

Rôle de l'énergie dans la société de croissance considérée en tant que système complexe

Par Philippe CHARLEZ

Expert en questions énergétiques à l'Institut Sapiens

Reposant sur trois piliers (un contexte : la démocratie libérale ; un catalyseur : la technologie ; et un aliment : l'énergie), la société de croissance est une gigantesque structure dissipative hors équilibre. Nécessitant un flux d'énergie rentrant considérable (162 PWh, en 2021), elle produit 90 T \$ de richesses, mais émet 35 Gt de CO₂ dans l'environnement.

Comme toute structure dissipative, la société de croissance est un système ouvert (libre échange), ordonné (ordre, autorité) et inégalitaire (inégalités sociales). La réduction de la pauvreté passant par la création de richesses, elle est donc indissociable d'ouverture, d'ordre et d'inégalités. En revanche, et contrairement à ce qui est ancré dans l'imaginaire collectif, l'égalitarisme, le désordre et la fermeture (qui correspond à l'équilibre thermodynamique) ne réduisent pas la pauvreté, mais, au contraire, l'accroissent.

Le concept de structure dissipative

Albert Einstein considérait la thermodynamique comme « la seule science au contenu universel ». Pourtant, les scientifiques en ont au tout début restreint l'application aux seuls « états d'équilibre » : lorsqu'on laisse évoluer naturellement un système fermé, il converge vers un état égalitaire (pressions, températures...), désordonné et irréversible associé à une perte totale de mouvement et d'information. À l'équilibre, les flux s'arrêtent et le système ne peut plus fournir aucun travail : l'équilibre thermodynamique peut être qualifié de « mort clinique » du système.

Pour lutter contre cette situation mortifère pourtant de loin la plus probable, la nature a imaginé le concept de « structure dissipative », théorisé au début des années 1970 par le chimiste belge Ilya Prigogine. Maintenu en permanence hors équilibre, car ouverte sur son milieu extérieur (c'est-à-dire son environnement), ordonnée mais inégalitaire, une structure dissipative y puise des ressources matérielles et énergétiques, en conserve l'énergie de haute valeur (on parle de thermodynamique d'énergie « libre ») pour son fonctionnement propre et y rejette des déchets.

Tous les systèmes naturels inertes (galaxies, étoiles, planètes) mais aussi vivants (végétaux, animaux) survivent de cette façon dans un univers cherchant pourtant à tout instant à leur imposer l'équilibre thermodynamique. Le corps humain n'échappe pas à la règle : vous mangez et vous respirez (flux d'énergie rentrant), vous bougez, vous pensez et vous maintenez votre température à 37°C (énergie libre) et vous rejetez dans l'environnement du CO₂ et des excréments (flux de déchets sortant). Quant à l'équilibre thermodyna-

mique du corps humain, il correspond tout simplement à la mort clinique : votre température retourne à celle de la pièce (égalitarisme), votre corps est dispersé dans l'humus du sol (désordre) et vous perdez la richesse de vos mouvements et l'information stockée dans votre cerveau.

Plus une structure dissipative est complexe, et plus elle réclame un flux important d'énergie¹. Ainsi, par unité de masse, le cerveau humain consomme 15 millions de fois plus d'énergie qu'une galaxie !

Premières incursions de l'humanité hors équilibre

En tant que chasseur cueilleur, l'« homme animal » vivait en quasi équilibre thermodynamique avec son environnement, attendant la générosité de la nature pour lui fournir sa nourriture. Il n'est donc pas étonnant que son espérance de vie « a-sociétale » ne fût que de 28 ans.

En inventant le feu, il y a environ 500 000 ans, l'homme a rompu son équilibre thermodynamique originel. Les applications domestiques du feu (chauffage, cuisson des aliments) ont accru significativement son espérance de vie, qui est passée en quelques milliers d'années de 28 à 33 ans. Mais, en consommant des ressources (bois) et en émettant des déchets (fumée et cendres), l'homme primitif transforma progressivement son organisation sociale en structure dissipative. Au fur

¹ CHAISSON Éric J. (2014), "The Natural Science Underlying Big History", *The Scientific World Journal*, volume 2014, article ID 384912, 41 pages.

et à mesure de ses nouvelles inventions (la pierre et le harpon au paléolithique, puis l'agriculture, le cuivre, le bronze, le fer et la roue au néolithique), il améliora ses conditions de vie, mais, en parallèle, augmenta significativement sa consommation de ressources et ses émissions de déchets. Comme toute structure dissipative, la société antique qu'il inventa devint aussi de plus en plus ouverte (échanges commerciaux), ordonnée (organisation, autorité) et inégalitaire, avec notamment le développement de l'esclavage à grande échelle.

