

VICTOR COURT

L'EMBALLEMENT DU MONDE

**Énergie et domination dans l'histoire
des sociétés humaines**



écosociété

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

La grande course de l'histoire humaine	9
De quoi l'Anthropocène est-il le nom ?	10
Énergie et structure de l'histoire	16
Écueils à éviter pour ne pas s'égarer	19
Destination et feuille de route	22

PREMIÈRE PARTIE

LE TEMPS DES COLLECTEURS

CHAPITRE 1

L'étincelle qui alluma l'histoire	29
Premiers jalons d'une longue lignée	29
Le genre humain entre en scène	33
Chasse d'épuisement et évolution cognitive	38
Le saut énergétique de la maîtrise du feu	43

CHAPITRE 2

Une espèce pour les gouverner toutes	48
Apparition et dispersion de <i>Sapiens</i>	48
Caractéristiques de la vie au Paléolithique	55
Tous égaux à l'Âge de pierre : évidence ou utopie ?	62
« Révolution » cognitive	70

CHAPITRE 3

Exploiter le soleil autrement	75
Une transition des plus étranges	75

Différents endroits, différents moments	78
Prérequis indispensables	83
Une victoire à la Pyrrhus	90
Résumé de la première partie	96

DEUXIÈME PARTIE
LE TEMPS DES MOISSONNEURS

CHAPITRE 4	
Genèse des premières mégamachines	103
Changement de braquet	104
En avant pour la domination	114
Principes fondamentaux de l'État	124
Pouvoir et folie des grandeurs	130

CHAPITRE 5	
Les vicissitudes énergétiques de l'État	143
L'empire : un colosse aux pieds d'argile	143
Remarques sur la notion d'effondrement	150
Énergie et dynamique des sociétés étatiques	155
S'obstiner ou tenter l'impossible	164

CHAPITRE 6	
Les cours d'eau, le vent et l'interconnexion des Mondes	173
Innovations énergétiques et prospérité	173
D'un bouleversement à l'autre	183
Interconnexion mondiale	189
Nouvelle donne en Europe	200
Résumé de la deuxième partie	214

TROISIÈME PARTIE
LE TEMPS DES EXTRACTEURS

CHAPITRE 7	
La naissance de l'économie fossile	223
L'amorce industrielle	224
Au sujet de la science moderne	236
Déterminants d'un décollage	241
Racines sociales d'un triomphe	250

CHAPITRE 8	
L'évolution des mégamachines fossiles	257
Domination et servitude planétaires	257
L'or noir et la fée Électricité	268

Les mutations de la puissance	279
Construction et érosion des démocraties modernes	291
CHAPITRE 9	
Les métamorphoses de la modernité tardive	299
Les sentiers de la perte	300
D'un mirage à l'autre	310
Sécession parée de faux-semblants	320
Le progrès comme religion	332
Résumé de la troisième partie	344
CONCLUSION	
Où en sommes-nous ?	357
La carte et le territoire	358
Résumé en trois actes	368
Itinéraire de l'égarement	386
L'Anthropocène face à l'histoire	390
PERSPECTIVES	
Réflexions sur les tribulations à venir	402
À la croisée des chemins	402
Bifurcation inédite	420
Pièges à déjouer	428
Possibilités d'échappatoire	442
REMERCIEMENTS	450
ANNEXES	
ANNEXE I	
Quelques tableaux pour bien manipuler le concept d'énergie	453
ANNEXE II	
Enquêter sur le passé avec les indices du présent	458
ANNEXE III	
Origine et déroulement du choc pétrolier de 1973-74	462
ANNEXE IV	
Émissions de gaz à effet de serre : à qui la faute ?	469
Liste des encadrés, figures et tableaux	476
Bibliographie	479

Énergie et structure de l'histoire

La plus universelle des grandeurs

Nous pensons rarement à l'approvisionnement énergétique de la société dans laquelle nous vivons, ou à la façon dont l'énergie permet d'apporter de la nourriture jusqu'à nos assiettes, d'approvisionner les magasins en vêtements et autres biens de consommation, de créer des prêts bancaires pour l'achat de voitures et de maisons, ou encore d'autoriser le gouvernement à instaurer des taxes. Une des raisons de cette incapacité collective à saisir le rôle de l'énergie est que l'économie est la discipline reine des sociétés modernes, et que la plupart des économistes considèrent (à tort) que l'énergie est une marchandise comme les autres, qui doit être produite et vendue de la même manière qu'une banane ou un téléphone portable, c'est-à-dire en fonction de l'offre et de la demande²⁰. C'est seulement à l'occasion de crises temporaires que les sociétés modernes se rappellent l'importance de l'énergie pour leur fonctionnement. Les chocs pétroliers des années 1970, puis les accidents nucléaires de Tchernobyl en 1986 et de Fukushima en 2011 sont probablement les exemples les plus emblématiques de ces périodes de crise qui rappellent épisodiquement aux humains que l'énergie est à la base du fonctionnement de leurs sociétés²¹. Mais dès que la situation géopolitique et sociale revient à la normale, tout le monde s'empresse de reléguer l'énergie parmi les éléments secondaires... jusqu'à la prochaine crise énergétique.

En vérité, la manifestation de l'énergie est absolument omniprésente, et même universelle: de la rotation des galaxies aux réactions thermonucléaires dans les étoiles, du mouvement des plaques tectoniques à la dynamique des écosystèmes naturels, du fonctionnement des usines produisant nos vêtements à l'activité des serveurs et des réseaux disséminant nos messages électroniques, l'énergie est partout, tout le temps. Au sens physique le plus élémentaire, tous les processus naturels et toutes les actions humaines sont des transformations énergétiques, ce qui fait réellement de l'énergie la source de tous les changements²². Aucun autre concept que celui de l'énergie n'a autant unifié la compréhension des différents aspects de l'univers que les humains tentent d'échafauder à partir de l'expérience du réel. L'encadré 1 précise les notions d'énergie et de conversion énergétique en termes légèrement plus techniques. Deux autres encadrés suivront dans les prochains chapitres pour détailler les notions de puissance et de densité énergétique.

20. Tainter et Patzek, 2012, p. 3-4.

21. Debeir, Deléage et Hémerly, 2013, p. 7.

22. Smil, 2017, p. 1, 385.

Encadré 1 – L'énergie et ses conversions

L'énergie, mesurée en joules (J), est formellement définie comme la capacité d'un système à provoquer un changement²³. Que l'énergie soit thermique, chimique, mécanique ou électrique, elle peut apparaître comme un contenu stocké ou comme un flux circulant d'un système à un autre.

L'énergie se manifeste donc sous une multitude de formes qui sont reliées entre elles par des *conversions*. Ces dernières peuvent être cosmiques, omniprésentes et incessantes, ou alors très localisées, peu fréquentes et éphémères. Quand les plantes réalisent leur photosynthèse, elles ne font rien d'autre que procéder à une conversion énergétique : elles transforment l'énergie solaire en énergie chimique, stockée sous forme de sucres. Les animaux étant incapables de réaliser cette conversion, ils sont contraints de manger les *convertisseurs* photosynthétiques que sont les plantes pour capturer l'énergie nécessaire à leur reproduction et au maintien de leur organisme. Bien sûr, cette énergie chimique n'a d'intérêt que si elle peut à son tour être convertie : ce sont les muscles qui jouent le rôle de convertisseurs de l'énergie chimique contenue dans les aliments en énergie mécanique.

Autre exemple : lorsque l'on brûle des carburants fossiles, l'énergie chimique qu'ils contiennent est convertie en énergie thermique. Cette chaleur peut ensuite être convertie en énergie mécanique. C'est ce qui se passe lorsqu'on brûle de l'essence dans un moteur pour faire avancer une voiture, ou encore quand on brûle du gaz dans une très grande chaudière pour vaporiser de l'eau qui servira à actionner une turbine dont l'énergie mécanique entraînera un alternateur afin de générer de l'énergie électrique. Comme le montre le tableau A.1 de l'annexe I, les lois de la physique autorisent d'autres types de conversions énergétiques.

Finalement, notons que, puisque l'énergie est par définition la marque du changement, la quantité totale d'énergie consommée par l'humanité correspond très exactement à sa capacité à modifier la nature. L'énergie dont chacun dispose délimite la quantité de matériaux naturels qui vont pouvoir être transformés en biens capables de délivrer divers services (se nourrir, se loger, s'éclairer, se déplacer, se divertir, etc.). Ceci implique notamment que la quantité d'énergie consommée par habitant est une bonne approximation

23. Le joule est défini comme la quantité de travail transférée à un objet lorsqu'on le déplace sur une distance de 1 mètre (m) par une force de 1 newton (N), soit $1 \text{ J} = 1 \text{ N m}$. Un newton est la force nécessaire pour accélérer 1 kilogramme (kg) à raison de 1 mètre par seconde (s) au carré dans la direction de la force appliquée, c'est-à-dire que $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$, donc $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$. Dans le contexte d'un transfert d'énergie sous forme de chaleur, $1 \text{ J} = 0,2389$ calorie, et 1 calorie représente l'énergie nécessaire pour augmenter la température de 1 gramme d'eau de 1 degré Celsius avec 1 atmosphère standard (correspondant à 101 325 pascals).

du niveau de développement matériel d'une société – généralement mesurée à l'aune de son produit intérieur brut (PIB) par habitant –, mais aussi de son empreinte sur l'environnement²⁴.

Par ailleurs, pour pleinement comprendre le rôle de l'énergie dans l'histoire des sociétés humaines, il est nécessaire de saisir le concept de *système énergétique*. Cette notion inclut des éléments écologiques, techniques, socioéconomiques et politiques. Concrètement, les systèmes énergétiques s'organisent autour de ressources différentes (bois, charbon, pétrole, uranium, vent, etc.) et d'une multitude de convertisseurs (four, unité de raffinage, centrale électrique, chaudière, etc.). Les systèmes énergétiques se distinguent également par les structures sociales d'appropriation et de gestion des ressources et des convertisseurs.

Dit autrement, un système énergétique est la combinaison originale de diverses filières de convertisseurs qui se caractérisent par la mise en œuvre de certaines sources d'énergie et par leur interdépendance, à l'initiative et sous le contrôle de classes ou de groupes sociaux, lesquels se développent et se renforcent sur la base de ce contrôle²⁵. Le parcours que nous effectuerons tout au long de ce livre nous permettra de voir concrètement en quoi consiste un système énergétique.

