

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 79 (1987)
Heft: 3-4

Artikel: L'énergie, de quoi s'agit-il?
Autor: Boiteux, Marcel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940633>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

L'énergie, de quoi s'agit-il ?

Marcel Boiteux

Depuis le premier choc pétrolier, l'énergie occupe une place de choix dans l'actualité.

Après trente années de croissance économique, trente années d'une croissance aussi exceptionnelle par son rythme que par sa régularité, le monde se voyait brusquement confronté, fin 1973, au risque de manquer d'énergie.

Peu de temps avant, les adeptes de la croissance zéro avaient déjà lancé un signal d'alarme. Le Club de Rome, et notamment le rapport Meadows, évoquaient le risque d'un épuisement de la planète. Mais le message n'avait atteint que le monde des intellectuels.

Et brusquement, avec la guerre du Kippour et la menace d'un embargo pétrolier, le spectre de la pénurie descendait dans la rue ! La télévision montrait la reine Juliana chevauchant une bicyclette, et nos compatriotes, affolés, virent le moment où ils n'auraient plus d'essence pour leurs automobiles.

Dans la panique, on se retourna contre les «experts», accusés de n'avoir pas su prévoir l'événement. Et, comme un malade condamné qui cherche ses derniers espoirs dans la médecine dite douce ou parallèle, ce fut la ruée vers les énergies douces et l'expertise parallèle.

Caisse de résonnance de l'opinion publique les médias s'emparèrent du sujet. Les gens étant ce qu'ils sont, les tirages des journaux et les indices d'écoute sont d'autant plus élevés que les messages sont plus originaux, les nouvelles plus alarmantes. C'est dire que l'expertise parallèle connut un considérable succès, tandis que le postulat d'une inéluctable pénurie était définitivement admis.

Ces périodes de trouble où tout est contesté n'ont pas que des effets pervers. Le sottisier énergétique s'est, certes, formidablement enrichi. Mais c'est une saine gymnastique pour les spécialistes, ou réputés tels, que d'avoir à se remettre en cause. Dans le monde des techniques, bien des évidences ne résistent pas à l'usure du temps. Et les finalités premières des sociétés évoluent. La contestation oblige à revenir au fond des choses.

Aussi, plutôt que de dresser devant vous des bilans énergétiques pour l'an 2000, c'est à ce retour au fond des choses que je voudrais vous inviter à l'occasion de cette conférence et du débat qui suivra.

I. De l'énergie à l'économie

Au gré des circonstances, les craintes de pénurie alternent, depuis quinze ans, avec les perspectives d'abondance.

En 1980, on craignait encore de manquer d'énergie et les experts se penchaient sur les perspectives lointaines d'épuisement des ressources.

L'énergie, aujourd'hui, on en a trop. Les prix s'effondrent, et l'on s'interroge sur la pertinence des propos alarmistes tenus précédemment: le progrès technique n'a-t-il pas permis, jusqu'ici, de surmonter toutes les pénuries? L'ingéniosité des hommes n'a-t-elle pas constamment engendré des procédés nouveaux qui ont élargi les limites des ressources, ou permis de relayer par une ressource nouvelle celle qui venait à s'épuiser? Alors, pénurie ou abondance?

Le fait est que le soleil déverse sur notre planète des débûges d'énergie: l'équivalent de quelque 10000 fois les besoins mondiaux d'aujourd'hui.

De même, sous nos pieds, la chaleur du magma terrestre représente une fabuleuse ressource. Là encore, de quoi couvrir des milliers de fois les besoins de l'humanité.

Avec Einstein, enfin, le monde de l'énergie a perdu ses frontières. Nous savons maintenant qu'il y a équivalence entre la matière et l'énergie, et donc transformation possible de l'une dans l'autre. Le soleil est la plus belle, et la plus précieuse illustration de cette transformation: chaque jour, cet énorme réacteur thermonucléaire transforme en énergie quelque 300 milliards de tonnes de matière.

Ainsi, ce monde matériel qui nous entoure, ce monde est énergie.

Peut-on en conclure que nous ne manquerons jamais de cette énergie dans laquelle nous baignons?