Pourtant assez rapidement l'« horloge technologique » s'arrêta et le développement humain stagna pendant plusieurs millénaires. Ainsi, entre le char de Ramsès II poursuivant Moïse à travers la mer Rouge, celui de Ben Hur combattant Messala dans les arènes de Rome et la diligence du début du XIX^e siècle, on observe aucune percée technologique (voir la Figure 1). Ces observations sont confirmées par les travaux de l'économiste britannique Angus Madison², lequel à partir de standards sociétaux a reconstitué l'histoire de la croissance économique depuis l'Empire Romain. Entre l'Antiquité et le début du XIX^e siècle, l'homme ne parvint pas à améliorer son niveau de vie. Ainsi, sous le premier Empire, l'espérance de vie est de 35 ans, soit seulement deux petites années de plus qu'au temps des hommes des cavernes !

Alors que durant vingt siècles, le PIB mondial était resté quasi stationnaire (voir la Figure 2), il décolla d'abord lentement à partir de la seconde moitié du XIX^e siècle,



Figure 1 : Entre l'Antiquité et le début du XIX^e siècle, l'homme n'enregistre pratiquement aucun progrès technique.

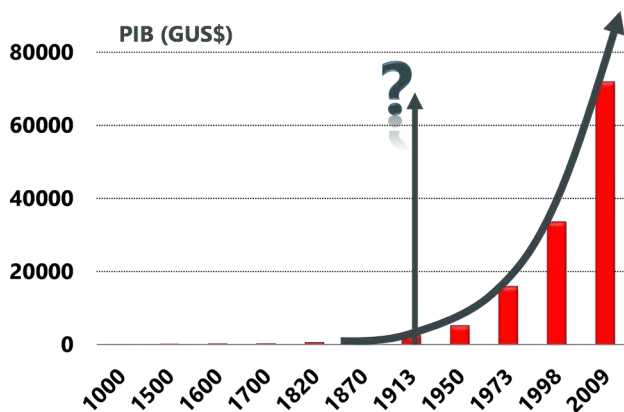


Figure 2 : Évolution du PIB mondial depuis l'An mille (d'après Madisson).

² https://www.lemonde.fr/idees/article/2010/02/22/angus-maddison-met-le-chiffre-au-service-de-la-pensee-par-pierre-jacquet_1309494_3232.html

puis sa croissance s'accéléra exponentiellement après le second conflit mondial. À l'échelle de l'humanité, la croissance économique et le développement humain qui en résulte apparaissent comme des anomalies historiques. D'où la question clé : quelles sont les raisons structurelles d'une telle rupture dans l'évolution des sociétés humaines ?

Les trois piliers du développement humain

La société de croissance repose sur trois piliers : un contexte (la démocratie libérale), un catalyseur (la technologie) et un aliment (l'énergie).

Elle est née à la fin du XVIII^e siècle, dans un contexte amorcé 250 ans plus tôt par la révolution copernicienne (combat séculaire contre le géocentrisme gravé dans la Bible !), puis a été progressivement consolidée par les Lumières, durant la seconde moitié du XVIII^e siècle. Si l'humanité ne s'était pas libérée d'un carcan religieux qui avait confisqué la pensée pendant vingt siècles, la Révolution industrielle n'aurait pas été rendue possible. Les travaux de Madison démontrent, sans ambiguïté, la corrélation à la fois temporelle et spatiale entre la naissance de la croissance économique et l'émergence de la démocratie libérale.

Sur le plan technologique, la machine à vapeur de l'écossais James Watt a changé du tout au tout notre regard sur le monde. Transformant miraculeusement le « feu des hommes des cavernes » en énergie mécanique, elle dégagait une force mécanique puissante et maîtrisable. Il serait toutefois injuste d'attribuer à Watt le monopole technologique de la révolution industrielle. Cinquante ans plus tard, l'Anglais Michael Faraday produisit du courant électrique en faisant tourner un disque dans l'entrefer d'un aimant. Pourquoi se fatiguer ? La machine à vapeur de Watt pouvait sans effort faire tourner le disque de Faraday. En moins d'un demi-siècle, les deux savants avaient découvert le principe du générateur électrique. Vingt ans plus tard, le Croate Nikola Tesla inversa le processus en utilisant le courant électrique pour faire tourner le disque de Faraday. Le moteur à induction fermait la boucle : le « feu des hommes des cavernes » pouvait à souhait se transformer en énergie mécanique et en électricité (voir la Figure 3 page suivante). Plus besoin du labeur de l'homme et du travail du cheval pour produire, les machines travaillaient à leur place avec une efficacité démultipliée.

