berlin (2011), ISBN 978-1-441-99364-9
- 8• R.U. Ayres et B. Warr, *The Economic Growth Engine: How Energy and Work Drive Material Prosperity*, Edward Elgar Publishing (2009).
- 9• R. Kümmel et D. Lindenberger, "How energy conversion drives economic growth far from the equilibrium of neoclassical economics", *New Journal of Physics* **16** (2014) 125008.
- 10• H. Safa, "The Impact of Energy on Global Economy", *Int. Journal of Energy Economics and Policy*, **7**(2), (2017) 287-295.
- 11• H. Safa, "Heat recovery from nuclear power plants", *Electrical Power and Energy Systems*, **42** (2012) 553-559.

>>>

sans limitations par du travail humain ! Des approches partant de modèles analogues mais opérant une maximisation sous contraintes (c'est-à-dire prenant en compte les contraintes physiques et technologiques qui restreignent la liberté de choix des facteurs de production), aboutissent à des résultats totalement différents montrant en particulier que l'élasticité pour le facteur énergétique est de l'ordre de 60 % à 70 % (cf. Ayres [8], Kümmel et Lindenberger [9]), en plein accord cette fois avec les données empiriques.

Ce résultat a été confirmé (cf. Safa [10]) par une évaluation directe de l'influence de l'énergie sur les activités entrant dans la constitution du PIB. Il s'agit certainement d'un travail plus fastidieux et plus long que celui qui consiste à dériver les valeurs optimales à partir d'une simple équation de régression linéaire, mais dont l'intérêt indéniable est de fournir également des informations détaillées supplémentaires sur l'impact énergétique pour chaque activité ou secteur.

Ces résultats permettent de comprendre l'origine de l'illusion que la croissance du PIB pourrait être découplée de la consommation d'énergie. De fait, et de façon plutôt évidente, le découplage apparent observé provient du glissement constaté au cours des dernières décennies des emplois depuis les secteurs de la production industrielle et de l'agriculture vers les services, tandis que la production était progressivement délocalisée vers des pays à bas cout de main-d'œuvre. Cela a réduit le cout des produits, ainsi que leur cout énergétique, de sorte que leur contribution au PIB a diminué. En conséquence, on a pu observer corrélativement une forte augmentation du PIB par quantité d'énergie employée, donc de l'efficacité énergétique.

Énergie et lutte contre le changement climatique

La réduction des gaz à effet de serre

La combustion de ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) libère du dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre. Cette pollution

d'origine énergétique est le principal contributeur aux gaz à effet de serre (GES) qui affectent lentement mais sûrement notre climat. L'effet de serre va induire un réchauffement de l'atmosphère qui pourrait potentiellement conduire à des événements catastrophiques incontrôlables sur notre planète dans le courant du siècle. Nous devons absolument atténuer cette menace par une réduction forte et délibérée de nos émissions de GES. Compte tenu de l'impact de l'énergie sur l'économie décrit précédemment, la mise en place préconisée par certains économistes d'une taxe carbone pour réduire le recours aux combustibles fossiles pourrait à la fois ne pas être économiquement supportable ni compatible avec les besoins énergétiques d'une large part de l'humanité dans les pays en développement.

En effet, selon les projections des différents scénarios issus d'agences ou d'organismes gouvernementaux et pétroliers, on peut estimer que la demande mondiale en énergie primaire en 2040 sera d'environ 18 000 Mtep, soit 200 000 TWh. On retrouve d'ailleurs ce nombre, en conservant la moyenne de consommation mondiale actuelle par habitant de 60 kWh/j étendue à une population de 9 milliards.

L'énorme défi devant lequel nous nous trouvons est donc celui de trouver des solutions techniques économiquement viables permettant une réduction drastique du recours aux ressources fossiles sans pour autant restreindre la satisfaction des besoins en énergie. L'Union européenne prévoit pour sa part de respecter les accords de Paris sur le climat en visant la neutralité carbone en 2050.

Les innovations technologiques comme leviers de la transition

Une réduction forte et décisive des émissions de GES en quelques décennies ne sera possible que si l'on passe volontairement du bouquet énergétique actuel, qui repose principalement sur les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz), à des énergies non émettrices de gaz à effet de serre, comme l'hydroélectricité, le nucléaire et les énergies renouvelables. Ceci implique certainement



un recours accru à l'électricité dans les usages finaux (elle n'en couvre actuellement en Europe que 23 %), à condition bien sûr que la production d'énergie électrique soit elle-même décarbonée, ce qui est loin d'être le cas pour tous les pays européens. L'Union européenne prévoit ainsi une croissance de 53 % de la consommation d'électricité à l'horizon 2050. Les usages finaux, qui reposent majoritairement sur les ressources fossiles, concernent d'une part des besoins en chaleur pour le résidentiel et le tertiaire et d'autre part le secteur des transports.

Deux pistes d'innovations technologiques pourraient ouvrir la voie à une véritable transition énergétique : le passage aux véhicules électriques pour le transport routier et la récupération de la chaleur perdue, dite fatale, des centrales électriques [11] pour les logements, les centres d'affaires et les processus industriels. Nous allons donner ici un aperçu de ces deux technologies majeures de rupture.