Le monde est énergie, mais l'énergie est rare

En pratique, l'histoire nous enseigne que si elle apparaît inépuisable, l'énergie n'est pas, pour autant, disponible. A l'aube des temps préhistoriques, les hommes se battaient déjà pour la conquête du feu, seule forme d'énergie dont nos grands ancêtres avaient acquis la maîtrise. Faire cuire les aliments pour mieux les digérer, se chauffer pour avoir moins froid, plus tard fondre le métal dont on ferait les flèches: il ne s'agissait là encore que d'énergie *thermique*—ou, plus exactement, de la transformation en chaleur de l'énergie chimique potentielle du bois.

Avec les premiers pas de la civilisation, apparaissent les besoins d'énergie *mécanique* pour irriguer (tirer l'eau du puits), pour cultiver (tirer la charrue), pour transporter (tirer les chariots), pour préparer les aliments (moudre le grain).

L'homme sut assez vite utiliser le mouvement de l'air et des cours d'eau pour faire tourner des roues, ou gonfler des voiles, utiliser la force animale pour tirer des charges. Mais ces ressources naturelles étaient déjà insuffisantes pour assouvir la soif d'énergie mécanique des sociétés les plus évoluées. Celles-ci durent recourir aux galériens sur la mer, aux esclaves sur la terre, pour mobiliser le précieux appoint mécanique de ces machines extraordinaires que sont les hommes, doués à la fois de la force musculaire et de la régulation électronique du système nerveux.

Sautons les siècles, pour noter simplement qu'avec le feu, et le bois, les hommes ne manquaient pas d'énergie thermique. C'est l'énergie mécanique qui ne cessait de leur faire défaut et limitait leur développement.

Le machine à vapeur va changer la face du monde en fournit, pour la première fois, le moyen de transformer l'énergie thermique—abondante—in cette précieuse énergie mécanique, si parcimonieusement disponible jusque-là. Mais, pour faire de la vapeur, le seul combustible de l'époque était le bois, qui restait par ailleurs le principal matériau de construction. D'où une gigantesque déforestation de nos pays occidentaux, qui aurait conduit à une catastrophe écologique si le charbon, puis l'acier, n'étaient venus prendre le relais.

Ainsi, de millénaires en millénaires, de siècles en siècles, l'humanité n'a-t-elle cessé de courir après de nouvelles sources d'énergie pour surmonter l'insuffisance chronique des ressources sur lesquelles avaient tablé les générations précédentes.

Pourquoi donc cette pénurie latente, pourquoi cette constante menace de manquer d'énergie dans un monde qui en regorge, dans un monde qui est lui-même énergie?

De l'énergie brute à l'énergie utile

Pourquoi? Parce que l'énergie brute dispensée par la nature n'est pas utilisable, en l'état, pour les besoins des hommes.

Pour capter l'énergie du vent, il faut une voile ou l'aile d'un moulin. Pour capter l'énergie des rivières, il faut une roue à aube ou une hélice. Pour brûler du charbon, du pétrole ou

du gaz, il faut d'abord le trouver et l'extraire, puis le transformer pour en tirer de la chaleur ou de la force motrice. Ainsi, entre l'énergie brute dont la nature est si généreuse, et l'énergie utile dont les hommes ont besoin, il faut intercaler des *convertisseurs*, des chaînes de convertisseurs, pour que cette énergie parvienne à l'utilisateur final

- au moment où il en a besoin
- là où elle est nécessaire
- et dans la forme thermique, mécanique, chimique, électrique... adaptée au service qu'il en attend.

Conversion dans l'espace par l'extraction et le transport, conversion dans le temps par le stockage, conversion dans la forme par des foyers ou des machines conçus pour produire chaleur et mouvement.

Mais, tout cela, c'est le fruit du travail des hommes! Dès lors, la réponse est claire et le paradoxe de la pénurie dans l'abondance s'explique très simplement. *L'énergie, en soi, ne manquera jamais. Le problème est économique: il est posé par les hommes, dont les forces et les moyens sont limités.*

Travail des hommes et travail de la nature

De ce point de vue, toutes les sources d'énergie ne sont pas équivalentes.

Plus une énergie est dense, et stockée à la source, plus elle est aisément utilisable ensuite.

Dans le cas des énergie fossiles, la nature a déjà fait les trois quarts du travail:

- de l'énergie solaire a été captée, il y a quelques millions d'années, sous forme végétale pour le charbon, sous forme animale pour le pétrole;
- les restes de ces végétaux, de ces animaux, se sont rassemblés dans des dépressions ou des vallées où ils se sont trouvés naturellement *collectés et stockés*;
- le stock s'est *concentré* sous la pression des couches géologiques pour se transformer, avec les siècles, en charbon ou en pétrole.

