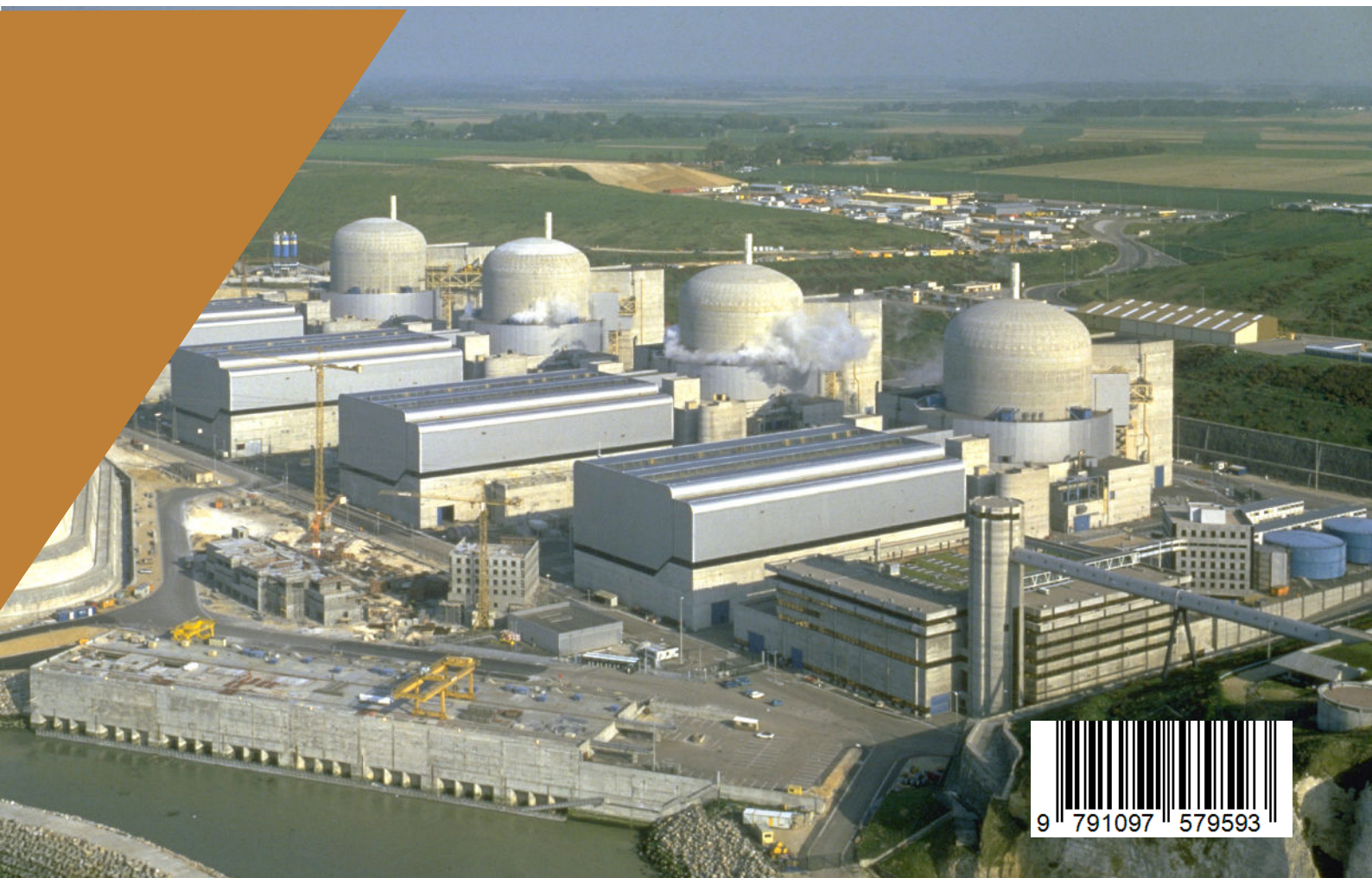


ÉNERGIE : SAURONS-NOUS RETROUVER LE CHEMIN ?

*Communication à l'Académie
de Gilbert Ruelle*





ÉNERGIE : SAURONS-NOUS RETROUVER LE CHEMIN ?

Communication à l'académie des technologies



*À tous nos amis écologistes qui restent encore un peu
antinucléaires tout en souhaitant en savoir un peu plus !*

Gilbert Ruelle



Gilbert Ruelle, ancien dirigeant de la branche énergétique d'Alstom où il a notamment créé et développé les technologies des alternateurs des centrales nucléaires toujours utilisées actuellement (technologies associées à celle des turbines Arabelle) est académicien fondateur de l'académie des technologies et son actuel doyen. Il a animé sa commission énergie et changement climatique de 2000 à 2008.

Gilbert Ruelle est l'auteur de *Questions durables* (Essai) aux éditions Baudelaire, 2015.

