

UNE ENQUÊTE DE LA REVUE *LA PENSÉE ÉCOLOGIQUE*

# ÉNERGIE

JEAN-PAUL BOUTTES



Énergie

DANS LA MÊME SÉRIE

*Climat*, par Jean Jouzel et Hervé Le Treut, 2023

Jean-Paul Bouttes  
avec la participation de Dominique Bourg

# Énergie

Une enquête de la revue  
*La Pensée écologique*



*Ouvrage publié en partenariat avec  
La Librairie sonore Frémeaux & Associés*

ISBN 978-2-13-084919-3

Dépôt légal – 1<sup>re</sup> édition : 2023, septembre

© Presses Universitaires de France/Humensis, 2023  
170 bis, boulevard du Montparnasse, 75014 Paris

## PRÉSENTATION

Ce dossier dédié à l'énergie est le second publié par *La Pensée écologique*, après celui sur le climat avec Jean Jouzel et Hervé Le Treut. Le prochain sera consacré à la biodiversité. L'énergie est à la croisée de la nature dans toute son extension – du Soleil jusqu'aux écosystèmes en passant par les mines – et de l'organisation sociale dans toute son arborescence. L'utilisation de l'énergie est un phénomène social qui engage toute la société, des savoir-faire techniques et organisationnels les plus concrets jusqu'aux valeurs et aspirations au bien-être et à l'émancipation. Le rôle de l'énergie au sein des sociétés et de leur évolution les inscrit dans une continuité avec la structuration de la matière comme dans le dynamisme des vivants. Des étoiles à nos villes, usines et logements, en passant par la photosynthèse et la chaîne trophique, les convertisseurs énergétiques jouent en effet un rôle fondamental. Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que la question énergétique soit au cœur de la crise de nos relations à la nature, celle que manifeste le dérèglement climatique et plus généralement celle révélée par le dépassement

des limites planétaires. Si transition énergétique il doit y avoir, c'est précisément parce que les relations que nous nouons avec la nature sont entrées dans une phase critique, éminemment dangereuse pour l'humanité, notamment.

Nous allons prendre ce sujet à bras-le-corps en partant de l'histoire au long cours de nos sociétés, en suivant précisément le fil des convertisseurs, de nos relations de captage et d'usage de l'énergie. Nous allons chercher à comprendre l'essor de la révolution industrielle et la construction des systèmes énergétiques industriels. La décarbonation *via* l'électrification de nos actuels usages des énergies fossiles étant au cœur de la transition énergétique en cours, nous allons entrer dans les détails du système énergétique électrique, envisager des aspects ignorés du grand public, comme les contraintes au fonctionnement d'un réseau électrique, l'histoire de ces réseaux, etc. Faute de ces connaissances, il n'est guère possible de se faire une opinion fondée sur la transition énergétique et sur ce qu'on peut en attendre.

Nous verrons que les limites à nos consommations énergétiques, carbonées ou non, n'ont pas tant à voir avec les sources d'énergie que nous captions, finies ou non, qu'avec les convertisseurs qui permettent d'en user, avec les matériaux qu'ils requièrent et leurs implications extractives, avec les pollutions et les déchets qu'ils engendrent, avec les occupations des sols qu'ils suscitent. Bien entendu, des avancées techniques d'inspirations diverses peuvent à l'avenir desserrer tel ou tel étau. Au bout du compte, l'énergie



## *Présentation*

nous renvoie à des choix fondamentaux, afférents au sens que nous donnons à nos existences collectives et aux limites que nous sommes capables de nous imposer à cette fin.

