

Paul Mathis

L'énergie, moteur du progrès

?

120
clés pour
comprendre
les énergies

éditions
Quæ

L'énergie, moteur du progrès ?
120 clés pour comprendre les énergies

Dans la même collection

Les serpents ont-ils peur des crocodiles ?

120 clés pour comprendre les reptiles
Luc et Muriel Chazel, 2014, 184 p.

Les eaux souterraines sont-elles éternelles ?

90 clés pour comprendre les eaux souterraines
Jean Margat, Thierry Ruf, 2014, 152 p.

Où le monde minéral choisit-il ses couleurs ?

100 clés pour comprendre les roches et les minéraux
Martial Caroff, 2014, 184 p.

Tous les champignons portent-ils un chapeau ?

90 clés pour comprendre les champignons
Francis Martin, 2014, 184 p.

Pourrons-nous vivre sans OGM ?

60 clés pour comprendre les biotechnologies végétales
Yvette Dattée, Georges Pelletier (coord.), 2014, 144 p.

Mais que fait donc ce gendarme dans mon jardin ?

100 clés pour comprendre les petites bêtes du jardin
Patrice Leraut, 2014, 160 p.

Le jardin suit-il des modes ?

90 clés pour comprendre les jardins
Yves-Marie Allain, 2013, 136 p.

Les oiseaux ont-ils du flair ?

160 clés pour comprendre les oiseaux
Luc et Muriel Chazel, 2013, 240 p.

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex, France

© Éditions Quæ, 2014

ISBN : 978-2-7592-2258-2

ISSN : 2261-3188

Paul Mathis



L'énergie, moteur du progrès



120
clés pour
comprendre
les énergies

Éditions Quæ

Remerciements


Je remercie particulièrement celles et ceux qui m'ont aidé à la recherche d'illustrations : Christian Clerc-Girard, Thierry Grimpart, Jean-Paul Hulot, Myriam Jeannin, Michèle Julien, Florence Klotz, Jean Laherrère, Charlene Lécuyer, Frédéric Martel, Didier Nectoux, Jean-Baptiste Segard, Michel Serpelloni, Evarist Shirima, Régine Trébossen, Benoît Trémeau, Hélène Valladas, André Verméglio, François Vuataz, ainsi qu'Anne-Lise Prodel pour son aide à la recherche sur Internet.

Table des matières

Avant-propos	7
L'énergie sous toutes ses formes	9
L'énergie et le vivant	27
Histoire de l'utilisation des ressources énergétiques par les humains	41
Les ressources en énergie	53
La transition énergétique	107
Énergie et société	131
Quelques pistes pour l'avenir	153
Liste des sigles et acronymes	167
Bibliographie	168
120 clés pour comprendre les énergies	170
Crédits photographiques	175







Avant-propos

Il peut sembler présomptueux de vouloir traiter le thème de l'énergie en seulement 120 courtes questions-réponses, tellement ce thème est important aux plans socio-économique et politique. Tellement aussi sont variés les aspects de l'énergie, depuis la science de base jusqu'à la géopolitique, depuis les temps inférieurs à la seconde jusqu'au milliard d'années, depuis l'échelle de l'atome jusqu'à celle de la planète, voire de l'univers.

Il m'a donc fallu faire des choix drastiques, que l'on me reprochera à juste titre.

Par déformation professionnelle, le premier biais a été d'accorder de l'importance à tout ce qui touche au vivant et à la biomasse. Ce sont des thèmes qui, bien souvent, ne sont traités que très succinctement dans les livres dédiés à l'énergie, mais ils sont essentiels, et beaucoup de gens y sont légitimement très sensibles. Également par déformation professionnelle, mais en négatif, les questions choisies accordent trop peu de place aux aspects économiques. Mais les bonnes références ne manquent pas à cet égard, émanant de diverses écoles françaises, en particulier de celle du professeur Jean-Marie Chevalier de l'université Paris-Dauphine. Les aspects très techniques n'ont pas été abordés non plus car ils le sont fort bien ailleurs, et leur variété est considérable. On pourrait écrire d'épais ouvrages sur le raffinage du pétrole, sur la rénovation thermique, sur les réacteurs nucléaires de 4^e génération, et sur une centaine d'autres sujets tout aussi importants.