Ce charbon, ce pétrole, il ne reste plus qu'à aller les chercher. L'avantage est considérable, car la chaîne des équipements nécessaires à l'élaboration de l'énergie utile se trouve réduite d'autant.

A l'inverse, quand la nature n'a encore rien fait, la tâche est infiniment plus lourde.

Le rayonnement solaire, le vent, sont sans doute des énergies gratuites, mais diffuses et intermittentes. Ces énergies gratuites, il faut les capter, les concentrer et les stocker avant de pouvoir s'en servir.

Dans le cas de l'éolienne, l'hélice doit pouvoir capter des vents faibles pour éviter des arrêts trop prolongés; mais elle doit aussi être assez robuste pour résister à des bourrasques; et, sauf à en user pour pomper de l'eau dans un puits qui constitue par lui-même un réservoir de stockage, l'éolienne ne fournira jamais qu'une énergie d'appoint si on ne la couple pas à un accumulateur coûteux. Finalement, rapportés à l'énergie produite, le tonnage, de matériel et l'encombrement de l'espace apparaissent rapidement considérables sitôt qu'on veut, avec des éoliennes, disposer d'une production tant soit peu notable.

Le captage du rayonnement solaire par des panneaux ou des miroirs exige lui aussi de vastes espaces dès qu'on sort des utilisations très ponctuelles, et les dispositifs de concentration et de stockage dont on a alors besoin atteignent très vite des coûts prohibitifs.

Tout compte fait, ces énergies dites gratuites s'avèrent finalement coûteuses parce que le travail que la nature n'a pas fait, l'homme doit le faire à sa place.

A mi-chemin entre les stocks denses de combustibles fossiles, organisés par la nature, et les flux diffus et intermittents du rayonnement solaire ou du vent, on trouve des formes d'énergie semi-concentrées, telle l'énergie hydroélectrique. Là, l'énergie du soleil est captée par l'eau des océans qui s'évapore dans l'atmosphère. Elle est concentrée ensuite par le ruissellement des pluies au flanc des bassins versants de nos montagnes. Ainsi se forment des cours d'eau dont il devient possible d'exploiter la chute. Débit et hauteur de chute font de l'hydraulique une énergie d'une qualité naturelle très supérieure aux flux intermittents du soleil et du vent.

Cette énergie déjà élaborée est, elle aussi, gratuite. Mais il faut, pour la maîtriser, recourir à des barrages et des usines encore coûteux, suffisamment coûteux pour que le procédé consistant à aller chercher du charbon au fond des mines et à le transformer en courant électrique soit apparu compétitif.

Ce n'est donc pas sans raison que nous avons tous recours, dans nos différents pays, aux énergies fossiles et à l'hydro-électricité. Il s'agissait, tout simplement, de faire appel à des formes d'énergie pour lesquelles la nature avait déjà fait le plus gros du travail. La meilleure preuve, d'ailleurs, qu'on ait été bien inspiré d'y recourir, c'est la difficulté que les énergies dites gratuites rencontrent encore à conquérir une place significative dans les bilans énergétiques, malgré l'escalade des prix des combustibles concurrents.

Economiser l'énergie ?

Ainsi, à l'échelle des hommes, l'énergie brute est quasiment illimitée. Mais l'énergie utile, elle, ne l'est pas.

D'où l'intérêt de l'économiser.

Mais faut-il l'économiser à tout prix?

Pour illustrer mon propos, j'évoquerai le souvenir, outrageusement simplifié, que j'ai gardé d'un article paru il y a une dizaine d'années.

L'auteur, férus de ce qu'on appelle aujourd'hui l'analyse énergétique, rendait compte de travaux américains récents et s'inquiétait – peut-être même s'indignait – de ce que la consommation *totale* d'énergie nécessaire pour produire un quintal de maïs aux Etats-Unis avait augmenté en vingt-cinq ans de 25%: gasoil utilisé dans les tracteurs agricoles, mais aussi énergie nécessaire pour fabriquer les tracteurs et les engrains, énergie absorbée dans la construction des usines qui produisent tracteurs et engrains, etc... Le principe même de ce type d'analyse est de remonter le long de toutes les chaînes d'activité qui aboutissent au produit final, le maïs en l'occurrence pour établir un bilan consolidé des consommations cumulées, directes et indirectes, de cette ressource essentielle qu'est l'énergie.