Deux révolutions, trois temps historiques

À l'aide des concepts énergétiques que nous venons de définir, l'histoire de l'humanité peut être divisée en trois temps, chacun caractérisé par un système énergétique prédominant, soit la chasse-cueillette (et le feu), l'agriculture (et les énergies renouvelables du vent et de l'eau) et enfin la combustion des énergies fossiles (avec ensuite le nucléaire et les énergies renouvelables modernes). Au sein de chacun de ces trois systèmes énergétiques, on peut bien sûr identifier une grande diversité de sous-systèmes propres à certains lieux et moments de l'histoire, qui interagissent et se modifient par l'amélioration des pratiques et des techniques. Les chasseurs-cueilleurs ont toujours composé avec leur environnement local, en formant des sociétés très diverses sur le plan des mœurs et des institutions. L'agriculture qui émerge indépendamment en différents points du monde repose sur des plantes, des

24. Par souci de concision, nous ne rentrerons pas dans le débat considérable qui existe sur la pertinence d'utiliser le PIB pour comparer les niveaux de vie entre les sociétés et dans le temps. Pour différentes raisons, et sans même qu'on parle des notions de bien-être, de bonheur ou de progrès, le PIB par habitant est assurément un reflet assez mauvais de la production réelle d'une société, notamment avant 1950 puisque c'est seulement à partir de cette date que les règles de comptabilité nationale ont commencé à être harmonisées entre les pays. Sur les difficultés à estimer le PIB et à en faire un indicateur pertinent, voir Baudrillard, 1996, p. 42-47; Berg, 2009; Jerven, 2012; et Prados de la Escosura, 2016.

25. Debeir, Deléage et Hémerly, 2013, p. 25.

animaux et des techniques à chaque fois spécifiques, et ces éléments se combinent pour aboutir à des organisations sociales tout aussi variées. De la même manière, il existe aujourd'hui une très grande variété de systèmes énergétiques au sein des différentes nations du monde; chacune d'entre elles définit son approvisionnement énergétique en attribuant différentes parts aux divers types d'énergies fossiles et renouvelables. Dans ce contexte, certains pays dépendent énormément d'importations énergétiques venant parfois de l'autre bout de la planète, alors que d'autres sont énergétiquement indépendants. Lorsque cela sera nécessaire, il nous faudra préciser ces éléments pour bien exposer l'importance du rôle de l'énergie dans les mutations économiques et sociopolitiques des sociétés humaines, notamment au cours des 300 dernières années. Néanmoins, au stade de cette introduction, un niveau de distinction entre trois grands systèmes énergétiques est suffisant pour montrer que l'utilisation de différentes formes d'énergie a été déterminante dans la grande course de l'histoire humaine.

Par ailleurs, la définition de ces trois grandes périodes implique logiquement d'identifier deux transitions majeures permettant de passer de l'une à l'autre. La première de ces deux transitions porte le nom de *révolution néolithique*, et elle correspond au processus de domestication progressive de différentes plantes et animaux pour finalement aboutir à l'établissement de l'agriculture comme système énergétique dominant. L'agriculture a permis aux humains d'augmenter leur capture du flux annuel d'énergie solaire, à tel point que de nouvelles formes d'organisations sociales ont pu émerger autour d'un pouvoir central bien particulier : l'État. La deuxième transition énergétique majeure de l'histoire humaine a déjà été évoquée dans cette introduction : il s'agit de la *révolution industrielle*, période qui fut marquée par un recours de plus en plus massif aux énergies fossiles. Au fil des 200 dernières années, ces nouvelles ressources de « soleil fossilisé » ont permis à certaines nations d'échapper aux contraintes énergétiques qui pesaient auparavant sur toutes les sociétés préindustrielles et, ainsi, d'obtenir une capacité de domination inédite dans l'histoire humaine. Des modes d'organisation de la vie économique, politique et sociale entièrement nouveaux ont émergé sur la base de ces sources d'énergie minérales stockées depuis des millions d'années²⁶.

[...]

26. Marks, 2015, p. 123-124.

Le saut énergétique de la maîtrise du feu

Brûlantes conséquences

Lorsqu'ils apprennent à fabriquer des pointes et des bifaces en pierre pour chasser et se protéger, nos ancêtres ne produisent que des extensions de leurs dents et de leurs ongles. Fabriquer des outils – c'est-à-dire dépenser de l'énergie pour créer un objet qui permettra ensuite d'extraire encore plus d'énergie de l'environnement – n'est pas une idée originale de notre espèce. Elle n'est même pas propre au genre humain puisque de nombreux animaux utilisent des outils pour casser des noix ou construire leurs abris. En revanche, quand nos ancêtres apprennent à manipuler le feu il y a environ 400 000 ans, et peut-être même avant³⁶, ils font quelque chose de réellement inédit.

34. Morizot, 2018, p. 174.

35. *Ibid.*, p. 179.

36. Berna *et al.*, 2012; Wrangham, 2017. Nous ne connaissons jamais la première date de l'utilisation contrôlée du feu pour la chaleur et la cuisson. À l'air libre, toutes les preuves pertinentes d'un tel événement originel ont été effacées par des centaines d'épisodes

Seules les premières espèces du genre humain ont eu l'idée et la dextérité manuelle nécessaire pour maîtriser le feu ou, pourrait-on dire, le domestiquer. Pour la première fois, un être vivant se dotait d'une ressource énergétique importante ne provenant pas de son alimentation. La maîtrise du feu a eu des conséquences pratiques considérables sur la vie de nos prédécesseurs. Elle a permis à nos ancêtres de s'éclairer pendant la nuit et dans le fond des grottes qui les abritaient parfois, d'éloigner leurs prédateurs, de se protéger du froid, de rendre leurs lances de bois plus dures et de brûler des forêts pour ensuite donner naissance à des savanes riches en gibier³⁷. Mais au-delà de ce que le feu a pu offrir à nos ancêtres au regard de la protection, de l'extension virtuelle du jour et de la capacité d'agencement du paysage, le feu a eu des conséquences encore plus importantes sur leur anatomie et probablement aussi sur leur psychologie.

Cuisiner pour se libérer l'esprit

Avant l'apparition de notre espèce, la croissance du cerveau des premiers Hominines avait accompagné tous les changements associés à leur évolution : la bipédie, la fabrication et l'utilisation d'outils et d'armes rudimentaires et, surtout, la plus grande coopération entre individus associée à toutes ces innovations. Il y a 3 millions d'années, *Australopithecus afarensis* avait un volume cérébral inférieur à 500 cm³ ; 1,5 million d'années plus tard, ce volume avait doublé chez *Homo erectus*. Mais le développement du cerveau engendre un coût énergétique considérable, car cet organe est particulièrement gourmand. Par unité de masse, le besoin énergétique du tissu cérébral est environ seize fois plus élevé que celui des muscles. Passé un certain seuil, la seule façon d'accommoder un cerveau de grande taille tout en maintenant son métabolisme global consiste logiquement à réduire la masse des autres tissus métaboliquement coûteux. Face à un tel dilemme, la réduction de la taille du système digestif est la meilleure option parce que la masse intestinale, contrairement à la masse du cœur ou des reins, peut varier considérablement selon le régime alimentaire³⁸. Puisqu'il est impossible, pour des raisons de consommation énergétique, d'avoir à la fois un gros cerveau et un système digestif de grande taille, il a fallu attendre l'apparition de nouveaux procédés d'acquisition et de préparation de la nourriture pour assurer la poursuite de la croissance du cerveau

météorologiques. Et dans les grottes, des générations d'occupants ont elles aussi supprimé à jamais les traces les plus anciennes de l'utilisation du feu. Ainsi, même si certains chercheurs vont jusqu'à parler de 1 million d'années, la majorité des experts se contentent pour le moment de 400 000 ans pour dater les premiers signes avérés de l'usage contrôlé du feu.

37. Crosby, 2007, p. 8, 15-16 ; Smil, 2017, p. 26-27.

38. Smil, 2017, p. 23.

humain. C'est vraisemblablement l'usage contrôlé du feu qui a joué ce rôle primordial.

On sait en effet que l'augmentation de la taille du cerveau et la réduction de la taille du système digestif (ainsi que celle de la denture) chez *Homo sapiens* ont été possibles, pour ne pas dire au moins partiellement causées, par l'ingestion d'aliments cuits³⁹. La cuisson des aliments attendrit leur peau et leurs autres enveloppes, ouvre leurs cellules, ce qui facilite l'activité des sucs digestifs, rend les protéines et les grosses molécules d'amidon plus digestes en les simplifiant, tue les bactéries et rend de nombreuses toxines inactives⁴⁰. De manière générale, la cuisson transforme la matière organique en aliments nourrissants et appétissants, alors qu'une nourriture crue peut être difficile ou impossible à digérer, et même potentiellement mortelle. La cuisson des aliments, en plus d'élargir la gamme des aliments consommables – par la détoxification de plantes, le ramollissement de graines, et la stérilisation de la chair et des tripes du gibier⁴¹ –, permet donc une prédigestion à l'extérieur de notre corps, notamment par une décomposition chimique de l'amidon et une dénaturation des protéines⁴². Cette prédigestion par le feu nous donne un accès plus efficace, d'un point de vue énergétique, à des formes plus diversifiées de nutriments : il y a 400 000 ans au moins, nos ancêtres commencent à pouvoir dépenser moins d'énergie pour extraire les substances nutritives des aliments qu'ils ingèrent⁴³.

Autrement dit, le fait de manger des aliments cuits a permis à nos ancêtres de baisser le coût énergétique de la mastication et de la digestion (par la réduction de la taille du tube digestif), ce qui a eu pour effet de libérer un surplus d'énergie pour assurer la croissance de leur cerveau. En conséquence, l'intestin d'*Homo sapiens* est aujourd'hui beaucoup moins long que celui des chimpanzés (relativement à leur taille totale respective), ce qui permet à un cerveau humain d'accaparer 20 à 25 % de l'énergie disponible au repos, contre 8 à 10 % chez les autres primates et seulement 3 à 5 %, en moyenne, chez les autres mammifères. Cuire les aliments par le feu a également aidé à poursuivre la réduction de la denture de nos ancêtres. Avoir de grandes dents solides et pointues est inutile et même désavantageux lorsque l'on mange de la nourriture ramollie par la cuisson. Il y a 3 millions d'années, les premiers spécimens du genre humain pouvaient peut-être encore craquer des os avec leurs dents pour en récupérer la moelle savoureuse, mais aujourd'hui, avec notre petit assemblage mas-

39. *Ibid.*, p. 26.

40. Crosby, 2007, p. 12.

41. Scott, 2019, p. 57.

42. Crosby, 2007, p. xiii, 12.

43. *Ibid.*, p. 13.

ticatoire, croquer dans un céleri cru est bien le maximum que nous puissions faire⁴⁴.

Par ailleurs, la cuisson des aliments et la chasse sont deux activités qui demandent beaucoup de coopération entre individus ainsi que des aptitudes intellectuelles très diverses, à la fois pendant la planification qui précède l'action et, surtout, pendant l'action elle-même. On peut donc légitimement penser que ces activités ont stimulé la croissance et la complexification du cerveau tout en assurant l'augmentation de l'approvisionnement énergétique nécessaire à ces transformations⁴⁵. D'ailleurs, il faut noter que l'augmentation de la taille du cerveau des bébés aurait pu poser un problème pour notre espèce : le canal pelvi-génital diminuant par adaptation à la marche bipède, l'accouchement devient compliqué et dangereux à mesure que la boîte crânienne grossit. Mais comme on l'entend parfois, il n'y a pas de problème sans solution. Celle « trouvée » par l'évolution a consisté à sélectionner les femmes qui mettaient au monde des fœtus moins développés que les autres ! Cela peut paraître paradoxal, mais les accouchements sont ainsi devenus moins mortels et compatibles avec de gros cerveaux, tout en favorisant encore un peu plus les relations de coopération entre adultes, car il faut bien s'aider pour élever de petits êtres complètement dépendants⁴⁶.