En fait, je suis resté dans la continuité de mon livre *Les énergies. Comprendre les enjeux*, publié par les Éditions Quae en 2011, en me situant à l'interface entre les aspects scientifiques et sociétaux, mais en étant beaucoup plus simple. Sur les questions

traitées, j'essaye d'éviter les points de vue trop systématiques, les certitudes absolues.

À quelques questions, peu nombreuses, j'ai clairement répondu par oui ou par non. Mais la plupart du temps j'ai préféré n'apporter que des éclairages. Sur beaucoup de sujets, ils permettront au lecteur de se faire une idée, si possible pas trop fausse, en se méfiant des fausses évidences.

La plupart des chiffres sont approximatifs, mais quand même suffisamment précis pour que le lecteur se fasse des idées correctes, car on se place ici dans une visée pédagogique et, comme il est écrit à propos de Montaigne, « Le maître qui émancipe le jugement de l'élève ne peut être confondu avec le maître qui domine » (Henri Pena-Ruiz, *Le roman du monde*).

L'énergie



sous toutes ses formes

1 Les changements climatiques ont-ils un rapport avec l'énergie ?

Il me plaît de commencer ce livre par un problème qui conditionne vraiment notre avenir sur la planète. Et de répondre oui à la question : les changements climatiques sont dus essentiellement à notre consommation de charbon, de pétrole et de gaz. La raison en est fort simple : quand on utilise ces trois sources d'énergie, on procède par combustion, c'est-à-dire qu'on les brûle. Et, quoi qu'on fasse, il se dégage du dioxyde de carbone (CO_2). C'est un gaz à effet de serre (GES), qui s'accumule dans l'atmosphère et y séjourne un temps fort long, de l'ordre du siècle. Comme on consomme beaucoup, et de plus en plus, de charbon, de pétrole et de gaz, il se dégage de plus en plus de CO_2 , dont la concentration dans l'atmosphère ne fait qu'augmenter. L'effet de serre s'accroît et la température de la planète également.

Dès le début de ce livre, il faut insister sur l'importance de ce problème, que des débats politiques à courte vue tendent à faire oublier. La poursuite des tendances actuelles entraînerait, entre 2050 et 2100, une élévation de 4 °C de la température

Les gaz à effet de serre (GES)

Les principaux GES responsables du réchauffement du climat sont le dioxyde de carbone (CO_2), le protoxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4). La vapeur d'eau est un GES à concentration presque stable. Les carbures halogénés, utilisés comme solvants industriels et dans la climatisation, sont des GES très puissants qui doivent être très surveillés. Leur concentration reste très faible.

Quantité de CO_2 émise lors de la combustion d'une tonne équivalent pétrole (tep) de : charbon : 4,0 t, pétrole : 3,1 t, gaz naturel : 2,3 t.

moyenne planétaire. Cela veut dire, en bien des endroits, des canicules à répétition. Mais aussi de fortes perturbations du régime des pluies, la multiplication des phénomènes climatiques extrêmes (ouragans, inondations, sécheresses), la fonte progressive des glaciers, et l'élévation du niveau des océans. Certains pensent qu'il s'agit là d'une dramatisation destinée à faire peur aux citoyens. Il y a pourtant de nombreux indices bien perceptibles comme la fonte de la banquise arctique, le changement des habitudes des oiseaux migrateurs ou l'évolution des dates de récolte des raisins. Ils se conjuguent avec les analyses des scientifiques pour alerter sur la réalité des dangers. De même faudra-t-il parler de « réfugiés climatiques » pour ceux qui quitteront leur pays où les récoltes diminuent et où la mer submerge progressivement les terres cultivées.