Une consommation unitaire accrue de 25% en vingt-cinq ans! En prolongeant cette tendance dans l'avenir, et compte tenu de l'accroissement nécessaire de la production mondiale de maïs, on arrive rapidement à des chiffres vertigineux, qui donnent le frisson.

Or, au cours de cette même période où la consommation consolidée d'énergie par quintal de maïs augmentait de 25%, le rendement à l'hectare était plus que doublé et la productivité du travail avait sextuplé: autrement dit, si l'énergie nécessaire augmentait d'un quart, la surface de *terre arable* utilisée pour produire une tonne de maïs diminuait de moitié, et le nombre d'*hommes capables* mobilisés à cette fin était divisé par six.

Cela mérite quand même réflexion. Car de quoi le monde manque-t-il le plus? A l'échelle de la planète, où se pose le problème tragique du sous-développement, la principale rareté, celle qui justifie tous les efforts, c'est «l'homme

capable». C'est aussi (encore plus ou encore moins? je n'en discuterai pas) la terre arable. Comparée à ces raretés qu'on peut qualifier d'essentielles face à la galopade démographique qui menace l'humanité, le manque d'énergie est certainement moins inquiétant. Dès lors, consommer un peu plus d'énergie pour économiser beaucoup de terre arable et d'ouvriers qualifiés, c'est très certainement une excellente manière de retarder l'apocalypse, — en attendant que l'homme soit arrivé à maîtriser la principale et redoutable menace qui pèse sur lui, je veux parler de la multiplication incontrôlée de l'espèce.

Au surplus, parmi les raretés qui pèsent sur l'avenir du monde, il en est bien d'autres que l'ouvrier qualifié et la terre arable: les ressources minérales de la croûte terrestre sont nécessairement limitées, et le monde manquera de cuivre avant de manquer d'énergie; il manquera cruellement de phosphore aussi, avancent certains futurologues. Et, du point de vue de l'albedo terrestre, c'est-à-dire de la capacité de la terre à capter l'énergie solaire, les ravages du béton ne sont pas négligeables non plus, tant là où l'on construit que là où l'on extrait les ciments et graviers nécessaires.

Pour porter un jugement équilibré sur les activités humaines et la valeur des techniques que nous employons, il est donc tout à fait déraisonnable de se limiter à l'analyse énergétique: il faut aussi faire des bilans consolidés, en remontant toutes les chaînes amont, pour la main d'œuvre qualifiée, les terres arables, le cuivre, le phosphore, le béton et plus généralement, pour toutes les ressources peu ou pas reproductibles que nous mobilisons.

De l'analyse énergétique au prix de revient

Force est de reconnaître que cela devient très compliqué: il y a du cuivre dans le moteur du démarreur d'un tracteur, mais il y en a aussi dans les machines dont on s'est servi pour le fabriquer, dans les usines qui ont produit ces machines, etc. Que ce soit compliqué n'est pourtant pas une raison suffisante pour y renoncer; car, à ne considérer qu'une seule rareté, on en viendrait rapidement à négliger, donc à gaspiller tragiquement, les autres ressources rares.

Et, tous ces bilans faits, il faut encore pondérer les raretés les unes par rapport aux autres. Sinon comment choisir entre deux procédés dont l'un consomme plus d'une ressource rare et moins d'une autre, plus de terre arable et moins d'énergie?

Pondération de chacune des raretés primaires dans leur infinie diversité, bilan consolidé de tous les cheminements, imbriqués les uns dans les autres, jusqu'à remonter à chacune de ces ressources rares, cela paraît a priori tout à fait inextricable.

Et pourtant, il y a, pour ce faire, un vieux «truc» que l'on utilise depuis des siècles et qui ne marche pas si mal. Cela consiste à affecter à chaque ressource élémentaire un coefficient plus ou moins élevé suivant sa rareté... coefficient que l'on appelle un prix. En multipliant par ce coefficient-prix, la quantité de telle ressource rare que l'on mobilise, on obtient un coût; ces coûts se cumulent tout le long des processus de fabrication pour aboutir au prix de revient du produit final... *et la solution la meilleure, celle qui épargne au mieux les raretés élémentaires pondérées par leur importance relative, c'est celle qui coûte le moins cher!*

A-t-on bien conscience que le prix de revient d'un quintal de mais c'est, dans son essence, une somme de quantités de ressources rares — des hectares de terre arable, des joules d'énergie, des kilos de cuivre, des heures de travail spécialisé — pondérées par des prix qui caractérisent leur rareté relative? Tel est pourtant le B-A-BA de la science économique.