Dominique Bourg



## INTRODUCTION

*La Pensée écologique* – L'énergie : question délicate s'il en est, à la fois technique et industrielle, mais aussi écologique – affectant le système-Terre et le vivant, dépendante des ressources minérales –, mais encore morale et politique, et évidemment, avec un volet économique non négligeable. En d'autres termes, c'est une question complexe, un écheveau de problèmes. Nous allons procéder à une sorte de mise à plat. Nous n'allons pas vous dire ce qu'il convient de décider, mais simplement dispenser des informations fondées, détaillées, pour que chacun, sur ce sujet, puisse se forger une opinion fondée ; laquelle ira de données factuelles à des questions de valeur qui lui sont propres. Ce livre est organisé en trois grands chapitres.

Le premier chapitre est le plus général. De quoi parle-t-on quand on aborde le sujet de l'énergie ? Quelle est la définition du mot « énergie » ? Et puis, nous n'échapperons pas à une première évocation des enjeux énergie-climat parce que, comme vous le savez, la question du climat pèse très fortement aujourd'hui sur nos usages énergétiques. Ce sera ensuite le moment d'aborder le rôle et l'importance des

questions énergétiques dans les sociétés et leur histoire, en repartant du Paléolithique. C'est dans le cadre de cette investigation historique que nous finirons par évoquer le rôle de l'industrie, dont la question énergétique ne peut être séparée de nos jours.

Avec le deuxième chapitre, nous entrerons dans les aspects les plus techniques et les plus industriels du sujet. Nous commencerons par distinguer les *vecteurs* énergétiques, comme l'électricité et l'hydrogène, des *sources* d'énergie, en différenciant les sources carbonées des sources non carbonées. Ces distinctions seront en permanence mobilisées. Concernant les sources non carbonées, nous aborderons les questions de stockage, de disponibilité, de risque, et même les conditions particulières qui peuvent être celles d'une guerre.

Dans le troisième chapitre, nous allons nous intéresser à l'avenir de la question énergétique et aux différents scénarios envisageables. Nous distinguerons l'échelle nationale de l'échelle internationale. La géographie conditionne pour partie les réponses à apporter à la question énergétique. Un pays au milieu des terres ne recourra évidemment pas à l'éolien *offshore*, un plat pays ne disposera pas d'hydraulique gravitaire, etc. Plus largement, les réponses énergétiques sont toujours données par une nation en fonction de son histoire et de sa géographie. En outre, la question du climat étant une question globale, la question énergétique se pose aussi sur le plan global. Nous n'inventerons pas ces scénarios, lesquels exigent un travail collectif important. Nous nous appuyerons sur les travaux de l'Agence internationale de l'énergie pour les aspects internationaux. Concernant l'échelle

## Introduction

nationale et française, nous nous tournerons vers les scénarios de RTE (Réseau de transport de l'électricité) qui, lui-même, s'est appuyé aussi sur les travaux antérieurs de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et de l'association négaWatt. Nous commenterons les scénarios proposés par RTE pour la France.

Pour répondre à ces questions et enjeux, *La Pensée écologique* s'est tournée vers Jean-Paul Bouttes. Pourquoi ? Pour une question de compétences. Jean-Paul Bouttes, ancien élève de l'École polytechnique ayant dirigé la stratégie et la prospective au sein du groupe EDF, dispose des compétences scientifiques, techniques et industrielles requises. Il a également enseigné l'économie à l'École polytechnique durant des années, et la question énergétique est aussi une question économique. En outre, sa culture générale ne nous a pas échappé. Il est capable de lire des écrits antiques grecs et latins dans le texte, et s'intéresse depuis des lustres aux enjeux éthiques et philosophiques, sans même parler de théologie. Une culture humaniste nous apparaît tout aussi fondamentale pour traiter d'un sujet qui conditionne l'organisation d'une société. C'était l'auteur idéal.