* * *

Dès notre naissance, nous avons la capacité de faire la distinction parmi les cinq saveurs primaires : le sucré, le salé, l'amer, l'acide et l'umami⁴⁷. Force est de constater que nous n'apprécions pas ces cinq saveurs de façon uniforme, et qu'une grande majorité d'entre nous préfèrent le sucré. Le déluge incessant de publicités de barres de chocolat et de sodas gorgés de sucre que nous endurons chaque jour y est sûrement pour quelque chose. Mais pas seulement, puisqu'on sait que les bébés préfèrent naturellement la saveur sucrée malgré leur insensibilité (temporaire) au matraquage racoleur de l'industrie agroalimentaire. En vérité, l'origine de notre penchant pour le sucre remonte très loin dans notre passé, et seul un raisonnement évolutionniste centré sur l'énergie peut nous aider à le comprendre.

44. *Ibid.*, p. 14-15.

45. *Ibid.*, p. 22.

46. Hrdy, 2011.

47. L'umami, généralement peu connu en dehors de l'Asie de l'Est, sert à décrire le goût du glutamate (ou acide glutamique), un acide aminé présent dans de nombreuses protéines végétales et animales. Il existerait un sixième type de saveur primaire (pour les acides gras), l'oleogustus, mais la communauté scientifique n'a pas encore tranché sur ce sujet.

Les sucres peuvent fournir plus vite que n'importe quel autre aliment une énergie appropriée à l'ensemble des organes du corps humain. Avant la maîtrise du feu, à une époque où une grande partie de la journée de nos ancêtres consistait à trouver de la nourriture et à l'assimiler par mastication – à titre de comparaison, ces activités occupent les chimpanzés six heures par jour –, être capable de localiser les aliments les plus concentrés en sucre et de se rappeler l'endroit où ils se trouvent a forcément constitué un avantage adaptatif⁴⁸.

Il est donc vraisemblable que nos ancêtres hominines les plus éloignés eu aient déjà eu un faible pour le sucre, et que cette caractéristique soit restée adaptée à l'environnement naturel et technique de notre espèce jusqu'à assez récemment. Ce n'est que depuis que nos aliments sont artificiellement saturés de sucres que l'évolution de notre appétence pour cet ingrédient est devenue un problème. Plus qu'une simple anecdote, cet exemple illustre avec précision à quel point la conjonction du rôle de l'énergie et des principes de l'évolution permettent de mieux comprendre l'histoire des sociétés humaines.

Ce premier chapitre a montré que la bipédie, l'utilisation d'outils rudimentaires en bois, la fabrication d'artefacts permanents en pierre, la chasse, la coopération sociale au sein du groupe, l'expression symbolique et la sépulture des morts ne sont absolument pas des signes distinctifs de notre espèce. D'autres représentants du genre humain ont inventé ces pratiques avant ou en même temps que *Sapiens*. Même la maîtrise du feu est antérieure à l'apparition de notre espèce. D'ailleurs, en un sens, le fait de cuire les aliments est une caractéristique du genre humain plus spécifique que le fait de posséder un langage oral : les animaux boient, rugissent, gazouillent et, ce faisant, envoient toutes sortes de signaux ; mais seul le genre humain a appris à cuire, à rôtir et à frire sa nourriture⁴⁹.

Au bout du compte, on peut dire que les cuisiniers en herbe du Paléolithique n'ont pas inventé de nouveaux convertisseurs d'énergie, mais qu'ils ont amélioré le carburant du seul convertisseur qui existait à l'époque : le muscle. Et pour prolonger cette analogie mécanique, on peut aussi avancer que la modification de la qualité du combustible alimentant les convertisseurs musculaires de nos ancêtres a impliqué une évolution de l'ensemble de la structure et du fonctionnement de la machinerie humaine (réduction de la taille de l'intestin, accroissement du cerveau et stimulation des capacités cognitives et des relations sociales).

Même si le feu était à la portée de plusieurs espèces humaines, il nous faut maintenant analyser l'émergence et l'expansion d'*Homo sapiens* pour essayer de comprendre comment cette espèce en particulier s'est retrouvée seule représentante du genre humain. [...]

48. Crosby, 2007, p. 9-10, 14.

49. *Ibid.*, p. 13.

L'or noir et la fée Électricité

Tout commence par l'éclairage

Après la mise en mouvement de la machine à vapeur, une autre utilisation importante du charbon a consisté à le carboniser, c'est-à-dire à le chauffer à haute température avec un apport limité en oxygène. Le but : produire du gaz. Ce gaz de houille était ensuite utilisé pour l'éclairage des centres urbains. Les premières installations sont réalisées en 1805-1806 dans des filatures de coton anglaises. Une société destinée à garantir l'approvisionnement centralisé de Londres en gaz est créée en 1812 et différents aménagements techniques assurent la diffusion rapide de ce type d'éclairage²⁸. En 1822, quatre entreprises différentes se partagent ce marché dans la capitale anglaise. Assez vite, la plupart des grandes villes d'Europe disposent elles aussi de lieux de stockage et d'un réseau de tuyaux souterrains pour amener le gaz dans les maisons des plus riches, les bureaux, les ateliers et les usines²⁹.

Cette utilisation du charbon pour créer du gaz d'éclairage a été mise au point pour remplacer l'huile provenant des baleines. Au XVIII^e siècle, l'huile obtenue à partir du lard de baleine brûle plus uniformément et avec moins de fumée que les autres matières (graisses animales et végétales) utilisées à l'époque comme combustibles pour éclairer les villes. L'huile de cachalot est la plus prisée de toutes. Pour que les nuits soient plus claires pour certains, l'exploitation de cette ressource entraîne des aventures extrêmement dangereuses pour d'autres, en particulier les marins nord-américains qui se lancent à la poursuite du cachalot dans le monde entier – leur flotte atteignant 700 navires au milieu du XIX^e siècle. Les baleiniers sont si efficaces dans leurs massacres que baleines et cachalots commencent à se faire de plus en plus rares, d'où le recours au gaz provenant du charbon pour éclairer les personnes les plus riches dans les villes européennes et nord-américaines³⁰. Notons toutefois que cette transition ne concerne au début qu'une frange limitée de la population : c'est surtout par l'usage massif de diverses huiles animales et végétales (issues de productions européennes de colza, d'olives, de sésame et de lin, mais aussi des importations de palmiers ouest-africains ou de suif russe et américain), brûlées directement dans des lampes ou sous forme de bougie, que la majorité de la population européenne continue de s'éclairer jusqu'au tournant du XX^e siècle³¹.

28. Smil, 2017, p. 231-232.

29. Crosby, 2007, p. 107-108.

30. *Ibid.*, p. 89, 90-91.

31. Fressoz, 2020, p. 90-97.

Le gaz de houille est loin d'être une source idéale d'éclairage : son stockage et son acheminement vers le client sont compliqués, coûteux, et surtout dangereux en raison de sa toxicité intrinsèque et de son explosivité en milieu confiné. La solution vient d'un substitut, le kérosène, découvert en 1853 et obtenu par distillation du pétrole brut.

Les différents types de pétrole brut et de gaz naturel, que l'on regroupe sous le nom d'« hydrocarbures », proviennent de l'enfouissement de minuscules organismes marins à plusieurs centaines ou milliers de mètres de profondeur. Les contraintes de pression et de température subies par cette matière organique pendant des dizaines de millions d'années permettent de la liquéfier, voire de la gazéifier, pour le plus grand bonheur – plus précisément pour la plus grande puissance – de l'espèce humaine. Les densités énergétiques des hydrocarbures liquides et gazeux (40-44 MJ/kg pour le pétrole brut, 45-46 MJ/kg pour le diesel et le gaz de pétrole liquéfié, et même 47 MJ/kg pour l'essence) sont bien supérieures à celles des combustibles préindustriels, et même du charbon (28-32 MJ/kg)³². Le pétrole était connu et utilisé depuis l'Antiquité pour imperméabiliser les bateaux et pour certains usages médicaux, mais son utilisation en tant que combustible était extrêmement rare (en dehors de quelques exceptions notables comme l'explosif incendiaire que les Byzantins appelaient le « feu grégeois »)³³.

Les récits à propos de l'histoire de l'industrie pétrolière débutent généralement avec le premier puits foré plutôt que simplement creusé, le 27 août 1859, au sud de Titusville en Pennsylvanie. Ce forage est supervisé par Edwin Drake (au premier plan à droite sur la figure 26), souvent appelé « colonel Drake » bien qu'il n'ait jamais réellement détenu ce grade. Réalisé sur 21 mètres de profondeur grâce à une machine à percussion actionnée par une machine à vapeur, ce premier forage déclenche une véritable ruée vers le pétrole, d'abord sur les territoires des États-Unis et du Canada puis sur celui de la Russie³⁴. Le raffinage de cet or noir ne sert

32. Crosby, 2007, p. 62, 108.

33. Smil, 2017, p. 245.

34. Crosby, 2007, p. 92 ; Smil, 2017, p. 246 ; Auzanneau, 2016, p. 27-28. L'exploitation industrielle du pétrole a en vérité démarré avec les gisements et les puits de la péninsule d'Abgèron dans la baie de Bakou de la mer Caspienne – un texte de 1593 fait même état d'un puits de 35 mètres de profondeur creusé à la pelle à Balakhani. En 1806, lorsque la Russie tsariste prend le contrôle du territoire d'Abgèron, la péninsule compte de nombreux puits peu profonds dans lesquels du pétrole léger est recueilli puis distillé pour produire du kérosène destiné à l'éclairage, mais aussi à la fabrication de lubrifiants et de solvants. Ces produits issus du pétrole sont exportés à dos de chameau dans des sacs en peau de chèvre ou dans des barils en bois. La première usine commerciale de distillation de pétrole de l'histoire est construite par les Russes en 1837 à Balakhani, avant la ruée vers le pétrole américain. En 1846, soit 13 ans avant le forage de Drake, on fore pour la première fois dans la baie de Bakou, précisément à Bibi-Heybat, sur une vingtaine de mètres en employant une machine à percussion actionnée par huit hommes. Ce forage

Figure 26

Le premier puits de pétrole foré par Edwin Drake

Source : collection du Drake Well Museum.

pas seulement à la production de kérosène pour les lampes, mais fournit également de la paraffine, des solvants et des lubrifiants pour toutes les machines des sociétés industrielles qui utilisaient auparavant des graisses d'origine animale ou végétale. Même si ces dernières sont consommées en plus grande quantité au cours du XIX^e siècle, l'apparition de l'industrie du pétrole concourt sans aucun doute à sauver un grand nombre de baleines, de cachalots et d'autres mammifères marins (phoques, éléphants de mer, etc.), auparavant pourchassés pour leur graisse³⁵.