Il faudrait donc que la ressource énergétique soit la seule et unique ressource rare pour que l'analyse énergétique suffice à orienter les choix de l'humanité: gouvernés par une seule monnaie exprimée en unité énergétique normalisée, le joule, nous évaluerions les biens et services en terme d'énergie contenue; et l'on sacrifierait allègrement les hectares, les ressources minérales et la main d'œuvre qualifiée pour économiser à tout prix la seule et unique rareté de ce monde, l'énergie, promue au rang de divinité.

Au risque de choquer les physiciens, j'oserai donc affirmer que le bilan énergétique d'un usage de l'énergie n'a d'intérêt que dans la mesure où il influe sur son bilan économique. Peu importe que tel mode d'utilisation soit gourmand en énergie primaire — je pense au chauffage électrique — si, globalement, il mobilise moins de ressources rares.

Ainsi une économie d'énergie n'est-elle une réelle économie pour l'humanité que si elle est rentable.

En un mot, le franc prime le joule.

Que cette promenade au fond des choses nous ramène finalement à la notion familière de prix de revient est, somme toute, assez rassurant. Mais je ne crois pas que nous puissions en rester là.

Continuons donc à vagabonder au fil des idées, sans aucun souci d'exhaustivité.

II. De l'écologie à l'électricité

Le franc prime le joule. Soit. Mais les prix qui règnent dans nos économies traduisent-ils correctement, et durablement, tous les aspects des raretés dont la menace pèse sur l'humanité?

Il est vrai que les aléas du fonctionnement des marchés peuvent altérer la fixation des prix, et fausser par là même l'appréciation des raretés relatives que ces prix ont pour objet de traduire.

Il est vrai aussi que les prix d'aujourd'hui peuvent différer de ceux de demain, alors que nos décisions doivent s'inscrire dans la durée.

Mais ce ne sont là que des problèmes techniques de calcul économique, qui ne mettent pas en cause le principe de l'analyse.

Plus grave est l'objection selon laquelle les prix ne concernent que la sphère marchande de l'économie, et ignorent les raretés non marchandes.

L'eau propre, l'air pur, le beau paysage ont aussi une valeur que le jeu des marchés traduit de façon très imparfaite.

Sans parler des risques pour les vies humaines, que les contrats d'assurance ne suffisent pas à cerner.

Ainsi, le calcul économique ne traite-t-il que de la sphère marchande. Ses résultats doivent être complétés par une analyse spécifique des phénomènes non marchands — en l'occurrence des pollutions et des risques.

L'exemple du gaz carbonique

A cet égard, les combustibles fossiles méritent une attention particulière.

La combustion du charbon ou du pétrole produit des oxydes de soufre et des oxydes d'azote dont la concentration a cessé d'être locale pour prendre une portée continentale. Divers procédés permettent de réduire cette pollution. Mais ces procédés sont coûteux, et imparfaits. Une saine comparaison entre les formes d'énergie exige que l'on tienne compte de ce coût et de cette imperfection.

Mais, au-delà de ces pollutions qui sont à nos portes, et dont on se préoccupe d'ores et déjà à juste raison, on oublie trop souvent que la combustion du carbone produit inéluctablement du gaz carbonique, et en quantités telles qu'il paraît difficile d'y remédier.

Or, les quantités de gaz carbonique que dégage l'industrie des hommes ont atteint un tel niveau que les capacités d'absorption des forêts et des océans sont aujourd'hui dépassées: une couche de plus en plus épaisse de gaz carbonique s'établit dans la haute atmosphère et entoure notre globe de son manteau. C'est là un fait.