Malheureusement, si « le feu des hommes des cavernes » était venu à manquer, les géniales inventions de Watt, Faraday et Tesla se seraient rapidement transformées en froides et immobiles pièces de musée. Si la technologie est le catalyseur endogène de la croissance, l'énergie en est l'aliment exogène. Il n'est donc pas étonnant que dès le début de la révolution industrielle, la croissance économique se soit goulument nourrie d'énergies en général, et d'énergies fossiles en particulier. En 2021, ces dernières représentaient toujours 82 % de la consommation mondiale d'énergie primaire.

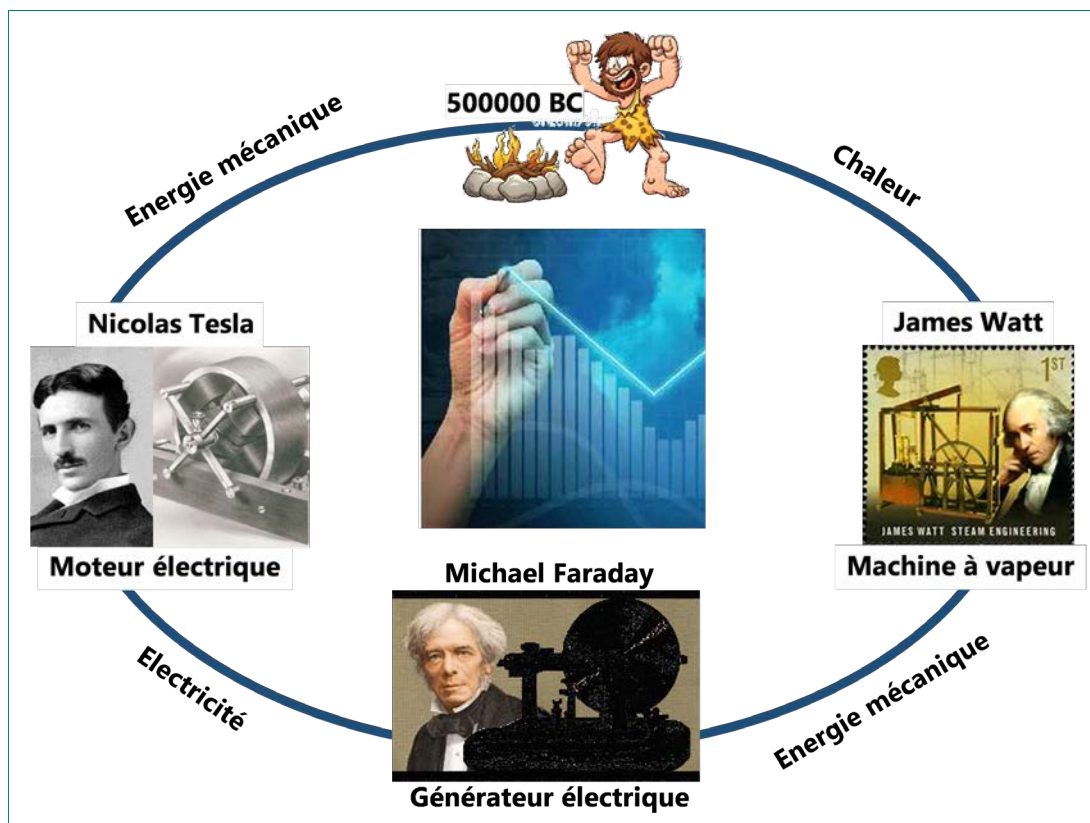


Figure 3 : La boucle technologique.