Les améliorations dans l'éclairage ne cessent cependant pas avec la mise en place des lampes à kérosène. Quelques décennies après les débuts de l'industrie moderne du pétrole, l'ampoule électrique inventée par Thomas Edison commence à prendre le relais. Cette révolution technique dans le domaine de l'éclairage aurait dû faire chuter la demande de pétrole, mais une autre révolution, cette fois-ci dans le domaine des transports, permet de maintenir et même d'augmenter la dépendance de l'humanité à cette énergie solaire fossilisée³⁶.

Un carburant plus utile pour avancer

La plupart des champs d'hydrocarbures contiennent à la fois du pétrole brut et du gaz naturel, mais ce dernier a pendant très longtemps été vu comme une gêne et non comme une ressource intéressante. Sans compresseurs ni tuyaux en acier, le gaz ne peut pas être déplacé sur de longues distances.

amorce l'exploitation d'un des plus grands champs de pétrole du monde, toujours en production aujourd'hui.

35. Auzanneau, 2016, p. 29-30.

36. Crosby, 2007, p. 92.

Pendant des décennies, avant que l'industrie des hydrocarbures ne lui trouve de réels débouchés, le gaz était donc ventilé ou brûlé à la sortie des puits. En revanche, la forte densité énergétique des combustibles liquides issus du raffinage du pétrole brut (essence, diesel, kérosène et fioul) et leur meilleure transportabilité comparativement au charbon et au gaz, ont fait de ces carburants des sources d'énergie réellement supérieures, notamment pour le transport une fois que le moteur à combustion interne a été inventé³⁷.

Dans la machine à vapeur, la combustion du charbon permet de transformer de l'eau liquide en une vapeur qui actionne des pistons. Devant un moyen de production d'énergie mécanique aussi indirect, plusieurs ingénieurs de diverses nationalités n'ont pas tardé à imaginer et à tester des engins capables de convertir plus efficacement l'énergie thermique issue de la combustion d'un carburant. Après plusieurs essais de machines fonctionnant à partir de gaz de charbon, Gottlieb Daimler et Wilhelm Maybach conçoivent en 1883 un moteur capable de brûler de l'essence. Les deux ingénieurs allemands perfectionnent leur moteur à combustion interne et l'utilisent pour faire avancer la première motocyclette de l'histoire en 1885, et la première voiture (plutôt un carrosse en bois) en 1886. La même année, l'inventeur allemand Karl Benz conçoit un moteur à combustion interne qu'il associe à un châssis en métal à trois roues³⁸.

En 1892, Rudolf Diesel obtient un brevet pour un mode d'allumage différent de celui des premiers moteurs à combustion interne. Dans ces derniers, une étincelle initie la combustion de l'essence, alors que dans les moteurs diesel le carburant injecté dans le cylindre s'enflamme spontanément à cause d'un taux de compression deux fois plus élevé. Cela nécessite d'avoir un moteur plus lourd et un régime de fonctionnement plus faible, mais du coup les moteurs diesels sont intrinsèquement plus efficaces que ceux fonctionnant à l'essence³⁹. Notons avec l'historien Vaclav Smil que l'ambition initiale de Rudolf Diesel était d'offrir un moteur léger, petit (de la taille d'une machine à coudre contemporaine) et surtout bon marché au profit des petits entrepreneurs indépendants (machinistes, horlogers, restaurateurs). Rêvant d'une société juste et fraternelle où la

37. Smil, 2017, p. 247-248.

38. Crosby, 2007, p. 93-96 ; Smil, 2017, p. 248-250.

39. Même lors des premiers essais de certification du moteur diesel en février 1897, le prototype avait un rendement de plus de 25 %, contre 14-17 % pour ses meilleurs homologues à essence. En 1911, le rendement du moteur diesel avait atteint 41 %, et aujourd'hui le rendement des meilleurs d'entre eux dépasse légèrement 50 %, soit le double de celui des moteurs à essence. De plus, le diesel est près de 14 % plus lourd que l'essence (820-850 g/L contre 720-750 g/L) tandis qu'il présente une densité énergétique par unité de masse similaire, ce qui lui donne une densité énergétique par unité de volume de 36 MJ/L, soit 12 % de plus que celle de l'essence. C'est cette différence qui explique le moindre coût du diesel comparativement à l'essence, différence qui peut être accentuée ou au contraire limitée en fonction des taxes gouvernementales.

compassion et l'amour seraient les valeurs mères, Diesel pensait que son invention allait permettre aux travailleurs de s'organiser en coopératives autonomes de petite taille. Force est de constater que son œuvre a au contraire surtout été adaptée au fonctionnement de grandes machines, aux camions et aux locomotives, et après la Seconde Guerre mondiale aux navires porte-conteneurs et aux bateaux transportant du pétrole d'un bout à l'autre du globe. Au travers de la production et de la distribution de masse peu coûteuses de l'économie fossile mondialisée, le moteur diesel a donc contribué à créer des sociétés caractérisées par une concentration sans précédent du capital entre les mains de quelques-uns, c'est-à-dire le contraire exact des aspirations de Diesel⁴⁰.

Mais revenons un peu en arrière. À leurs débuts, les premières voitures sont bien sûr des objets de curiosité réservés aux plus riches. Elles ressemblent davantage à des sortes de carrosses sans chevaux qu'aux voitures telles que nous les connaissons. Cette vision change progressivement du début du xx^e siècle, du fait des efforts de publicité et du début de la production de masse, rendue possible grâce à l'application de ce qu'on a abusivement nommé « l'organisation scientifique du travail ». Ce concept, formulé à partir des années 1880 par Frederick Taylor et ses disciples, consiste essentiellement en une division extrême du travail et en une gestion chronométrée des tâches. Henry Ford, fils d'un immigré irlandais réfugié aux États-Unis et ingénieur de la Edison Illuminating Company, joue également un rôle influent dans cette évolution. En 1903, il crée la Ford Motor Company avec sa première automobile baptisée Model-A, et en 1908, après la conception d'une vingtaine de modèles différents (souvent restés à l'état de prototype), il fournit au marché nord-américain le fameux Model-T, beaucoup plus solide, plus maniable et plus facilement réparable (figure 27)⁴¹.

Ford rajoute un élément essentiel à l'organisation du travail déjà ultra-divisée et chronométrée du taylorisme : le déplacement des pièces à façonner sur des chaînes d'assemblage – un procédé aujourd'hui devenu banal que Ford observe d'abord dans un abattoir de bœufs de Chicago, détail qui a son importance pour pleinement saisir l'origine déshumanisante du travail à la chaîne ! Alimentées par des moteurs électriques, les chaînes de production fordistes gagnent en productivité année après année, faisant passer assez rapidement le temps d'assemblage d'un châssis de voiture d'un peu plus de 12 heures à seulement 1,5 heure⁴². Ford est aussi un des premiers à comprendre que les ouvriers qu'il emploie sont des consommateurs potentiels de leur production. Le 5 janvier 1914, il décide donc de doubler leur salaire en le haussant à 5 dollars de l'heure. Cette

40. Smil, 2017, p. 252-255.

41. Crosby, 2007, p. 96-97.

42. Dufour, 2018, p. 102-107 ; Crosby, 2007, p. 97.

Figure 27

Modèle T de l'entreprise Ford en 1915

Source: Automobile Reference Collection

décision est considérée comme une des étapes les plus cruciales de l'avènement de la classe moyenne aux États-Unis, et donc de la société de consommation de masse telle que nous la connaissons aujourd'hui⁴³.

Le moteur à combustion interne permet même aux sociétés modernes de réaliser un des plus vieux rêves de l'humanité : voler comme les oiseaux à l'aide d'un engin motorisé. Les frères Wright sont les premiers à réaliser cet exploit, en 1903 (à Kitty Hawk, en Caroline du Nord), lorsqu'ils parviennent à faire voler leur aéronef muni d'une double paire d'ailes sur quelques dizaines de mètres. Cet exploit n'aurait pas été possible sans l'invention du moteur à combustion interne puisque tous les essais antérieurs utilisant une machine à vapeur s'étaient soldés par un échec. Avec leurs chaudières remplies d'eau, les machines à vapeur étaient tout simplement trop lourdes pour la puissance qu'elles pouvaient générer. Après le refus des fabricants de construire un moteur selon leurs spécifications, Wilbur et Orville Wright le conçoivent eux-mêmes. Construit par leur mécanicien Charles Taylor en seulement six semaines, ce moteur léger et puissant n'est qu'un élément clé parmi d'autres de leur succès. Les frères Wright étudient aussi l'aérodynamique et comprennent l'importance des notions d'assiette et de gîte pour maintenir l'équilibre, la stabilité et le contrôle en vol. Un brevet leur est accordé en 1906, mais il est largement violé : des concepteurs de nombreux pays continuent à construire leurs avions en s'inspirant des modèles des frères Wright. Les progrès en matière de contrôle et de durée de vol sont ainsi très rapides. En 1909, Louis Blériot, qui a auparavant construit le premier aéronef n'ayant qu'une seule

43. Auzanneau, 2016, p. 96.

paire d'ailes, effectue la première traversée de la Manche. Et en 1914, les grandes puissances militaires impliquées dans la Première Guerre mondiale ne tardent pas à disposer de forces aériennes qui deviennent des pièces maîtresses de leur arsenal⁴⁴.

En plus du succès volant des frères Wright, l'année 1903 est aussi marquée par la construction du premier navire à moteur diesel, un petit cargo transportant du pétrole qui navigue sur la mer Caspienne et sur le fleuve Volga. L'année suivante, en 1904, la première centrale électrique à moteur diesel est ouverte à Kiev tandis que des ingénieurs français mettent au point le premier sous-marin propulsé par ce type de moteur. Une autre grande avancée a lieu en 1912, lorsqu'un navire de fret danois devient le premier navire océanique propulsé par des moteurs diesels. Au début du xx^e siècle, des moteurs à combustion interne au diesel et à l'essence commencent aussi à prendre en charge des tâches agricoles en Amérique du Nord, avec les tracteurs, les moissonneuses-batteuses et les pompes d'irrigation qui remplacent progressivement les animaux de trait. La mécanisation du secteur agricole ne surviendra toutefois qu'à partir des années 1950 en Europe, et plus tard encore dans le reste du monde⁴⁵.

Le moteur à combustion interne est depuis plus d'un siècle le convertisseur énergétique le plus influent de la planète. Il a notamment contribué à décupler la production agricole, intensifiant ainsi le transfert de population des campagnes vers les centres urbains. Dans le même temps, le moteur à combustion interne a rendu possible un étalement croissant des villes, tout en les débarrassant des dizaines de milliers de chevaux qui les peuplaient autrefois, avec leurs torrents d'urine et leurs tonnes d'excréments. À la fin du xx^e siècle, les chevaux avaient ainsi cédé la place à un demi-milliard de voitures sillonnant les routes du monde entier, sans compter les camions, les bus, les tracteurs et les chars blindés ni les bombardiers et les avions de chasse sillonnant les cieux. Aujourd'hui, les usines produisent plus de 90 millions de nouveaux véhicules à moteur à combustion interne par an, et l'humanité consomme plus de 90 millions de barils⁴⁶ de pétrole par jour, principalement pour faire avancer dans les airs, sur les mers et sur les terres plus d'un milliard de véhicules⁴⁷.