De ce fait incontestable, certains météorologues – pas tous, il est vrai – déduisent que l'atmosphère terrestre risque de se réchauffer dangereusement. Dans un siècle environ, la température du globe s'étant élevée de quelque 3 degrés, ce qui implique 7 à 8° aux pôles, les glaces polaires vont fondre. Que les banquises du pôle Nord s'affondrent n'aura aucune incidence sur le niveau des mers, en vertu du principe d'Archimède; car il s'agit de glaces flottant sur l'eau. Mais les banquises du pôle Sud, elles, recouvrent un continent, et leur fusion va relever le niveau des mers. Quarante à soixante mètres dit-on... A ce régime, Paris deviendra une cité lacustre dont émergera seulement la basilique de Montmartre et le sommet de l'Arc de Triomphe!

Le pire n'est pas sûr, et ce n'est là qu'une théorie parmi d'autres. Mais le seul fait que cette perspective ne soit pas invraisemblable devrait nous plonger dans un abîme de réflexions. Enfouir des déchets nucléaires dans des formations granitiques n'est certes pas anodin non plus. Mais les risques, tout compte fait, apparaissent bien moindres et beaucoup plus lointains...

Energies douces, énergies dures

Mieux vaut alors, dira-t-on, s'en tenir aux énergies douces, aux éoliennes par exemple. Mais a-t-on conscience des ordres de grandeur ? L'équivalent d'une centrale nucléaire en Bretagne, c'est une forêt d'éoliennes de quelque cinquante mètres de haut, placées en chaque noeud d'un quadrillage d'un km de côté. Que deviendrait le paysage? Sans parler du charivari...

L'exploitation systématique du rayonnement solaire ne se présente pas mieux à cet égard. Je ne vise pas ici ce que certains appellent les «applications passives» du soleil, et dont l'architecture solaire donne une illustration convaincante: mieux vaut, en effet, construire dans le Nord des maisons ouvertes vers le Sud; et dans le Sud, des maisons ouvertes vers le Nord – ou, du moins, abritées du soleil.

Mais sitôt qu'il s'agit d'applications massives, pour remplacer les mines de charbon et les centrales électriques, les espaces nécessaires s'avèrent gigantesques, sans parler des effets inéluctables sur le climat.

Ce qui ne veut pas dire que le marché des applications de l'énergie solaire ne soit pas appelé à se développer peu à peu. Mais, dans l'état actuel des techniques, il ne peut s'agir encore que d'applications marginales. Sans quoi, et avant même de parler de coût, l'occupation de l'espace deviendrait prohibitive.

Il faut se faire une raison, aucune solution n'est parfaite et les énergies dites douces, sitôt qu'on sort des applications particulières, traînent aussi avec elles leur lot de pollutions.

Les risques

Il en va de même pour les risques.

On sait ce qu'il en est pour le charbon, avec les catastrophes qui jalonnent de temps à autre l'exploitation des mines profondes. Et, même sans catastrophes, la silicose a conduit à une mort lente des légions de mineurs.

Les usines hydro-électriques aussi sont des pourvoyeuses de mort. Il y a malheureusement peu d'années où l'effondrement d'un barrage, ou d'un flanc montagneux qui le surplombe, n'ait, à travers le monde, engendré quelque catastrophe.

Les énergies douces échappent-elles à cette fatalité? On est tenté de le penser au premier abord, encore qu'on imagine difficilement les conséquences qu'aurait la généralisation de leur emploi: effondrement d'éoliennes, brûlures et cécité dans les champs de miroirs solaires, etc.

Mais un expert canadien a fait remarquer, il y a quelques années, que la comparaison, pour être équitable, devait tenir compte des morts suscitées par la construction des ouvrages.

Il n'y a pas d'activité sans risque et l'on sait malheureusement, par la statistique, le nombre de morts par tonne de béton coulé, par tonne de métal fondu, par tonne d'acier dressé... Or, l'équivalent d'une tonne de centrale nucléaire, c'est seize tonnes de centrale solaire et cinquante deux tonnes d'éoliennes, nous dit cet expert. Ce seul effet de poids suffit à amener les énergies douces – toujours dans l'hypothèse d'un emploi massif – dans le lot des énergies classiques, quant aux risques qu'elles présentent.

Ces chiffres, bien sûr, ont été contestés. Mais qu'il s'agisse de 52 tonnes, de 40 ou de 80 ne change rien à l'intérêt de ce type d'analyse.

A vrai dire, les défenseurs des énergies douces n'ont pas manqué de faire valoir que l'idée d'y faire un recours massif était un contre-sens. Ce que j'admets bien volontiers. Mais c'est dire aussi que les formes d'énergie «dures» restent indispensables pour les applications massives, qu'il s'agisse d'industrie ou d'agglomérations urbaines.