Cogénération et production de chaleur décarbonée

Une part importante des besoins en énergie est la chaleur, et ces besoins correspondent pour 65 % d'entre eux à une chaleur à basse température, c'est-à-dire inférieure à 120°C. Or, pour des raisons liées aux lois de la thermodynamique, le processus de conversion d'énergie primaire en énergie électrique génère aussi, dans des proportions dépendant de la température de la source chaude, d'énormes quantités de chaleur fatale (en 2018, sur les 5,48 Gtep d'énergie d'entrée alimentant l'ensemble des centrales électriques dans le monde, 2,84 Gtep ont été gaspillées !). On gagnerait à récupérer cette énergie perdue pour satisfaire une partie de nos besoins en chaleur, sous réserve que la température à laquelle se fait la récupération puisse alimenter des réseaux de chaleur au lieu de réchauffer l'atmosphère, l'eau des rivières ou encore la mer. C'est le principe de la cogénération, à laquelle un article de M. Leurent et H. Safa est consacré dans la seconde partie (p. 73).

Électrification des transports

Aujourd'hui, le transport est fortement dépendant des ressources pétrolières puisque 92,3 % de l'énergie mondiale utilisée pour le transport est constituée de produits pétroliers. La raison en est la très forte densité énergétique des combustibles liquides (11600 Wh/kg). Le recours à l'électricité, soit direct par utilisation de moteurs électriques alimentés soit par des batteries électrochimiques, soit par des piles à combustibles à hydrogène, pourrait ouvrir des pistes en dépit de verrous technologiques ou économiques spécifiques qui seront discutés dans la troisième partie.

Notons simplement à ce stade que la piste de l'hydrogène produit par électrolyse pour remplacer les carburants fossiles conduirait, pour avoir une influence notable, à une énorme augmentation des besoins en énergie électrique. En effet, la substitution envisagée par la France à l'horizon 2050 de l'hydrogène aux ressources fossiles, à hauteur de 20 % de la consommation d'énergie finale nécessiterait une production annuelle de l'ordre de 10 millions de tonnes. La production par électrolyse demanderait de l'ordre de 500 TWh d'énergie électrique, c'est-à-dire autant que la consommation annuelle actuelle.

Conclusion

Bien que l'énergie ne pèse qu'entre 2 et 7 % du PIB dans les pays développés occidentaux, son importance est cruciale dans toutes les activités de nos économies modernes, car elle affecte plus de 60 % des coûts de production en France. Ce rôle vital de l'énergie est bien sûr en parfait accord avec les lois de la nature et de la thermodynamique, qui s'appliquent aussi aux êtres vivants et aux sociétés humaines. L'évaluation de la contribution de l'énergie à l'évolution du PIB démontre que son poids réel dans l'économie est tel que la substitution, ou bien de capital (pour augmenter par exemple l'efficacité énergétique), ou bien de main d'œuvre, ne peut pas suffire. C'est donc bien une illusion dangereuse que de croire que nous pourrions maintenir une société à haut niveau de services tout en réduisant drastiquement la consommation d'énergie et de ressources. L'énorme défi à relever, dans de courts délais à cause de l'urgence climatique, est de mettre en œuvre des solutions décarbonées économiquement viables limitant autant que possible l'impact sur l'environnement, c'est-à-dire les rejets de déchets polluants et les besoins en ressources minérales. Des percées technologiques sont essentielles pour faciliter la transition énergétique des combustibles fossiles vers des sources sans carbone. ■

(a) L'invention de l'agriculture a permis un saut d'environ un facteur 1000 dans la quantité moyenne de ressources (nourriture pour les hommes et les animaux d'élevage) qui est passée ainsi de la gamme du kWh/ha/an à celle du MWh/ha/an. La consommation actuelle d'énergie en Europe avec une densité de population de 1,14 hab/ha correspond à 40 GWh/ha/an. (Remarque : la production d'électricité éolienne est de l'ordre de 40 MWh/ha/an).

(b) Le pétrole fournit 11600 Wh/kg, à comparer aux 2000 à 4000 Wh/kg de la biomasse selon son taux d'humidité.

(c) L'IDH est fondé sur une pondération entre PIB, niveau d'éducation et niveau de santé. Il a été développé en 1990 par l'économiste indien Amartya Sen, prix Nobel d'économie, et l'économiste pakistanais Mahbub ul Haq. Pour connaître les détails de la composition de l'indice de développement humain consulter le site des Nations unies à l'adresse suivante : <https://cutt.ly/human-development-index>

(d) En économie, une fonction de production exprime sous forme d'équation la relation entre les facteurs de production K, L, E (capital, travail, énergie) d'une organisation et la quantité produite. La forme dite de Cobb-Douglas, $Y_{cp} = Y_0 K^{\alpha} L^{\beta} E^{\gamma}$, de la fonction de production est obtenue à partir de deux hypothèses : (i) Y est une fonction d'état doublement différentiable, où les élasticités α, β et γ doivent satisfaire aux relations de Maxwell ; (ii) Y est une fonctionnelle linéaire homogène, ce qui découle par exemple de la condition qu'un doublement du système de production, par doublement de chacun des facteurs de production, conduise à un doublement de la production. Mais cette solution suppose une complète substituabilité des facteurs de production, c'est-à-dire que l'on pourrait par exemple remplacer totalement l'énergie par de la main d'œuvre (cf. R. Kümmel *et al.*, *New Journal of Physics* **16** (2014) 125008).