D'aucuns crieront peut-être au scandale, compte tenu de la carrière de Jean-Paul Bouttes à EDF, et donc dans l'industrie nucléaire. Cette carrière est passée, Jean-Paul étant retraité. Et à ce que je sache, leur passé professionnel auprès des majors n'a pas empêché les géologues de l'ASPO (l'Association pour la diffusion de la connaissance du *peak oil*) de faire leur travail de lanceurs d'alerte eu égard au pic pétrolier. Aux

## *Énergie*

lectrices et lecteurs de juger, non en raison d'un préjugé suspendu depuis Sirius, mais en tenant compte des arguments avancés dans les pages qui suivent et des connaissances mobilisées.

À quoi s'ajoute que notre revue ne s'est pas lancée dans cette enquête en tenant haut et fort le fanion nucléaire. Nous nourrissons des doutes quant à la place de ce type d'énergie, à long terme, au sein d'une société en harmonie avec les écosystèmes. Libre à chacune et à chacun d'apprécier le résultat final de notre mise à plat de la question énergétique pour les prochaines décennies.

## CHAPITRE PREMIER

# Généralités et histoire

*La Pensée écologique* – Il n’y a pas de vie sans énergie et la captation de l’énergie constitue une quête constante pour tout être vivant. Or, curieusement, jusqu’à l’avènement de l’ère thermo-industrielle, jusqu’à l’entrée dans l’âge de la vapeur et des « machines à feu », pour reprendre l’expression de Carnot, le thème de l’énergie, à la différence du travail, est inexistant dans la philosophie et dans la littérature ; la physique elle-même ne s’y intéressera nommément qu’au XIX<sup>e</sup> siècle. La biomasse est à la même époque extrêmement sollicitée, mais on ne parle pas non plus de « biomasse » ; on évoque les forêts, la déforestation, qui est alors un thème majeur. Le lien entre la question de l’esclavage, elle aussi très présente, et la question énergétique ne semble pas établi non plus. On ne parle pas non plus d’énergie animale. En revanche, à partir du moment où l’on va rentrer dans l’ère industrielle, le mot et le thème « énergie » vont s’imposer. Peut-on pour autant affirmer que, jusqu’à la révolution industrielle, la question énergétique est une forme d’impensé ? Aujourd’hui, en revanche, le lien entre énergie et devenir des sociétés, sous pression

climatique en outre, est passé dans l'opinion publique. L'énergie apparaît d'évidence comme une question fondamentale pour les sociétés et leur avenir.

Je commencerai par une première remarque. Pour l'opinion, on produit de l'énergie. EDF nous a même vendu assez souvent cette idée. Or non, les êtres humains ne produisent pas d'énergie. L'énergie est constante dans l'univers, c'est le premier principe de la thermodynamique. Ce que les êtres humains savent faire en revanche, c'est la capter, la transformer et la transporter. Et pour ce faire, nous avons besoin d'énergie. Et aucune de ces opérations ne se fait non plus à main nue, chacune exige également des matériaux. Gardons-le toujours à l'esprit.

Autre remarque initiale et autre sujet important, le retour sur investissement énergétique. Nous venons de l'entrevoir, l'accès à l'énergie constitue toujours une forme de ratio entre l'énergie utilisée pour capter, transformer et transporter de l'énergie et, au bout du compte, l'énergie qui nous reste, celle que nous pouvons vraiment utiliser. Et nous verrons qu'en l'occurrence, les matériaux pour ce faire sont aussi très importants et peuvent exercer un rôle non moins limitant. On distingue alors un calcul de ce retour sur investissement énergétique immédiat, *direct*, c'est-à-dire ne prenant en compte que l'énergie utilisée par un dispositif d'extraction donné – l'énergie qui entre dans un dispositif et celle qui en sort –, d'un retour sur investissement *étendu*, considérant tous les dispositifs impliqués sur l'ensemble de la chaîne, de la captation aux infrastructures de transformation et de transport, y compris l'énergie consommée par la chaîne des



opérateurs impliqués, jusque dans leurs foyers. On imagine sans peine l'impossibilité d'un calcul exact de ce dernier retour sur investissement.

Notre première question est aussi simple que massive : qu'est-ce que l'énergie ? Comment la définir ?