Alors, qu'en est-il de la plus dure des énergies dont on n'a encore rien dit: l'énergie nucléaire?

L'énergie nucléaire

Celle-ci pose bien des problèmes qui sortent de mon sujet. Mais sous l'angle qu'on vient d'évoquer, force est de constater que cette énergie nucléaire, c'est quand-même la moins encombrante, la moins polluante et la moins meurtrière des énergies.

La moins encombrante? Une centrale de quatre tranches de 1 300 MW comme celle de Paluel, sur la côte normande, nichée dans un creux de falaise, équivaut à la totalité des houillères de Lorraine...

La moins polluante ? Elle ne dégage ni gaz carbonique, ni oxydes de soufre. Ses rejets liquides sont certes légèrement radioactifs, mais infiniment moins que l'eau de Vichy.

La moins meurtrière? L'industrie nucléaire civile pouvait se vanter, l'année dernière encore, d'être la seule industrie arrivée à maturité qui n'avait encore tué personne. Après Tchernobyl, elle peut seulement se targuer d'être la moins meurtrière.

Osera-t-on ajouter qu'elle est, en outre, la moins chère pour produire en masse de l'électricité? Il reste que pour être bon marché, l'énergie nucléaire doit être produite dans d'énormes centrales. Et si la centrale est énorme, il faut redistribuer sur une vaste zone l'énergie qu'elle produit, et donc livrer celle-ci sous une forme qui soit aisément transportable.

Sous forme mécanique, l'énergie se transmet par des courroies, dont le rayon d'action est de quelques mètres. Trop court pour disperser l'énergie d'une centrale.

L'énergie thermique se transporte par des tuyaux de vapeur, dont le rayon d'action économique est de quelques kilomètres. Trop court encore pour tout distribuer.

Mais l'énergie électrique, elle, se transporte par des lignes électriques dont le rayon d'action se compte en centaines de kilomètres, et qui peuvent donc recouvrir une zone de consommation suffisante pour tout absorber.

C'est pourquoi l'énergie nucléaire passe par l'électricité.

Cela n'exclut en aucune manière que des réseaux de chaleur puissent émaner d'une centrale nucléaire. Mais il faudra toujours, pour assurer la rentabilité de ces centrales grâce à une taille suffisante, convertir une part importante de leur production en énergie électrique.

La malédiction de Carnot et la malédiction de la flamme

Cette obligation de passer par l'électricité limite la place du nucléaire, dans la mesure où les applications de l'électricité ne sauraient prétendre couvrir tous les besoins énergétiques d'une société.

Mais force est de constater que la part de l'électricité ne cesse de croître dans les bilans énergétiques de nos pays. Il y a à cela quelques raisons fondamentales.

Le pétrole a chassé le charbon, dans les années soixante, parce que le charbon est un solide alors que le pétrole se présente sous la forme beaucoup plus maniable d'un liquide. Et le gaz naturel, malgré le coût plus élevé de son transport, a pu voir ses usages se développer parallèlement parce que, rendu chez l'usager, un gaz est plus maniable qu'un liquide.

Mais le flux d'électrons qui constitue le courant électrique est, lui, encore plus maniable qu'un gaz, du fait de ses multiples propriétés.

Il est frappant, à cet égard, de constater que les applications de l'électricité se substituent de plus en plus souvent à des usages thermiques des combustibles fossiles.

Certes la production de l'électricité souffre de la malédiction de Carnot, qui veut que les deux tiers de la chaleur produite dans la chaudière doivent se perdre dans la nature. Mais une autre malédiction pèse sur les combustibles fossiles, c'est celle de la flamme, dont la plage de température est large mais limitée, et qui ne peut opérer que par l'extérieur. Le fait est que d'années en années, l'électron gagne sur la flamme.

D'abord parce que le recours à l'électricité permet parfois de remplacer un usage thermique des combustibles par un emploi non thermique de l'énergie électrique. Le cas le plus typique est celui du dessalement de l'eau de mer, où la solution électrique consiste à pousser l'eau salée, avec une pompe, à travers une membrane qui opère par osmose. Le rendement énergétique est considérablement amélioré.