Le glacier d'Athabasca, au Canada, a perdu la moitié de son volume depuis 1900

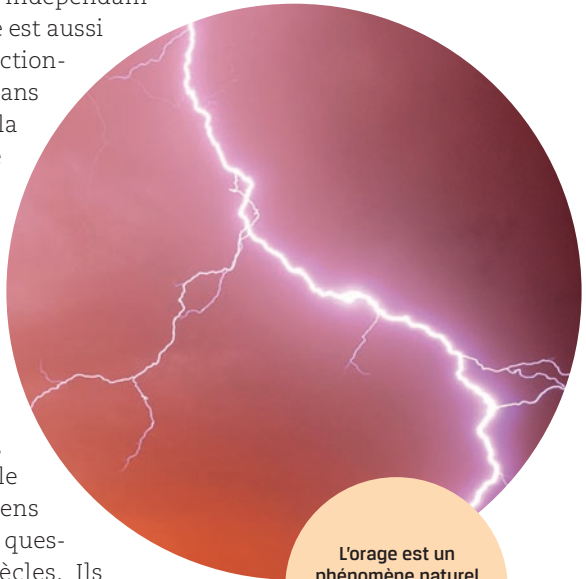


2 L'énergie, qu'est-ce que c'est ?

L'énergie est présente dans tous les actes de notre vie quotidienne. Des exemples ? On met en jeu de l'énergie quand on fait marcher le chauffage, quel qu'il soit. Quand on utilise un moyen de transport. Quand on consomme des aliments. Quand on s'éclaire, qu'on regarde la télévision, qu'on téléphone, etc. Mais elle est également mise en jeu dans le fonctionnement de toutes les machines, dans l'activité des usines, dans les travaux de construction, etc. Indépendamment de l'homme, elle est aussi présente dans le fonctionnement de l'univers, dans les marées, la foudre, la lumière du soleil, le vent... Ce n'est donc pas une création humaine. Qu'est-ce que c'est ?

Le terme « énergie » provient du grec *energeia* qui signifie « force en action ».

Bien qu'omniprésente, l'énergie reste difficile à définir. Les physiciens se sont penchés sur la question pendant des siècles. Ils sont parvenus à une conception assez claire vers 1850 : l'énergie est une propriété physique qui peut prendre des formes différentes (chaleur, énergie mécanique, électricité, énergie nucléaire, lumière, énergie chimique, etc.) qui peuvent se convertir l'une dans l'autre. Sa valeur se conserve lors de ces interconversions. Roland Lehoucq, astrophysicien au CEA, la définit comme une notion de physique qui quantifie la capacité d'un système à effectuer des transformations (Le Monde, 8 novembre 2012). Cette définition contient deux termes essentiels : *quantifie* (c'est-à-dire que l'énergie est une quantité qui peut être mesurée) et *effectuer des transformations* (l'énergie est présente pour agir d'une manière ou d'une autre). Pour les humains, l'énergie c'est ce qui permet d'agir.



L'orage est un phénomène naturel qui met en œuvre de grandes quantités d'énergie

3 Chaleur et température, est-ce la même chose ?

La chaleur est la forme d'énergie la plus répandue. On en fait usage pour chauffer les locaux, pour avoir de l'eau chaude sanitaire, cuire et conserver les aliments, travailler les métaux, fabriquer verres et céramiques, produire de l'électricité, etc. Arrêtons cette liste déjà longue. Et puisque notre toucher y est sensible, c'est une énergie dont nous percevons aisément une propriété : sa température.

Car l'utilisation de la chaleur dépend essentiellement de sa température. Celle-ci se mesure en degrés centigrades ($^{\circ}\text{C}$), avec 0°C pour la glace fondante et 100°C pour l'eau en ébullition, à la pression atmosphérique du niveau de la mer. Une autre échelle de température, graduée en kelvin (K), a une signification physique plus profonde. Son zéro, que l'on appelle le zéro absolu, proche de -273°C , est la limite basse des températures que l'on peut atteindre : on peut descendre (difficilement !) jusqu'à un millionième de K, mais on ne pourra jamais atteindre 0 K.