En plus du moteur à combustion interne, un autre convertisseur, offert commercialement à la fin du xix^e siècle, déterminera une grande partie des évolutions industrielles du xx^e siècle. Cette invention capitale est la turbine à vapeur, bientôt déployée comme convertisseur pour faire tour-

44. Crosby, 2007, p. 96 ; Smil, 2017, p. 250-252.

45. Smil, 2017, p. 254.

46. Un baril de pétrole a une capacité de 159 litres, pour un contenu énergétique moyen légèrement inférieur à 6 gigajoules.

47. Crosby, 2007, p. 97-98.

ner des générateurs produisant de l'électricité dans des centrales de plus en plus grandes et puissantes⁴⁸. Pour bien comprendre les changements draconiens que l'électricité a apportés à l'humanité, il nous faut d'abord revenir sur les premières expérimentations concernant cette forme d'énergie si particulière.

Les particules élémentaires

À l'inverse du bois, des cours d'eau, du vent et des combustibles fossiles, l'électricité n'est pas une énergie primaire (disponible dans l'environnement et directement exploitable), mais une forme d'énergie finale qui s'obtient par la conversion d'une source énergétique primaire. De nos jours, la majorité de l'électricité est produite par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés par de la vapeur d'eau sous pression – laquelle est issue de la combustion de charbon, de pétrole ou de gaz, ou de la fission d'atomes d'uranium – ou par le mouvement des courants d'eau ou de vent sur des pales⁴⁹. Permettant de très nombreux usages, l'énergie électrique ne se stocke pas en l'état : si elle ne peut pas être immédiatement consommée, elle doit être transformée pour être stockée, soit sous forme d'énergie chimique dans une batterie ou dans de l'hydrogène (obtenu par électrolyse de l'eau), soit sous forme d'énergie potentielle par l'élévation de l'eau dans un bassin grâce à une station de pompage. L'électricité – tout comme l'hydrogène, dont on parle de plus en plus aujourd'hui – est donc essentiellement un vecteur énergétique, c'est-à-dire un moyen pour transporter de l'énergie de son lieu de production à son lieu d'utilisation.

Des indices nous apprennent que l'électricité était connue bien avant qu'elle ne devienne aussi essentielle et répandue dans les sociétés les plus économiquement développées. Les Grecs avaient déjà découvert il y a longtemps qu'en frottant un morceau d'ambre on pouvait attirer des objets légers comme des plumes. Le mot « électricité » vient d'ailleurs du grec ancien *ēlektron*, signifiant « ambre jaune ». Cette découverte n'a entraîné toutefois aucune application pratique avant des centaines d'années, et là encore, les choses ont été très progressives⁵⁰. Des dizaines d'ingénieurs et d'inventeurs ont travaillé sur les principes de base de la production, de la transmission et du stockage de l'électricité, donnant souvent leur nom à une unité de mesure : le coulomb (unité standard de la charge électrique) tire son nom de Charles Augustin Coulomb, qui a travaillé sur la force électrique à la fin du XVIII^e siècle ; l'œrsted (unité de

48. Smil, 2017, p. 254.

49. Les principes de fonctionnement des groupes électrogènes, des panneaux photovoltaïques et d'autres modes de production électrique (par l'énergie thermique des mers ou l'énergie osmotique) sont bien évidemment différents.

50. Crosby, 2007, p. 102.

champ magnétique) provient de la découverte de l'effet magnétique des courants électriques par Hans Christian Ørsted, en 1819; le volt (unité du potentiel électrique) a été nommé en l'honneur d'Alessandro Volta, qui a construit la première batterie électrique; tandis que l'ampère (unité d'intensité du courant électrique) dérive du nom d'André-Marie Ampère, qui a formulé au cours des années 1820 le concept de circuit complet et quantifié les effets magnétiques du courant électrique⁵¹.

Mais aucune de ces étapes n'est aussi importante que celle réalisée par Michael Faraday lorsqu'il comprend que, si l'électricité peut faire apparaître des phénomènes de magnétisme (correspondant fondamentalement à des manifestations d'énergie mécanique), alors de l'énergie mécanique peut logiquement être convertie en électricité. Cette révélation survient lorsque Faraday, fils de forgeron doté d'une instruction très rudimentaire, devient l'assistant du physicien anglais Humphry Davy après avoir été émerveillé par une conférence publique que ce dernier a donnée à la Royal Institution de Londres. Pur produit de la méritocratie anglaise – qui doit bien évidemment être vu comme un contre-exemple rare de la propension plus systématique de tout système éducatif à maintenir et à perpétuer les stratifications sociales –, Michael Faraday publie son premier grand travail sur la rotation électromagnétique et le principe du moteur électrique en 1821. Avec cette découverte et les travaux qui en découlent, notamment la formalisation d'une dynamo électrique par Faraday lui-même en 1831, il devient possible d'imaginer une production et une conversion de l'électricité à grande échelle⁵².

Mais les contributions d'autres chercheurs seront nécessaires sur plusieurs décennies pour concrétiser les possibilités de cette première série de travaux⁵³. Comme le résume l'historien Vaclav Smil :

La production d'électricité, sa transmission et sa conversion en chaleur, en lumière, en mouvement et en potentiel chimique ont représenté une réalisation sans précédent parmi les innovations énergétiques. Auparavant, les nouvelles sources d'énergie et les nouveaux convertisseurs énergétiques avaient été conçus pour accomplir des tâches spécifiques plus rapidement, à moindre coût ou avec plus de puissance qu'auparavant, et ils pouvaient facilement être utilisés dans le cadre des systèmes de production existants – par exemple, les meules furent actionnées par des roues hydrauliques plutôt que par des animaux. En revanche, l'introduction de l'électricité a nécessité l'invention, le développement et l'installation d'un tout nouveau système permettant de la produire de manière fiable et relativement bon marché, de la transporter en toute sécurité sur de longues distances, de la distribuer localement aux

51. Smil, 2017, p. 255-256.

52. Crosby, 2007, p. 104; Smil, 2017, p. 256-257.

53. Crosby, 2007, p. 104-107; Smil, 2017, p. 258-259.

consommateurs individuels, et de la convertir efficacement afin de fournir les formes finales d'énergie souhaitées par les utilisateurs⁵⁴.

Le principe de flexibilité

Pour que l'électricité puisse révolutionner toute une série d'activités – l'éclairage, le transport, l'industrie, le divertissement et la communication –, il fallait qu'elle soit livrée à des tensions (mesurées en volts) assez élevées. Pour cela, les aimants et les dynamos conçus par les premiers expérimentateurs devaient être sensiblement améliorés. Surtout, plutôt que d'être actionnés par la force musculaire de leurs utilisateurs, ces aimants et dynamos ont été couplés à des moteurs à combustion interne dans les dernières décennies du XIX^e siècle, puis à des moteurs à turbine. Une fois ces améliorations en place, l'électricité pouvait être produite et transmise dans des quantités assez importantes et fiables pour faire fonctionner de gros moteurs électriques. On a pu par exemple construire des générateurs près des mines de charbon pour brûler le combustible sur place et produire de l'électricité qui était ensuite transportée et consommée bien plus loin. De même, il est devenu possible de construire des générateurs électriques près des chutes du Niagara pour exploiter la force motrice de l'eau et expédier l'électricité par des câbles à des clients éloignés⁵⁵.

Parmi les nombreux domaines bouleversés par l'électrification, les secteurs des transports et de l'éclairage urbain sont deux bons exemples. Le premier chemin de fer électrique a probablement été installé en 1881 à Lichterfelde, en Allemagne. Le moteur électrique permet également le creusement de la première ligne du métro de Londres en 1887-1890. Une alimentation par des machines à vapeur ou des moteurs à combustion interne aurait été inadaptée à cet environnement confiné compte tenu des fumées dégagées par la combustion.

Les changements que l'électrification implique pour l'éclairage des villes sont tous aussi spectaculaires. Nous l'avons vu, au cours du XIX^e siècle les lampes fonctionnant à l'huile de baleine sont remplacées par un système dangereux utilisant le gaz de houille, avant que les lampes à kérosène viennent elles-mêmes concurrencer ce premier dispositif d'éclairage fossile. Mais la fée Électricité va à nouveau tout changer. Les premières lampes à arc électrique sont allumées sur la place de la Concorde de Paris en décembre 1844, puis dans la National Gallery de Londres en novembre 1848. Elles se répandent ensuite dans de nombreuses villes européennes et américaines⁵⁶. Le problème, c'est qu'il est encore difficile de maintenir un arc stable, car le

54. Smil, 2017, p. 258.

55. Crosby, 2007, p. 107, 109.

56. Smil, 2017, p. 258.

courant consomme l'anode (électrode positive) et que le réapprovisionnement représente un défi logistique majeur. Par ailleurs, les lampes à arc ne sont pas adaptées pour l'intérieur des bâtiments : imaginez une lampe de lecture avec une lumière d'arc éblouissante qui grésille à votre oreille⁵⁷ !

La mise au point d'un éclairage intérieur produit par des filaments incandescents s'étend sur quatre décennies. Elle implique une vingtaine d'inventeurs de nationalités différentes dont les noms ne sont jamais passés à la postérité. Ces contributeurs de l'ombre permettent à Thomas Edison d'aboutir en 1879 à un filament produit à partir d'un fil à coudre en coton carbonisé et placé sous vide. Aussi ingénieux que déterminé, Edison démontre le potentiel de 100 exemplaires de sa nouvelle ampoule en illuminant son laboratoire, les rues avoisinantes et la gare de Menlo Park dans le New Jersey. Bien que très inefficaces par rapport aux standards les plus récents, les premières ampoules électriques sont environ dix fois plus lumineuses que les lampes à gaz de l'époque et 100 fois plus brillantes qu'une bougie. Malgré leur puissance supérieure, les ampoules d'Edison n'éblouissent pas et ne scintillent pas comme les lampes à arc, et surtout leur utilisation ne comporte pas de risques d'incendie et d'explosion, caractéristiques des lampes fonctionnant respectivement au kérosène ou au gaz⁵⁸.