Mais il faut, le plus souvent, passer aussi par la voie thermique quand on opte pour l'électricité. Cela n'implique pas nécessairement que le rendement de l'opération soit désastreux. La fusion des billes d'acier par induction est, à cet égard, tout à fait convaincante: au lieu de chauffer les billes par l'extérieur, avec les pertes que cela implique, le courant induit par un champ électrique chauffe la bille à cœur avec un rendement proche de 100%.

Reste le cas où, s'agissant de produire seulement de la chaleur, le chauffage électrique remplace le chauffage classique. Là Carnot pèse de tout son poids. Mais c'est généralement du côté des coûts d'investissement que la solution électrique trouve alors son avantage.

Une typologie sommaire des emplois de l'électricité

Ainsi apparaît pour les emplois de l'électricité une sorte de dialectique entre le rendement énergétique et le poids de l'investissement. Pour esquisser une typologie sommaire, on peut distinguer quatre catégories de cas:

1) Le rendement est excellent, et l'investissement peu coûteux:

Il y a longtemps que l'électricité s'est imposée.

2) Le rendement est excellent, mais l'investissement coûteux:

Là, le besoin croissant d'automatiser, la nécessité de plus en plus pressante d'obtenir des produits de qualité parfaitement définie d'une part, l'abaissement des prix relatifs de l'électricité d'autre part, ouvrent à l'énergie électrique de vastes horizons sans que les thermodynamiciens n'aient rien à y redire.

3) Le rendement est médiocre, mais l'équipement est peu coûteux:

C'est le cas de la chaudière électrique, celui aussi du chauffage électrique des bâtiments. Dans ce cas, les thermodynamiciens ont des états d'âme, mais les économistes sont satisfaits; et ils ont raison de l'être dès lors que cet usage de l'électricité est rentable, marié ou non avec des modes de chauffage classique dans les périodes de l'année où l'électricité est chère.

4) Le rendement est médiocre, et l'investissement coûteux: Cette fois, il ne viendrait à l'esprit d'aucune personne sensée de recourir à l'électricité tant que le progrès des techniques n'aura pas permis d'améliorer les rendements ou de diminuer le coût des équipements.

Le fait marquant des années que nous vivons, c'est l'ouverture à l'énergie électrique d'une partie de marchés rapidement croissante dans les 2^e et 3^e catégories ci-dessus.

Nos industries vont vers l'usine automatisée, le robot, où l'électricité est irremplaçable. Nos économies exigent de plus en plus des produits de qualité rigoureusement définie, ce pour quoi le flux d'électrons est incomparablement plus maniable que la flamme: le «zéro défaut» requiert l'électricité.

Mais ce qui marquera plus encore les approches du prochain siècle, c'est le développement de l'informatique et celui des biotechnologies:

- le développement de l'informatique avec ses grappes de «puces» venant relayer le cerveau humain;
- le développement des biotechnologies, avec leurs armées de bactéries appelées à réaliser, au niveau de l'infiniment petit, des opérations chimiques subtiles que les hommes ne savaient réaliser que de façon massive et grossière, avec leurs grosses pattes et leurs énormes marmites.

Là, le flux d'électrons du courant électrique, avec ses nombreuses propriétés et les facilités de sa modulation, apparaît comme la forme d'énergie de demain. Que conclure, au terme de ce vagabondage au fond des choses?

Le monde regorge d'énergie, mais l'énergie utile requiert le travail des hommes et c'est pourquoi elle ne peut échapper aux servitudes du prix de revient.

Les risques et les pollutions ne sauraient cependant être ignorés. A cet égard, l'énergie nucléaire a quelques mérites. Celle-ci passe inéluctablement par l'électricité, qui ne peut, certes, couvrir tous les besoins d'énergie. Mais, dans le monde qui s'ouvre à nous pour la fin de ce siècle, l'électricité est appelée à satisfaire des applications de plus en plus fines – applications que symbolise l'électron, comme la puce symbolise l'informatique, et la bactérie les biotechnologies.

Les bactéries, les puces et l'électron... Ce pourrait être le titre d'une fable de La Fontaine qui évoquerait le monde de demain!

Adresse de l'auteur: *Marcel Boiteux*, président de la Conférence mondiale de l'énergie et président du Conseil d'administration d'Electricité de France, 32, rue de Monceau, F-75008 Paris.

Conférence lors de l'Assemblée générale du Comité national suisse de la Conférence mondiale de l'énergie du 4 mars 1987 à Zurich.