La société de croissance : une gigantesque structure dissipative

Comme tous les systèmes naturels inertes et vivants, la société de croissance est une structure dissipative hors équilibre (voir la Figure 4). Son flux d'énergie entrant (162 PWh) a produit en 2021 90 T \$ de richesses et rejeté 35 Gt de CO₂ dans l'environnement. Elle met en lumière deux paramètres fondamentaux :

- d'une part, l'intensité énergétique, qui correspond à la quantité d'énergie entrante rapportée à la richesse produite. Plus l'intensité énergétique est faible, et plus le système énergétique est performant, puisqu'une même production de richesses requiert moins d'énergie. Réduire l'intensité énergétique relève à la fois de mesures technologiques dans les

transports, l'habitat, l'industrie et la génération électrique, mais aussi de comportements énergétiques plus vertueux ;

- et, d'autre part, l'intensité carbone, qui représente la quantité de déchets produits (tonnes de CO₂) par unité d'énergie entrante. Réduire l'intensité carbone nécessite de remplacer les énergies très carbonées (charbon, pétrole) par des énergies moins carbonées (gaz naturel) ou décarbonées (nucléaire, hydroélectricité, énergies renouvelables). La décarbonation du MWh passera essentiellement par une électrification des usages dans les transports (voiture électrique, hydrogène vert), l'habitat (pompes à chaleur) et l'industrie (réduction du minerai de fer à l'hydrogène, utilisation de fours à arc électrique dans la sidérurgie, les verreries et les cimenteries).

Le produit intérieur brut (PIB) mesure, quant à lui, la somme monétaire des biens (richesses matérielles) et des services (richesses intellectuelles) produits sur une année. La société de croissance ne peut donc se maintenir hors équilibre qu'aux dépens de son environnement. Un processus admirablement résumé par l'économiste roumain Georgescu-Roegen³ : « la joie de vivre se nourrit de basse entropie puisée dans l'environnement ».

Comme toute structure dissipative, la société de croissance est un système ouvert (libre échange), ordonné (ordre, autorité) et inégalitaire (inégalités sociales).

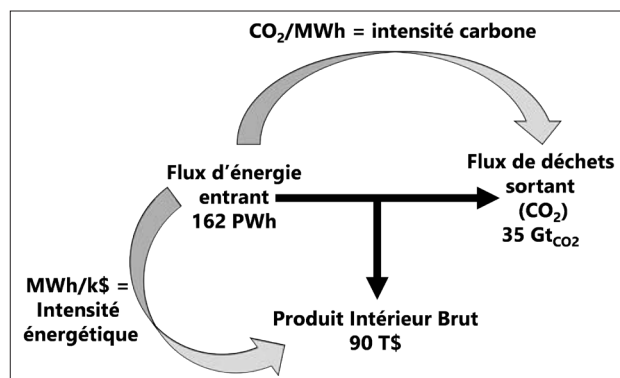


Figure 4 : Le modèle énergétique de la société de croissance.

³ GEORGESCU-ROEGEN Nicholas (1970), *La Décroissance – Entropie, Écologie, Économie*, Éditions Sciences de la Terre.