La conception d'une ampoule à filament fiable et durable ne constitue que le début de l'aventure électrique d'Edison et de son équipe : dans les trois années qui suivent, près de 190 brevets sont déposés, dont 90 pour des filaments et des lampes, 60 pour des machines magnéto- ou dynamo-électriques, 14 pour des systèmes d'éclairage, 12 pour la distribution d'électricité et 10 pour des compteurs et des moteurs électriques. Loin de constituer de simples inventions indépendantes, ces recherches mènent à des applications concrètes très importantes en un temps record. La première centrale électrique, construite par la société d'Edison à Londres (vers le pont de Holborn), commence à produire de l'électricité le 12 janvier 1882, tandis que la première centrale thermique américaine est mise en service le 4 septembre de la même année à New York (sur Pearl Street). Un mois après son ouverture, elle alimente quelque 1300 ampoules dans le quartier financier de la ville, et un an plus tard quelque 11 000 sources de lumière. Si l'histoire ne mentionne généralement que le nom d'Edison pour l'invention de l'ampoule électrique, c'est parce qu'il a été le seul à réaliser que la quête de l'éclairage intérieur ne consistait pas seulement à obtenir la première ampoule fiable, mais aussi à mettre en place tout un système commercial d'éclairage électrique⁵⁹. Vaclav Smil conclut ainsi :

57. Crosby, 2007, p. 108.

58. Smil, 2017, p. 258-259 ; Crosby, 2007, p. 109.

59. Smil, 2017, p. 259, 261-262.

Après plus de 120 ans, les principaux composants des systèmes électriques – turbogénérateurs à vapeur, transformateurs et transmission par courant alternatif à haute tension – ont gagné en efficacité, en capacité et en fiabilité, mais leur conception et leurs propriétés fondamentales restent les mêmes, et leurs auteurs reconnaîtraient facilement les versions les plus récentes. Et bien que les lampes à incandescence aient été dépassées par les lampes fluorescentes (commercialisées dans les années 1930), et plus récemment par des sources lumineuses encore plus efficaces (lampes à vapeur de sodium, lampes à soufre, diodes électroluminescentes), les moteurs électriques, autre élément clé du système des années 1880, sont des éléments de plus en plus courants du système électrique mondial⁶⁰.

[...]

60. *Ibid.*, p. 262.

61. Bonneuil et Fressoz, 2016, p. 267.

62. Demoule et Schnapp, 2018, p. 388.

63. Bonneuil et Fressoz, 2016, p. 267-268.

Bifurcation inédite

L'exception qui confirme la règle ?

En principe, limiter le changement climatique est simple : il suffit de passer de l'économie fossile à l'économie « verte », en arrêtant de brûler du charbon, du pétrole et du gaz pour consommer à la place de l'électricité provenant d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques, ainsi que du biogaz et des agrocarburants. Dans le même temps, que ce soit dans les médias, les discours politiques ou même les rapports du GIEC, on suppose toujours que la transition énergétique pourra se faire en conservant une croissance économique positive, et idéalement la plus élevée possible. Cette solution de la croissance verte implique de pouvoir découpler la production économique de la base énergétique fossile qui l'alimente depuis près de deux siècles. En d'autres termes, il faut en finir avec le système fossile mondial à une vitesse impressionnante – de l'ordre de 6 à 10 % par an –, tout en investissant massivement dans un système énergétique de remplacement, et cela, sans toucher à la sacrosainte croissance. L'analyse que nous avons menée dans ce livre va nous permettre de mettre en évidence un élément décisif de toutes les transitions énergétiques passées qui démontre l'impossibilité de stopper rapidement notre dépendance aux énergies fossiles tout en poursuivant un objectif de croissance économique.

Cette caractéristique fondamentale est la suivante : dans toute l'histoire de l'humanité, l'apparition de nouvelles formes d'approvisionnement énergétique a toujours intensifié l'utilisation des énergies et des convertisseurs existants. Cela a toujours été nécessaire pour déployer les nouvelles formes d'énergie, et ainsi doper d'autant plus l'activité économique et l'accroissement de la population. Prenons quelques exemples. La domestication des plantes et des animaux a intensifié le travail des muscles humains et la combustion du bois ; le recours de plus en plus massif au charbon a stimulé le travail des animaux de trait dans les champs et à la ville (pour un temps donné seulement), ainsi que la demande de bois (ne serait-ce que pour soutenir les galeries des mines) ; et de la même manière, le développement du pétrole et du gaz a fait augmenter la demande en charbon.

Cet invariant historique explique en partie le fait qu'il n'y a jamais réellement eu de transition énergétique, du moins jamais de façon absolue. À ce jour, toutes les transitions énergétiques n'ont été que relatives – c'est-

aujourd'hui résoudre... Nous reviendrons un peu plus loin sur ce point crucial.

à-dire en parts de la production ou de la consommation totale³⁷. Au xx^e siècle, l'usage relatif du bois, des terres arables et du charbon a certes baissé par rapport à celui du pétrole, du gaz, de l'hydroélectricité et du nucléaire, mais la consommation de chacune de ces sources d'énergie a augmenté au niveau global. Ceci est pleinement visible sur les figures 29, 30 et 31. Le passé énergétique des humains n'a été qu'une succession d'empilements de ressources : il n'y a jamais vraiment eu de remplacement total d'un système énergétique par un autre. Seule la transition énergétique que l'humanité amorce aujourd'hui avec beaucoup de difficultés mérite pleinement ce nom, car elle doit impérativement être absolue et non pas relative comme toutes celles du passé.

Le problème, c'est que l'on observe justement l'inverse aujourd'hui, notamment parce que les énergies dites renouvelables sont extrêmement dépendantes des combustibles fossiles. La construction et l'utilisation des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des voitures électriques seraient impossibles aujourd'hui sans le charbon, le pétrole et le gaz. C'est en effet majoritairement l'emploi d'énergies fossiles qui permet l'extraction de toutes les matières premières requises pour produire et utiliser les nouvelles énergies bas-carbone.

Prenons un exemple inspiré du documentaire de Jean-Louis Perez et Guillaume Pitron, *La face cachée des énergies vertes*³⁸. Il nous conduit au Chili, plus grand détenteur de réserves de cuivre au monde et premier producteur de ce métal indispensable au secteur électrique. Pour extraire chaque année les 5,6 millions de tonnes de cuivre qu'elles mettent à disposition du marché mondial, les mines chiliennes utilisent des milliers de tonnes de pétrole raffiné pour faire avancer leurs bulldozers, mais aussi de l'électricité produite à 40 % à partir de charbon. Ce dernier est importé par bateau depuis la Colombie et la Nouvelle-Zélande, dans une chaîne d'approvisionnement qui repose elle aussi sur du pétrole et du gaz consommés par des camions, des trains et des bateaux. Une partie du cuivre chilien arrive en Norvège, figure de proue de la transition écologique puisqu'une voiture neuve sur deux y est électrique ; mais ce pays est aussi le quinzième exportateur mondial de pétrole...

On pourrait multiplier les exemples de ce type, en se focalisant notamment sur le lithium de Bolivie ou les métaux rares de Chine indispensables aux nouvelles technologies bas-carbone. On observerait chaque fois que, pour l'instant, les énergies dites « vertes » stimulent le métabolisme fossile des mégamachines humaines au lieu de le ralentir. Par ailleurs, en plus des émissions de gaz à effet de serre induites par cette interaction, les rejets toxiques de l'industrie des métaux polluent des territoires entiers et causent des milliers

37. Bonneuil et Fressoz, 2016, p. 121.

38. Perez et Pitron, 2020.

de morts et de maladies (cancers, déformations, etc.), principalement dans les nations dites en développement; sans compter les gigantesques paysages lunaires creusés dans ces régions par les mines à ciel ouvert³⁹.

L'humanité doit donc relever un défi énergétique sans précédent historique, et dans ses façons de faire actuelles on peut légitimement se demander si elle se donne les moyens nécessaires pour y parvenir. Malgré les alertes de plus en plus inquiétantes de la communauté scientifique sur l'état du système Terre, certains indices laissent penser que nous faisons tout pour nous compliquer la tâche. L'exemple le plus saisissant est que les investissements dans le secteur des énergies fossiles ne faiblissent pas et que les infrastructures fossiles installées aujourd'hui ont des durées de vie de plusieurs dizaines d'années. Jusqu'à présent, l'option suivie par les sociétés fossiles a bien été de perdurer dans le maintien du statu quo, quitte à totalement passer à côté des objectifs qu'elles se fixent de temps en temps au cours des grands-messes de négociation climatique.

Lost in transition

Dans le passé, la vitesse des transitions énergétiques a été extrêmement variable d'une région du monde à l'autre. On peut néanmoins affirmer qu'à l'échelle globale, ces transitions ont toujours été des processus longs et graduels. Passer d'un mode de capture de l'énergie solaire basé uniquement sur la chasse-cueillette et la combustion du bois à l'agriculture-élevage a pris des milliers d'années. L'adoption des combustibles fossiles comme source principale d'énergie a quant à elle pris environ un siècle. Aujourd'hui, pour tenter de contenir le dérèglement climatique à un niveau acceptable, l'humanité dispose seulement de quelques dizaines d'années pour changer la totalité de son système énergétique⁴⁰.

Les combustibles fossiles fournissaient 94,4 % de l'énergie commerciale primaire du monde en 1960. Leur part n'est passée qu'à 87,4 % en 1990, et elle est encore d'environ 83,1 % aujourd'hui⁴¹. Les machines qui ont suppléé le travail humain tournent donc encore en quasi-totalité grâce à l'énergie fossile. Sur les 16,9 % d'énergie primaire bas-carbone du bouquet mondial, le nucléaire compte pour 4,3 %, l'hydroélectricité pour 6,9 % et les nouvelles technologies renouvelables (éolien, photovoltaïque, géothermie, agrocarbu-

39. Scheidler, 2020, p. 63-64.

40. Smil, 2016, p. 194-195.

41. En comptant les formes traditionnelles de biomasse (bois et résidus agricoles) qui sont majoritairement consommées hors marché, la part des énergies fossiles dans le bouquet mondial prend une tendance inverse: 75 % en 1960, 78 % en 1990, et 78 % à nouveau en 2020.

rants, combustion des déchets) pour 5,7%⁴². Un effort colossal doit encore être fourni pour accélérer la décarbonation de l'économie mondiale.

La production d'électricité éolienne et solaire a connu une croissance très rapide, avec une moyenne d'environ 27%/an entre 1990 et 2019. Ceci correspond toutefois à ce que l'on peut observer pour de nombreux phénomènes aux premiers stades de leur développement. D'autres types d'énergie ont connu des taux de croissance similaires à leurs débuts. La production mondiale de pétrole a augmenté en moyenne de 20%/an entre 1860 et 1890, l'hydroélectricité de 15%/an entre 1900 et 1930, et le nucléaire de 25%/an entre 1960 et 1990⁴³. Le déploiement des énergies bas-carbone ne suit donc pas une dynamique hors normes, il se fait à un rythme analogue à celui d'autres types d'énergie dans le passé.

Les énergies fossiles reculent peut-être légèrement sur un plan relatif, mais elles continuent d'être consommées de façon croissante et d'occuper la plus grande part de l'approvisionnement énergétique mondial. En conséquence, comme dans le passé qu'il nous faut pourtant éviter de répéter, les nouveaux systèmes énergétiques s'ajoutent pour l'instant à la machine fossile au lieu de la remplacer. En pratique, cela se voit facilement puisque les technologies bas-carbone consistent essentiellement à changer la nature de la production d'électricité, sans réellement toucher aux autres secteurs recourant à l'énergie fossile. Le charbon, le pétrole et le gaz restent indispensables à la production d'acier, de plastique et d'engrais, sans oublier le secteur des transports où l'or noir est toujours roi.