Quelques repères : la liquéfaction de l'hélium se fait à 4 K, celle de l'azote à 77 K, et la glace fond à 273 K environ.

La chaleur est une propriété universelle car elle est toujours présente dans la matière. Chaque parcelle de cette dernière est toujours dotée d'une certaine température qui reflète la vitesse



Utilisée plus ou moins efficacement, la chaleur remplit beaucoup d'usages domestiques ou industriels (ici, fabrication de poterie au Mali, avec un très mauvais rendement énergétique)

des déplacements de ses constituants. Dans la matière, les molécules, les atomes, les ions bougent sans arrêt, de manière désordonnée, ce qu'on appelle l'agitation thermique. Ces mouvements sont d'autant plus rapides que la température est élevée. La chaleur, c'est l'énergie de tous ces mouvements.

La chaleur peut se propager d'un corps à un autre, mais toujours d'un corps à haute température vers un corps à température plus basse. Elle est très bien propagée par des corps dits bons conducteurs, comme l'eau ou les métaux. Dans la pratique, on peut produire de la chaleur quelque part et vouloir l'utiliser ailleurs. On sait maintenant transporter la chaleur sur de longues distances avec de faibles déperditions d'environ 2 % sur 100 km. Il en va de même pour le froid, qui n'est que de la chaleur à basse température.

4 Comment définir l'énergie mécanique ?

L'énergie mécanique d'un objet est proportionnelle à sa masse. On apprend au lycée que c'est la somme d'une énergie potentielle et d'une énergie cinétique. Pour un objet de masse m situé à une hauteur h au-dessus du sol, l'énergie potentielle est :

$E_{pot} = mgh$ où g est l'accélération due à la pesanteur.

L'énergie cinétique est :

$E_c = \frac{1}{2} mv^2$ où v est la vitesse de l'objet.



Les transports sont l'un des meilleurs exemples d'énergie mécanique en action. Ici, transport de camions sur l'autoroute ferroviaire alpine vers Saint-Jean de Maurienne

Quand l'objet change de position et de vitesse, son énergie totale ne change pas, mais il y a conversion d'énergie potentielle en énergie cinétique, et inversement.

Pour l'illustrer, considérons l'eau (de masse m) d'un lac de barrage situé à une hauteur h au-dessus d'une turbine située en contrebas. L'eau du lac a une énergie potentielle : $E_{pot} = mgh$.

En ouvrant des vannes, cette eau peut être évacuée vers le bas, par des conduites forcées. Elle acquiert une vitesse v , et donc une énergie cinétique : $E_c = \frac{1}{2}mv^2$

Cela lui permet d'actionner la turbine d'un alternateur générateur d'électricité.

L'énergie mécanique est en action dans les usines où des métaux sont transformés, dans les travaux publics pour transporter terre et rochers, dans les armes, dans les moyens de transport, et très généralement dans les machines. Parmi les sources naturelles d'énergie utilisables, l'énergie mécanique se trouve dans le vent et dans l'énergie de l'eau : houle et courants marins (énergies marines), chutes d'eau (énergie hydraulique). Une énergie mécanique gigantesque est mise en œuvre dans la tectonique des plaques, à la surface de la Terre. Elle n'est pas utilisable, mais elle est la source de catastrophes comme les tsunamis et les tremblements de terre.

5 L'électricité, est-ce de l'énergie ?

L'électricité est un vecteur qui transporte de l'énergie par déplacement de charges électriques dans des conducteurs. Elle existe dans la nature, sur une vaste échelle, avec la foudre. Elle existe aussi à l'échelle microscopique, sous la forme de la charge des particules, charge négative pour l'électron, positive pour le proton. Le vecteur électricité est fondé sur le déplacement d'électrons dans un conducteur comme le fil de cuivre.