## COMMENT DÉFINIR L'ÉNERGIE ?

### *L'histoire du mot, de la Grèce antique à la science moderne*

*Jean-Paul Bouttes* – L'énergie ne se produit pas et ne se consomme pas, mais elle se transforme d'une forme en une autre, formes dont nous verrons qu'elles peuvent être plus ou moins adaptées aux besoins des êtres vivants et des humains. Le grand chimiste Lavoisier disait à propos de la masse d'un système et de ses quantités en composants élémentaires : « [...] rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération<sup>1</sup>... ». Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme : en fait cela n'est pas tout à fait vrai de la masse d'un système isolé, ou de la quantité des éléments qui le constituent, mais c'est vrai en revanche de l'énergie. C'est d'ailleurs sa définition, un peu abstraite, pour la science moderne :

1. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, Paris, Cuchet, 1789.

## Énergie

l'énergie, c'est précisément le paramètre d'état d'un système isolé qui se conserve dans le temps, à la différence d'autres paramètres, comme la température, le nombre d'atomes de différentes natures ou la masse. Plus particulièrement, un système isolé peut perdre de la masse ; c'est ce qui se passe dans les réactions de fission ou de fusion nucléaires dans les étoiles. Cette perte de masse traduit la transformation d'une énergie nucléaire potentielle (liée à la structure instable des noyaux atomiques) en énergie sous forme de chaleur et de rayonnement : derrière l'équation célèbre d'Einstein,  $E = mc^2$  (qu'il est plus juste d'écrire :  $\Delta E = \Delta m \times c^2$ ), on a une perte de masse, mais bien une conservation de l'énergie, avec sa transformation sous forme de chaleur et de rayonnement.

Nous allons revenir sur cette conservation de l'énergie, qui a quelque chose de mystérieux. Mais il faut tout de suite resituer cette loi de conservation – le premier principe de la thermodynamique –, dans le triptyque du monde de l'énergie. Trois volets qui renvoient au fond à notre intuition : nous avons bien le sentiment que tout se conserve, mais aussi que pour autant, et sous certains aspects, quelque chose se dégrade avec l'usure du temps, et qu'en même temps des êtres nouveaux, plus complexes, naissent et émergent. Quand on parle d'énergie à propos de l'évolution d'un système physique « isolé », il faut toujours garder en tête ces trois volets. D'abord, cette idée que l'énergie se conserve dans le temps, et aussi surtout qu'elle peut se transformer pour être plus « utile » grâce à des « convertisseurs d'énergie », notion essentielle pour bien comprendre les développements de tout notre parcours. Deuxième

idée, cette énergie peut se dégrader parce qu'une partie devient plus désordonnée et donc plus difficile à utiliser dans les transformations du système physique : c'est le second principe de la thermodynamique, avec l'augmentation plus ou moins importante de cette fraction désordonnée que l'on mesure par l'entropie<sup>1</sup>. Enfin, il existe un troisième volet qui correspond à l'émergence dans l'histoire de l'univers de sous-systèmes physiques de plus en plus complexes et sophistiqués, depuis le Big Bang jusqu'aux systèmes stellaires et aux grandes galaxies, mais également aux molécules complexes et aux systèmes vivants. Ces sous-systèmes complexes émergent et perdurent grâce aux transformations d'énergie en leur sein et dans leurs échanges avec leur environnement.

*LPE* – Je souligne au passage cette notion de convertisseur. Il n'y a pas en effet d'usage possible d'une source d'énergie sans un convertisseur approprié, un dispositif technique, et nous en reparlerons. Je reviens à ma remarque initiale, *quid* de cet impensé de l'énergie que j'évoquais ?