Certes, au cours des trois dernières années, l'augmentation de la consommation mondiale d'énergie primaire (hors biomasse traditionnelle) est autant venue des énergies renouvelables modernes que des combustibles fossiles. Mais depuis 1990, ces derniers ont contribué près de six fois plus à l'accroissement de cette demande que les nouvelles technologies renouvelables⁴⁴. De fait, l'investissement mondial dans le secteur fossile ne cesse de croître chaque année⁴⁵. Nous sommes ainsi toujours à l'ère du charbon – la première source d'électricité dans le monde –, du pétrole et du gaz. Nul mystère donc à ce que les émissions de CO₂, et plus largement de gaz à effet de serre, continuent d'augmenter année après année (excepté en 2008 et en 2020 pour cause de contraction économique). Malgré les annonces triomphantes de nouvelles installations renouvelables et la

42. Pour toutes ces estimations, on peut trouver des valeurs différentes en fonction des conventions de calcul retenues pour convertir en équivalents primaires l'électricité provenant du nucléaire, des barrages hydroélectriques, des éoliennes et des panneaux photovoltaïques. Pour plus de détails, voir Newell et Raimi, 2020.

43. Analyse menée avec les données de Etemad et Luciani (1991) numérisées par The Shift Project (2019b), et British Petroleum (2021).

44. Analyse menée avec les données de British Petroleum (2021).

45. Kirsch *et al.*, 2021, p. 16.

surenchère des objectifs de décarbonation, force est de constater que pour l'instant le compte n'y est pas.

Comme nous l'avons déjà évoqué depuis la troisième partie de ce livre, les sociétés contemporaines sont tout aussi dépendantes des énergies fossiles que les sociétés préindustrielles l'étaient des esclaves exploités dans les champs de blé, de canne à sucre et de coton. Pour l'instant, nous ne parvenons pas à trouver de réelles solutions pour nous débarrasser de notre dépendance aux énergies fossiles. Comme le résume Jean-François Mouhot:

Mettre en lumière notre attirance profondément humaine pour le confort et la facilité, qui a entraîné (et continue d'entraîner) l'usage d'esclaves (réels ou virtuels), permet d'expliquer en partie notre léthargie collective envers le changement climatique, ainsi que notre résistance aux politiques visant à réduire notre dépendance à l'énergie bon marché⁴⁶.

Transhumance des limites

On dit souvent que les énergies « vertes » sont inépuisables parce qu'elles reposent pour la plupart sur des flux naturels provenant du rayonnement solaire (même dans le cas du vent et des cours d'eau, comme nous l'avons déjà précisé à de nombreuses reprises). Mais il faut des infrastructures pour capter, convertir, stocker et utiliser ces flux d'énergie renouvelable : barrages, éoliennes, panneaux photovoltaïques, batteries, transformateurs, lignes à haute et à basse tension, etc. Construire et utiliser tous ces systèmes énergétiques exige d'extraire et de raffiner de très grandes quantités de matériaux : du sable et des granulats pour le béton, du pétrole pour tous les dérivés plastiques, mais aussi des métaux communs (du fer pour l'acier et du cuivre pour les câbles de transmission) et d'autres plus rares (comme du lithium, du cobalt ou du tantale) parmi toute une flopée d'éléments présents dans les circuits électroniques et les aimants⁴⁷. Dans le cadre de la transition mondiale vers les technologies bas-carbone, il est évident qu'une dépendance vis-à-vis de ces ressources matérielles va venir se substituer à notre dépendance actuelle aux ressources fossiles⁴⁸. Il faut ajouter que l'extraction et le raffinage de tous les métaux qui composent les infrastructures électriques bas-carbone entraînent en ce moment même des pollutions locales désastreuses aux quatre coins du monde⁴⁹. Utiliser le terme « renouvelable » pour qualifier ces énergies est donc extrêmement discutable. Parler d'énergies de substitution aux combustibles fossiles semble plus approprié.

46. Mouhot, 2011, p. 123.

47. Bihouix, 2014; Fizaine, 2015.

48. Hache *et al.*, 2019, p. 74-75.

49. Pitron, 2018.

Il faut par ailleurs préciser un peu plus le lien systémique reliant l'énergie et les ressources matérielles. D'un côté, produire de l'énergie avec des technologies bas-carbone exige des quantités croissantes de matières premières, notamment des métaux communs et rares. De l'autre, l'extraction et le raffinage de cette matière nécessitent toujours plus d'énergie. Et les deux phénomènes sont sujets à la loi immuable des rendements décroissants : l'énergie contenue dans l'environnement est colossale, mais elle est de plus en plus difficile à extraire⁵⁰ tandis que, si les quantités de minerais métalliques sont gigantesques, leur qualité et leur accessibilité baissent au fil du temps. L'interdépendance existant entre le secteur de l'énergie et celui des matériaux, en particulier celui des métaux, risque donc de s'accroître à l'avenir, dans une sorte de cercle vicieux incontrôlable⁵¹.

L'efficacité énergétique et le recyclage des matériaux sont les deux principaux leviers pour enrayer ce phénomène. Laissons pour l'instant de côté la question de l'efficacité énergétique, dont nous traiterons un peu plus loin. Pour ce qui est du recyclage, on peut noter qu'il ne fonctionne pour l'instant que très partiellement, d'après de nombreuses études⁵². Pour l'ingénieur Philippe Bihouix, spécialiste du sujet, le constat est évident :

On disperse en effet une partie des ressources (colorants, additifs divers, objets jetables) et la complexité ahurissante de nos produits (matériaux composites, alliages, composants de plus en plus miniaturisés) crée un mélange de métaux qui rend très délicat le recyclage sans perte fonctionnelle, sans *downcycling* (dégradation de l'usage). Plus nous enrichissons nos objets, nos services et nos usines en contenu technologique, plus nous nous éloignons des possibilités d'une économie circulaire : preuve en est que les métaux emblématiques des nouvelles technologies, comme les terres rares, l'indium, le gallium ou le germanium, ne sont recyclés, à l'échelle mondiale, qu'à moins de 1 %⁵³.

De plus, à l'inverse des énergies fossiles (stockées), un des grands problèmes des énergies de substitution (axées sur les flux) vient de leur intermittence. Quand le soleil ou le vent ne sont pas au rendez-vous, les panneaux photovoltaïques et les éoliennes ne produisent pas d'électricité, alors que la demande des consommateurs est toujours là. Personne n'envisage (encore) de ne pas pouvoir allumer son ordinateur parce qu'il y a trop de nuages dans le ciel ou pas assez de vent. Les énergies renouvelables électriques nécessitent donc des « moyens de secours » pour pallier leur

50. Empiriquement, on observe ce phénomène par la baisse du taux de retour énergétique (ou EROI, pour *energy return on investment*, en anglais), bien documentée pour le pétrole et le gaz, et tout aussi réelle pour l'énergie éolienne et solaire. Pour plus de détails, voir Court et Fizaine, 2017.

51. Bihouix, 2019, p. 101 ; Fizaine et Court, 2015.

52. UNEP, 2011 ; World Bank, 2017.

53. Bihouix, 2019, p. 102.

intermittence. Lorsqu'il y a peu de demande, il est techniquement possible de convertir et de stocker l'électricité d'origine renouvelable sous forme d'hydrogène ou d'énergie potentielle (en élevant de l'eau à l'aide de stations de pompage), de façon à l'utiliser plus tard. Mais pour des raisons de coût, les choses ne se déroulent pas ainsi. Pour le moment, lorsque les panneaux photovoltaïques et les éoliennes fonctionnent, leur production est écoulee sur le réseau électrique de manière prioritaire – ce qui provoque parfois des prix négatifs sur les marchés de gros lorsque la demande est très faible. Au contraire, lorsqu'ils ne sont pas disponibles par manque de soleil ou de vent, ce sont les centrales électriques nucléaires et fossiles qui compensent le déficit d'offre – avec parfois des prix qui explosent sur le marché où s'échange l'électricité.

Pour l'instant, recourir aux nouvelles technologies bas-carbone ne diminue donc pas nécessairement l'utilisation des énergies fossiles. L'exemple de l'Allemagne est ici le plus parlant. Depuis le milieu des années 1990, ce pays a investi de 250 à 300 milliards d'euros pour faire passer de 4 % à près de 40 % la part des énergies renouvelables dans sa consommation d'électricité⁵⁴. Dans le même temps, l'Allemagne a choisi de fermer plusieurs de ses centrales nucléaires. Ainsi, pour remédier à la production très variable des panneaux photovoltaïques et des éoliennes, le pays s'est retrouvé contraint d'investir dans de nouvelles centrales électriques fossiles. Et il est loin de n'avoir opté que pour des centrales au gaz puisque le charbon s'est maintenu en tant que première source d'électricité⁵⁵. Par conséquent, les émissions allemandes de GES par unité d'électricité produite ont baissé, mais elles restent encore bien supérieures à la moyenne européenne et près de sept fois plus élevées qu'en France⁵⁶.

Enfin, il est impératif de noter à nouveau que la transition énergétique n'a pour l'instant consisté qu'à changer la façon de produire de l'électricité et à en étendre les usages. D'ailleurs, en dépit d'avancées notables dans le domaine des moteurs électriques, les carburants issus du pétrole restent majoritaires dans le transport routier. Les agrocarburants de première génération ont pendant un moment fait illusion, mais leurs effets négatifs sur l'approvisionnement agricole et l'utilisation des terres sont désormais trop évidents pour que leur emploi se généralise⁵⁷. En ce qui concerne les

54. Jancovici, 2017; IEA, 2020, p. 13.

55. Smil, 2016, p. 195-196; IEA, 2020, p. 123.

56. European Environment Agency, 2020.

57. L'éthanol produit aux États-Unis illustre parfaitement cette impasse : il a fallu y détourner 40 % des cultures de maïs pour répondre à seulement 10 % de la consommation d'essence. À l'exception du Brésil – grâce au rendement énergétique élevé de la canne à sucre –, aucun autre pays ne pourrait détourner une part aussi grande de sa culture principale sans mettre en péril son approvisionnement alimentaire ou sa capacité à exporter des denrées alimentaires.

agrocarburants de deuxième génération produits à partir de biomasse lignocellulosique, l'enjeu de la mise à l'échelle reste immense. La capacité annuelle combinée des deux usines les plus grandes au monde – une dans l'Iowa, qui utilise des tiges de maïs, et l'autre au Brésil, qui utilise de la bagasse de canne – n'équivaut qu'à 0,005 % de la demande mondiale actuelle de carburants pour le transport. Même si une expansion rapide par un facteur 1000 devait se produire en une décennie, les agrocarburants de deuxième génération n'atteindraient que 5 % de la demande actuelle de carburants pour les transports⁵⁸.