On l'obtient à partir d'autres énergies, essentiellement par deux moyens : des alternateurs actionnés par la détente de vapeur d'eau (elle-même produite par diverses énergies capables de produire de la chaleur : fossiles, nucléaire, géothermique, etc.), par des courants d'eau liquide (hydro-électricité), ou des courants d'air (éolien). L'autre moyen consiste à convertir directement l'énergie de la lumière en électricité grâce à des semi-conducteurs, c'est la photo-électricité. Entre un lieu de production et un

Les multiples de 10

Mille, symbole k (kilo-) ; million (M pour méga) ; milliard (Md ou G pour giga) ; millier de milliards (T pour téra).



lieu d'utilisation, l'électricité est transportée par des fils conducteurs, eux-mêmes organisés en réseaux complexes. C'est par ces réseaux que les utilisateurs disposent d'électricité, une énergie essentielle à nos sociétés.

Les réseaux électriques connectent un grand nombre de sources à des utilisateurs qui se chiffrent en dizaines de millions. Ils sont caractérisés par une puissance transportée, et par une tension (ou voltage), qui est presque toujours alternative, avec une fréquence de 50 Hz (hertz) chez nous. C'est un service public, RTE (Réseau de transport d'électricité), qui assure la qualité de la fourniture d'électricité au niveau des lignes à très haute tension. Celle-ci requiert en permanence l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. C'est une condition essentielle au maintien de la fréquence du courant, et cela permet d'éviter une coupure qui aurait un caractère catastrophique. C'est ce qu'on appelle un *black-out* : on se retrouve tous dans le noir. C'est la hantise de RTE lorsqu'il y a une pointe de demande, c'est-à-dire que la plupart des clients consomment en même temps. En France, la plus forte pointe a été de 101 700 MW, le 8 février 2012, un jour bien froid, à 19 h, lorsque tous les chauffages électriques tournaient à plein régime et s'ajoutaient aux besoins d'électricité pour la cuisson, la télévision, l'éclairage, les transports, etc.

L'énergie de l'électricité franchit les distances grâce aux lignes à très haute tension qui interconnectent tous les pays européens

Électricité par source (en pourcentage) et CO ₂ émis en grammes par kilowatt heure d'électricité produite, pour différents pays. Année 2011.						
	Chine	USA	Allemagne	France	Suède	Monde
Charbon	79,0	43,3	45,1	3,1	1,3	41,3
Pétrole	0,2	0,9	1,1	0,6	0,5	4,3
Gaz naturel	1,8	24,2	13,9	4,8	1,0	22,0
Nucléaire	1,8	19,0	17,9	79,4	40,3	11,7
Hydraulique	14,8	7,4	2,9	8,0	44,2	15,8
Biomasse, déchets	0,9	1,8	7,3	1,3	8,6	1,9
Autres EnR	1,5	3,4	11,8	2,7	4,1	3,0
gCO ₂ /kWh	764	503	477	61	17	536

Source : Agence internationale de l'énergie, 2013.

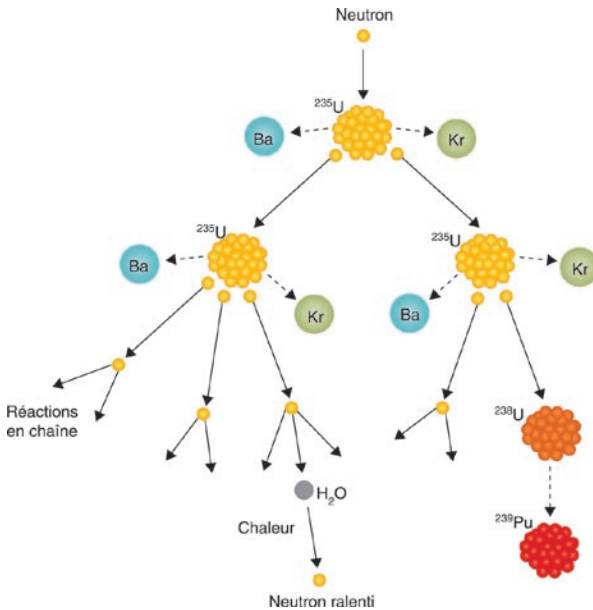
Le réseau français de transport d'électricité est connecté, au sein d'un réseau européen, à celui des pays voisins, permettant des exportations et des importations d'énergie électrique. Et, pour aller chez tous les usagers, il irrigue un réseau de distribution qui est géré par ERDF, Électricité réseau distribution France, une filiale d'EDF qui a une mission de service public. Dans ce montage, EDF n'est plus que producteur d'électricité, alors qu'il assurait autrefois la production, le transport et la distribution d'électricité.