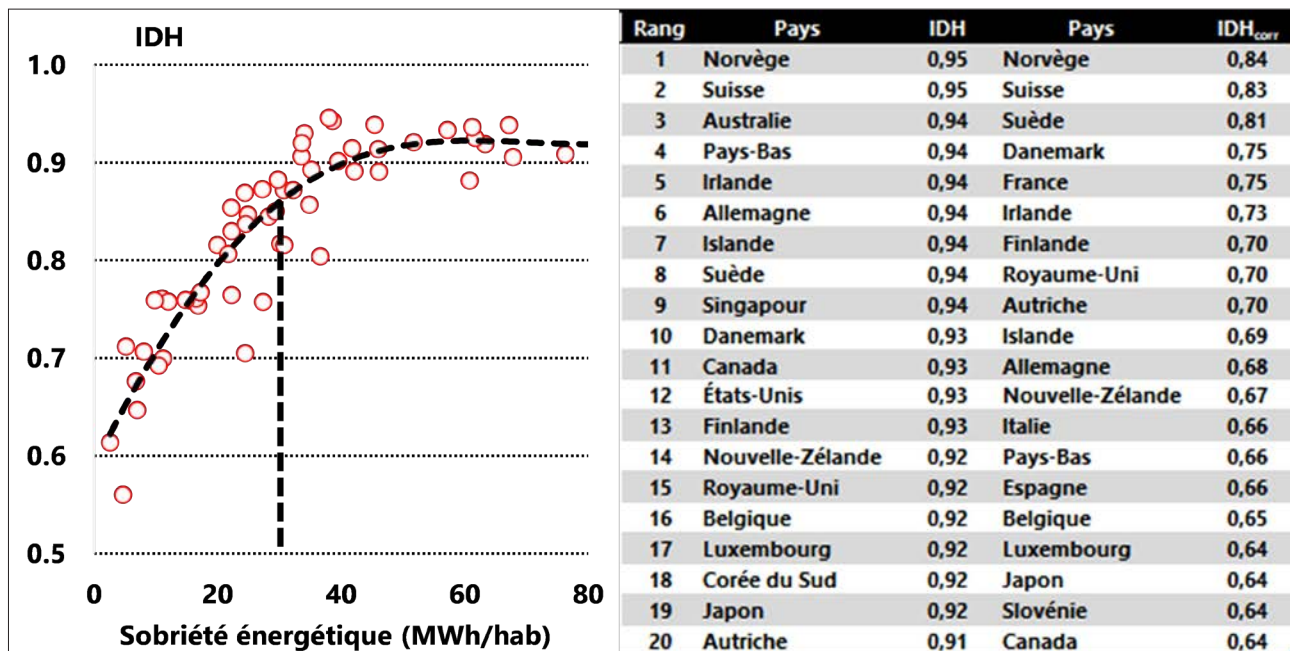


Figure 5 : Évolution de l'IDH en fonction de la consommation d'énergie – Indice de développement humain avant et après corrections environnementales – Source : UN, Banque mondiale, *BP Statistical Review 2020*.

La réduction de la pauvreté passant par la création de richesses, elle est donc indissociable d'ouverture, d'ordre et d'inégalités. En revanche, et contrairement à ce qui est ancré dans l'imaginaire collectif, l'égalitarisme (qui correspond à un équilibre thermodynamique), le désordre et la fermeture de l'économie accentuent la pauvreté.

Croissance économique, énergie et développement humain

Est-il besoin de chiffres pour démontrer l'extraordinaire aptitude de la croissance économique à stimuler le développement humain ? Les messages que nous envoient les différents indicateurs sont tellement limpides qu'il peut paraître inutile de les commenter.

À la fin du XIX^e siècle, la mortalité infantile, en France, était encore de 15 %. Elle est tombée à 5 % en 1950 et à 1 % au début des années 1980. Depuis 2010, elle est tombée à 0,3 % dans la plupart des pays développés. À l'autre extrémité de la vie, la croissance économique a été le principal propulseur de l'espérance de vie. Au milieu du XVIII^e siècle, la durée de vie moyenne d'un Terrien n'excédait pas 35 ans. Durant les Trente Glorieuses, l'espérance de vie était voisine de 65 ans. Elle est aujourd'hui supérieure à 80 ans. Les dépenses de santé vont évidemment de pair avec la croissance de la richesse. Tandis que les pays les plus pauvres dépensent annuellement moins de 100 \$/hab. pour la santé, dans les pays les plus développés, ces dépenses dépassent souvent les 5 000 \$. Richesses, dépenses de santé, mortalité infantile et espérance de vie sont bien évidemment étroitement liées. L'environnement n'y échappe pas. N'en déplaise à certains, l'écologie est un « sport de riches » très peu pratiqué dans les pays pauvres.

La richesse n'est pas que matérielle. Elle est aussi synonyme d'éducation et de comportements plus vertueux. Si la croissance économique n'est en rien une garantie d'honnêteté, elle y contribue indirectement par le truchement des règles logiques qu'elle impose à la société. Dans les faits, les démocraties libérales sont de loin les pays les moins corrompus.

Publié tous les ans par l'ONU et combinant trois indicateurs principaux (PIB/hab., espérance de vie et nombre d'années d'éducation à partir de 15 ans), l'indice de développement humain (IDH) établit une hiérarchie du développement. L'énergie étant le principal « aliment de la croissance », elle est par construction un ingrédient majeur du développement humain. Le développement optimal se situe entre un « socle de pierre » de 30 MWh, au-dessous duquel l'entrée dans le sous-développement peut s'avérer très rapide, et un « plafond de verre » de 50 MWh, au-dessus duquel on entre dans une société de gaspillage énergétique (voir la Figure 5 ci-dessus – Graphique de gauche), le surcroît de consommation n'augmentant que marginalement le niveau de développement. Ainsi, pour des niveaux de développement similaires, un Américain (80 MWh/hab.) consomme annuellement deux fois plus qu'un Européen (40 MWh/hab.). Il existe donc une marge importante d'optimisation énergétique de notre société de croissance. Hélas, au gaspillage énergétique vient se superposer la croissance démographique. Même si les pays de l'OCDE optimisent leur consommation, le louable objectif consistant à amener les 8 milliards de Terriens actuels au-dessus du socle de pierre n'est pas compatible avec une réduction de la consommation mondiale. Il conduirait à une consommation annuelle d'énergie de 240 PWh, soit 50 % de plus que les 162 PWh consommés en 2021.