Un défi encore plus grand consiste à pouvoir se passer des énergies fossiles aujourd'hui indispensables à la production d'acier, d'ammoniac et de plastiques. À l'heure actuelle, il n'existe pas de solution qui pourrait être déployée à grande échelle pour remplacer le milliard de tonnes de coke (dérivé du charbon) utilisées chaque année dans les hauts fourneaux du monde entier pour produire de l'acier. En ce qui concerne les 200 millions de tonnes d'ammoniac synthétisées chaque année, il faudrait disposer d'une quantité colossale d'électricité bas-carbone pour obtenir l'hydrogène requis par électrolyse de l'eau, plutôt que d'utiliser des molécules de gaz naturel comme on le fait actuellement. Enfin, pour ce qui est des 300 à 400 millions de tonnes de plastique produites chaque année, les matières premières végétales – cultures de plein champ ou arboricoles, résidus de culture ou herbacées à croissance rapide – qui pourraient remplacer les hydrocarbures ne seront jamais disponibles dans des quantités suffisantes, du moins sans entrer en conflit avec la production de nourriture⁵⁹.

Finalement, il faut avouer avec les historiens François Jarrige et Alexis Vrignon que, dans une certaine mesure,

[l]'essor et la promotion des énergies renouvelables s'apparente de plus en plus à un moyen de détourner l'attention des enjeux les plus urgents en faisant croire qu'il existerait des solutions techniques pour sortir de notre dépendance aux combustibles fossiles sans modifier radicalement nos modes de vie, nos systèmes économiques et nos imaginaires consuméristes⁶⁰.

Ce constat étant posé, il va nous falloir détailler dans les prochaines pages les nombreux subterfuges du discours technosolutionniste, ainsi que ceux de la posture écoeffondriste qui s'y oppose au travers du même messianisme.

[...]

58. Smil, 2016, p. 196.

59. *Ibid.*

60. Jarrige et Vrignon, 2020, p. 16.

ANNEXE I

Quelques tableaux pour bien manipuler le concept d'énergie

Tableau A.1

Matrice des conversions énergétiques

De Vers	Électro- magnétique	Chimique	Nucléaire	Thermique	Cinétique	Électrique
Électro- magnétique		Chimio- luminescence	Bombe nucléaire	Radiation thermique	Charge accélérée	Radiation électro- magnétique
Chimique	Photo- synthèse	Processus chimique		Ébullition	Dissociation par radiolyse	Électrolyse
Nucléaire	Radioactivité gamma					
Thermique	Absorption solaire	Combustion	Fission / Fusion	Échange thermique	Friction	Chauffage par résis- tance électrique
Cinétique	Radiomètre	Métabolisme	Radioactivité / Bombe nucléaire	Expansion ther- mique / Combustion interne	Boîte de transmission mécanique	Moteur électrique
Électrique	Cellule photovol- taïque	Pile à combus- tible / Batterie	Batterie nucléaire	Thermo- électricité	Générateur électrique	

Note: Quand plusieurs possibilités existent, seules les deux conversions principales sont identifiées.

Source: adapté de Smil, 2017, p. 4.

Tableau A.2

Multiples et sous-multiples du système international d'unités

Préfixe	Abréviation	Puissance de 10	Nombre décimal	Désignation
yotta	Y	10^{24}	1 000 000 000 000 000 000 000 000	Quadrillion
zetta	Z	10^{21}	1 000 000 000 000 000 000 000	Trilliard
exa	E	10^{18}	1 000 000 000 000 000 000	Trillion
péta	P	10^{15}	1 000 000 000 000 000	Billiard
téra	T	10^{12}	1 000 000 000 000	Billion
giga	G	10^9	1 000 000 000	Milliard
méga	M	10^6	1 000 000	Million
kilo	k	10^3	1 000	Millier
hecto	h	10^2	100	Centaine
déca	da	10^1	10	Dizaine
–	–	10^0	1	Unité
déci	d	10^{-1}	0,1	Dixième
centi	c	10^{-2}	0,01	Centième
milli	m	10^{-3}	0,001	Millième
micro	μ	10^{-6}	0,000 001	Millionième
nano	n	10^{-9}	0,000 000 001	Milliardième
pico	p	10^{-12}	0,000 000 000 001	Billionième
femto	f	10^{-15}	0,000 000 000 000 001	Billiardième
atto	a	10^{-18}	0,000 000 000 000 000 001	Trillionième
zepto	z	10^{-21}	0,000 000 000 000 000 000 001	Trilliardième
yocto	y	10^{-24}	0,000 000 000 000 000 000 000 001	Quadrillionième

Tableau A.3

Puissance de quelques convertisseurs énergétiques de l'Antiquité à nos jours

Convertisseurs énergétiques	Année	Puissance en watts (multiple adapté)
Petite bougie de cire allumée	800 AEC	5
Humain tournant une vis d'Archimède en Égypte	500 AEC	25
Petit moulin à vent américain en rotation	1800	30
Femme actionnant une machine à vanner en Chine	100 AEC	50
Polisseurs de verre travaillant toute une journée en France	1700	75
Individu fort marchant rapidement sur une roue en bois	1400	200
Âne tournant un moulin à sablier romain	100 AEC	300
Paire de bœufs faibles labourant en Chine	1900	600
Bon cheval attelé à une charrue en Angleterre	1770	750
Roue à pédales néerlandaise actionnée par huit hommes	1500	800
Cheval très fort tirant un chariot aux États-Unis	1890	1000 (1 kW)
Coureur de fond aux Jeux olympiques	600 AEC	1400 (1,4 kW)
Roue hydraulique verticale romaine faisant tourner une meule	100 AEC	1800 (1,8 kW)
Quatre chevaux tirant un carrosse	1750	2500 (2,5 kW)
Moteur atmosphérique de Thomas Newcomen pompant de l'eau	1712	3750 (3,75 kW)
Fermier du Dakota du Nord labourant avec six chevaux puissants	1870	4000 (4 kW)
Moteur de l'automobile Curved Dash de Ransom Olds	1904	5200 (5,2 kW)
Pentécotère grec avec 50 rameurs à pleine vitesse	600 AEC	6000 (6 kW)
Grand moulin à vent allemand écrasant des graines oléagineuses	1500	6500 (6,5 kW)
Cheval portant un messenger romain au galop	200	7200 (7,2 kW)
Grand moulin à vent néerlandais drainant un polder	1750	12 000 (12 kW)
Moteur du Modèle T de Ford tournant à pleine vitesse	1908	14 900 (14,9 kW)
Trière grecque avec 170 rameurs à pleine vitesse	500 AEC	20 000 (20 kW)
Machine à vapeur de James Watt	1795	20 000 (20 kW)
Équipe de 40 chevaux tirant une moissonneuse-batteuse aux États-Unis	1885	28 000 (28 kW)
Cascade de 16 moulins à eau romains à Barbegal	350	30 000 (30 kW)
Première turbine à eau de Benoît Fourneyron	1832	38 000 (38 kW)
Agriculteur français récoltant avec un petit tracteur	1950	50 000 (50 kW)
Pompes à eau dans les jardins de Versailles	1685	60 000 (60 kW)
Moteur de la Honda Civic GL	1985	63 000 (63 kW)
Turbine à vapeur de Charles Parsons	1888	75 000 (75 kW)
Machine à vapeur de la première station électrique de Thomas Edison	1882	93 200 (93,2 kW)

Convertisseurs énergétiques	Année	Puissance en watts (multiple adapté)
Plus grande machine à vapeur construite par Watt & Boulton	1800	100 000 (100 kW)
Locomotive à vapeur anglaise	1850	200 000 (200 kW)
Besoins électriques d'un supermarché nord-américain	1980	200 000 (200 kW)
Agriculteur du Manitoba labourant avec un gros tracteur diesel	2015	298 000 (298 kW)
Moteur diesel d'un sous-marin allemand	1916	400 000 (400 kW)
Lady Isabella, la plus grande roue à aubes du monde	1854	427 000 (427 kW)
Grande locomotive à vapeur à pleine vitesse	1890	850 000 (850 kW)
Turbine à vapeur de Parsons à la station électrique d'Elberfeld	1900	1 000 000 (1 MW)
Système d'approvisionnement en eau de Greenock (Écosse)	1840	1 500 000 (1,5 MW)
Locomotive diesel allemande puissante	1950	2 000 000 (2 MW)
Grande éolienne moderne servant à produire de l'électricité	2015	4 000 000 (4 MW)
Moteur de fusée pour lancer un missile V2	1944	6 200 000 (6,2 MW)
TGV français développé par Alstom	2006	9 600 000 (9,6 MW)
Turbine à gaz alimentant un compresseur de pipeline	1970	10 000 000 (10 MW)
Train shinkansen à grande vitesse de la série N700	2015	17 080 000 (17,08 MW)
Moteur diesel d'un navire marchand japonais	1960	30 000 000 (30 MW)
Quatre réacteurs de Boeing 747	1969	60 000 000 (60 MW)
Réacteur nucléaire de Calder Hall	1956	202 000 000 (202 MW)
Turbogénérateur de la centrale nucléaire de Chooz	1990	1 457 000 000 (1,457 GW)
Moteurs du lanceur de fusée Saturn V	1969	2 600 000 000 (2,6 GW)
Centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa	1997	8 212 000 000 (8,212 GW)
Économie du Japon	2015	63 200 000 000 (63,2 GW)
Économie des États-Unis (charbon et biomasse traditionnelle seulement)	1850	79 000 000 000 (79 GW)
Économie des États-Unis (hors biomasse traditionnelle)	2010	3 050 000 000 000 000 (3,05 PW)
Économie mondiale (hors biomasse traditionnelle)	2015	17 530 000 000 000 000 (17,53 PW)

Source : adapté de Smil, 2017, p. 456-458.

Tableau A.4

Densité énergétique de quelques matières premières

Classement	Exemples	Densité énergétique (intervalle en MJ/kg)
<i>Denrées alimentaires</i>		
Très faible	Fruits, légumes	0,8-2,5
Faible	Tubercules, lait	2,5-5,0
Moyenne	Viandes	5-12
Élevée	Céréales, graines de légumineuses	12-15
Très élevée	Huiles végétales, matières grasses animales	25-35
<i>Matières premières non alimentaires</i>		
Très faible	Tourbe, bois vert, herbacées	5-10
Faible	Résidus agricoles	12-15
Moyenne	Bois sec	17-21
	Charbon bitumineux	18-25
Élevée	Charbon de bois, anthracite	28-32
Très élevée	Pétrole brut et dérivés	40-44

Source : adapté de Smil, 2017, p. 12.

Faites circuler nos livres.
Discutez-en avec d'autres personnes.
Si vous avez des commentaires,
n'hésitez pas à nous les faire parvenir.

écosociété

ÉDITIONS ÉCOSOCIÉTÉ

C.P. 32 052, comptoir Saint-André
Montréal (Québec) H2L 4Y5
ecosociete@ecosociete.org

www.ecosociete.org

DIFFUSION ET DISTRIBUTION

Au Canada : Diffusion Dimedia
En Europe : Harmonia Mundi Livre