*JPB* – C'est vrai qu'il faut attendre la science moderne pour articuler ces trois dimensions d'une façon opératoire, mais je vais nuancer un peu ce que tu disais sur nos connaissances avant le XVII<sup>e</sup> siècle. J'aime effectivement beaucoup les Grecs, et le mot *energeia*, qui va donner *énergie*, est un mot magnifique. Chez

1. Un troisième principe de la thermodynamique, peu connu, le principe de Nernst, précise le second principe en indiquant qu'il faudrait atteindre le zéro absolu de température (-273,5 °C) pour obtenir un système parfaitement ordonné.

## Énergie

les philosophes grecs et en particulier chez Aristote, il signifie en acte ; *ergon*, c'est le travail, l'œuvre, et l'énergie c'est donc ce qui est en travail, en cheminement vers un achèvement, ce qui est en train de se transformer. Ce terme va de pair dans la langue grecque avec celui de *dunamis*, la capacité d'agir, la puissance, qui donnera « dynamique » en français et que l'on retrouve dans « thermodynamique ».

Les questions que les Grecs se posent avec ce mot *energeia* sont d'abord l'écho d'un étonnement fondamental devant les phénomènes naturels, comme le mouvement du fleuve qui s'écoule, l'eau qui se transforme de liquide en vapeur quand on la chauffe. Ils s'interrogent sur l'origine du mouvement comme sur les transformations de la matière, et plus encore sur la naissance et l'évolution des univers et des êtres vivants : que se passe-t-il quand le gland devient chêne et la chenille, papillon ? Comme les scientifiques aujourd'hui, les Grecs s'intéressent, avec ce mot d'« énergie », à l'ensemble des formes possibles de l'énergie, avec l'intuition que, dans ces transformations, quelque chose se conserve (l'effet doit être proportionnel à la cause), se dégrade (l'âge d'or est-il derrière nous ?), mais aussi parfois naît et émerge (en contribuant à améliorer le monde ?)

Cela dit, tu as raison, ce n'est pas du tout opératoire chez les Grecs pour construire des maisons, pour se déplacer ou pour se chauffer. Les termes d'énergie, de puissance, de force appartiennent à ce même vaste champ sémantique, et leur signification ne va se préciser et se différencier qu'à partir du XVII<sup>e</sup> siècle avec la science moderne. Celle-ci va mettre entre parenthèses

## Table

<i>La sûreté des centrales</i> .....	266
<i>Les déchets à vie longue</i> .....	285
CHAPITRE III. Scénarios énergétiques.....	293
Les scénarios énergie-climat à l'échelle internationale (AIE, Giec).....	294
<i>Les enjeux énergie-climat en quelques chiffres et les objectifs « zéro émission nette » à 2050 ...</i>	294
<i>Le scénario « Net Zero by 2050 » de l'AIE (octobre 2021) .....</i>	297
<i>Intérêt et analyse critique du scénario « Net Zero » de l'AIE .....</i>	304
<i>Les scénarios « 1,5 °C » du Giec.....</i>	311
Scénario « 2050 » pour la France, l'étude de RTE en 2021.....	315
<i>Une rupture dans les prévisions de consommation d'électricité .....</i>	316
<i>La comparaison des mix électriques : résultats et commentaires .....</i>	319
<i>Le contrepoint de l'Allemagne .....</i>	323
Besoins en énergie et sobriété.....	329
L'État et les politiques publiques pour réussir la transition énergétique en France et en Europe .....	339
<i>La dérégulation en Europe dans les réseaux de service public et ses limites.....</i>	339
<i>L'exemple des marchés de l'électricité et la crise énergétique de 2022 .....</i>	343
<i>Le rôle des pouvoirs publics et de l'État dans la transition énergétique.....</i>	352

## *Énergie*

Les dimensions internationales de l'énergie :	
climat et géopolitique .....	354
<i>Les négociations climatiques : de Kyoto (1997)</i>	
<i>à Paris (2015)</i> .....	354
<i>Énergie et géopolitique</i> .....	361
POUR CONCLURE .....	365
REMERCIEMENTS .....	369