6 L'énergie nucléaire, est-ce si mystérieux ?

L'énergie nucléaire ne correspond à rien que l'on puisse saisir directement car elle trouve sa source dans les noyaux des atomes. C'est la raison pour laquelle elle apparaît mystérieuse, sans compter que sa maîtrise nécessite des technologies très complexes.

Il y en a de deux sortes, l'énergie de fission et l'énergie de fusion. Pour les comprendre, il faut partir d'une constatation : les atomes sont presque tous stables, à l'échelle du milliard d'années (Mda). Mais certains atomes sont instables : leur noyau, constitué de protons et de neutrons, se désintègre. C'est le phénomène de radioactivité. On parle de radioactivité naturelle quand un noyau

se désintègre spontanément en noyaux plus petits, avec émission de rayonnements. Parmi ces rayonnements, il y a l'émission de neutrons. Et quand un neutron rencontre un noyau, il le désintègre : on parle alors de radioactivité artificielle. À titre d'exemple, l'uranium ^{235}U se désintègre spontanément avec une durée de vie de 700 millions d'années (Ma). Quand il absorbe un neutron, il se désintègre immédiatement en donnant des atomes de krypton et de baryum, et trois neutrons. Ces neutrons ont une grande vitesse et donc de l'énergie cinétique. Dans un réacteur nucléaire, ils servent à deux choses. Certains d'entre eux verront leur énergie cinétique transformée en chaleur, pour chauffer de l'eau, former de la vapeur et produire de l'électricité. Et certains seront absorbés par des atomes de ^{235}U pour entretenir le processus, ce qu'on appelle une réaction en chaîne. Si la réaction en chaîne est trop forte, elle devient incontrôlée et on a une explosion : c'est ce qui se passe dans la bombe atomique. Dans un réacteur électronucléaire, la réaction en chaîne est contrôlée et le combustible ^{235}U , est consommé progressivement, sur une durée de l'ordre de l'année.



Ce schéma montre quelques-unes des réactions qui se déroulent dans un réacteur nucléaire et qui aboutissent à l'échauffement de l'eau et à la production de produits de fission (ici, baryum Ba, krypton Kr et plutonium Pu)

L'énergie nucléaire fournit de la chaleur qui permet de produire de l'électricité. Elle se caractérise essentiellement par sa grande densité : il y a autant d'énergie dans un gramme d'uranium que dans 10 000 g de pétrole. La mise en œuvre de cette énergie nécessite de fortes compétences technologiques et de lourds investissements à la construction, qui sont rentabilisés sur une durée de vie d'environ 50 ans. La réaction de fission produit des déchets radioactifs, dits produits de fission, qui doivent être stockés sur une très longue durée.

7 Qu'y a-t-il de plus étonnant que la lumière ?

La lumière offre la particularité de pouvoir être décrite de deux manières essentiellement différentes : c'est une onde, dite électromagnétique, car constituée d'une composante électrique et d'une composante magnétique ; et c'est un ensemble de particules, les photons, dont la masse au repos est nulle. On sort donc complètement des objets ordinaires ! Et pourtant la lumière est bien ordinaire : on la rencontre partout, même lorsque l'on ne la voit pas... Le rayonnement électromagnétique comporte des fréquences élevées, correspondant à des photons de haute énergie (rayonnement gamma, rayons X, ultraviolet), à des fréquences moyennes (lumière visible, la seule détectée par l'œil), et à des fréquences

L'arc-en-ciel permet de voir que la lumière du soleil est composée de lumières de couleurs différentes