Vers un développement durable reposant sur une croissance soutenable

En ramenant l'intensité énergétique des pays émergents au niveau de celle de l'Europe, le PIB mondial actuel serait obtenu avec 2,5 fois moins d'énergie ; en ramenant l'intensité carbone du monde à hauteur de celle de la France, les émissions seraient réduites de moitié. Autrement dit, les meilleures technologies et les meilleurs comportements pourraient permettre de faire 5 fois mieux. Les réserves quant à l'optimisation de notre société de croissance sont donc considérables. Encore faut-il transcender nos résistances tant sur le plan collectif qu'individuel, privilégier les faits à l'intérêt et à la croyance, la science à l'idéologie. En d'autres termes, le développement humain peut être « durable » s'il repose sur une croissance « soutenable » prenant en compte non seulement les aspects économiques et sociétaux, mais aussi les aspects énergétiques et environnementaux.

En 1987, la Commission Bruntland⁴ a ouvert la voie au concept de « développement durable », qui repose sur la gestion simultanée de trois capitaux complémentaires mais non substituables : le sociétal, l'économique et l'environnemental. La stabilité d'un tel modèle⁵ demande que les sphères économique et sociétale soient contraintes par la sphère environnementale.

La transition énergétique s'inscrit dans ce concept et s'appuie sur trois piliers en parfaite bijection avec les trois capitaux du développement durable. Le premier est sociétal et se devra d'assurer la sécurité énergétique aux 1,3 milliard de Terriens n'ayant pas aujourd'hui accès à l'électricité, notamment en Afrique⁶. Le second est économique et concerne la compétitivité des entreprises, qui, dans de nombreux secteurs d'activité, est conditionnée par les prix des énergies. Le troisième, environnemental, relève de la problématique climatique. Il requiert une réduction impérative et rapide de notre consommation d'énergie en général, et des énergies fossiles en particulier. Comme le répète souvent le patron de TotalEnergies, Patrick Pouyanné, l'énergie doit être à la fois « disponible, abordable et propre ».

Or, si le calcul actuel de l'IDH tient compte des aspects économiques (richesse par habitant) et sociétaux (éducation et santé), il ignore la dimension environnementale. Une dimension qui bouleverserait de façon très significative la hiérarchie mondiale du développement (voir la Figure 5 de la page précédente – Tableau de droite). En prenant en compte dans la détermination de l'IDH l'intensité énergétique et l'intensité carbone⁷, la France qui ne fait pas partie du top 20 intégrerait le top 5, alors

que Singapour, l'Australie, la Corée du Sud et surtout les États-Unis disparaîtraient d'un top 20 composé de dix-sept pays européens (le premier pays non européen, la Nouvelle-Zélande, occupant la douzième place). La hiérarchie européenne serait elle-même profondément bouleversée : le Danemark passerait de la dixième à la quatrième place et le Royaume-Uni de la quinzième à la huitième, alors que les Pays-Bas régresseraient de dix places, et l'Allemagne, malgré son très coûteux Energiewende, de cinq.

Une telle révision du concept de développement devrait concilier deux visions opposées de la société : l'une conservatrice issue des Trente glorieuses privilégie l'économique et le sociétal aux dépens de l'environnement, et serait même négationniste quant à la réalité du réchauffement climatique et de ses conséquences ; tandis que l'autre, écologiste, hypertrophie le pilier Climat et promeut une société décroissantiste sacrifiant le développement humain sur l'autel du climat.

La nature est trop précieuse pour l'endommager mais le développement humain est trop précieux pour y renoncer. À tout instant, ressassons-nous cette parole prémonitoire de Francis Bacon : « on ne commande à la nature qu'en obéissant à ses lois ».

⁴ Nom donné à la Commission en reconnaissance de l'action du Premier ministre norvégien Gro Harlem Brundtland, qui présida la Commission mondiale de l'environnement et du développement.

⁵ Économiste au département Environnement de la Banque mondiale, H. Dally est étroitement attaché à la théorie de la Steady State Economy.

⁶ EUROGROUP (2015), « L'énergie en Afrique à l'horizon 2050 ».

⁷ CHARLEZ Ph. (2022), « L'utopie de la croissance verte. Les lois de la thermodynamique sociale », Éditions J.-M. Laffont.