Il a fait parvenir à notre académie la présente communication sur l'histoire de l'énergie et son devenir pour notre société. Il y développe et argumente l'intérêt très actuel du nucléaire civil, alors que le changement climatique fait peser une menace sérieuse sur nos sociétés qui ont du mal à réduire leur empreinte de gaz à effet de serre.

SOMMAIRE

HEURS ET MALHEURS DU NUCLÉAIRE EN FRANCE	7
L'ACCUEIL DES NOUVELLES TECHNOLOGIES PAR LE PUBLIC	11
COMMENT LE CONCEPT ET LES SOURCES D'ÉNERGIE ONT-ILS ÉVOLUÉ DANS L'HISTOIRE ?	15
L'Univers fonctionne avec trois interactions (ou liaisons, ou forces) fondamentales	27
Performances et attraits de la production électronucléaire	29
SUR LES DISCORDANCES DANS L'UNION EUROPÉENNE : LES TAXONOMIES	33
Proposition de critères	34
HÉRITAGE ET MARQUES DE FAMILLE DES TROIS GRANDES INTERACTIONS	35
CONCLUSION : POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ	41

HEURS ET MALHEURS DU NUCLÉAIRE EN FRANCE

Constatant l'épuisement proche de ses maigres ressources en charbon et gaz naturel et l'absence de sites hydroélectriques encore exploitables, un chemin de lucidité fut tracé dans les décennies 1960 et 1970 pour assurer l'avenir d'une France sans pétrole. Ce chemin d'indépendance fut celui du nucléaire, seul compatible avec le constat. En trente ans, l'effort commun de l'État stratège, d'EDF et de l'Industrie dota la France d'un enviable parc électrique à 70 % nucléaire, et avec l'hydraulique existant, à près de 90 % sans CO₂. La dérive climatique a été confirmée par le Giec, et l'accord de Paris visant à limiter le réchauffement à 2°C en 2100 par rapport à l'époque préindustrielle a condamné les combustibles fossiles. Le choix du nucléaire fut aussi celui de la plupart des pays industrialisés, même de ceux encore riches en ressources fossiles : États-Unis, Russie, Chine, Japon, Corée, et même certains pays pétroliers.

Il ne faut toutefois pas croire à un soutien général du nucléaire, le souvenir des deux bombes atomiques qui marquèrent la fin de la guerre mondiale en 1945 étant encore très présent. Certains opposants évoquaient le risque d'explosion d'un réacteur hors contrôle, ou pour le moins des fuites radioactives affectant la population. Pour d'autres, la radioactivité des déchets serait un éternel risque pour les habitants de la région. Dans l'Allemagne d'après-guerre, une écologie inspirée du philosophe allemand Hans Jonas magnifiant la nature et insistant sur le respect que lui doivent les surpuissantes sciences et technologies de l'homme marqua lourdement la politique antinucléaire de l'Allemagne et affaiblit la cohérence de l'Union européenne.

7

En 2011, le tsunami de Fukushima (20 000 morts noyés ou tués par le séisme-tsunami) réveilla, malgré l'absence de décès ou conséquences sanitaires d'origine nucléaire, le souvenir de Tchernobyl (1986). L'accident de Tchernobyl est intervenu en phase de mise à l'arrêt du réacteur pendant une exploration de ses limites de stabilité après neutralisation volontaire des protections qui auraient interdit cette opération.

En Europe, certains pouvoirs politiques devinrent méfiants vis-à-vis du nucléaire, les écologistes affirmant à un public déjà spontanément favorable aux énergies

« naturelles » du vent et du soleil que celles-ci pourraient assurer le même service que le nucléaire, bien qu'elles soient intermittentes et non pilotables. Ils profitèrent du drame de Fukushima pour faire renoncer l'Allemagne au nucléaire et, en France, le réduire d'un tiers par une loi de 2015. De 1997 (arrêt anticipé du réacteur de Creys-Malville) à 2020 (arrêt anticipé des deux réacteurs de Fessenheim), le nucléaire devint politiquement incorrect. Dans cette période de plus de vingt ans, le développement de la fission nucléaire à neutrons rapides RNR, suite pourtant logique de la filière REP actuelle a été également suspendu. Et, pourtant, cette filière pourrait assurer à la France une indépendance énergétique de l'ordre du millénaire en exploitant son stock de combustibles usés. Ainsi la France a renoncé au bénéfice d'une situation énergétique unique, car étant le contraire inverse de la précarité des années 1960/1970.

Une Commission parlementaire pluripartisane¹ a dressé en 2023 « les raisons de la perte de souveraineté et d'indépendance énergétique de la France » en soulignant « trois décennies de divagation énergétique ».

Pendant ces décennies de nucléaire « dit honteux », l'autorité de l'Agence internationale pour l'énergie atomique s'affirma et contribua à sélectionner les technologies de réacteurs les plus sûres, dont tous ceux du parc français de réacteurs à eau pressurisée REP qui restèrent en service dans le cadre d'un grand carénage visant une prolongation de leur durée d'exploitation à 70 ans. Comparée sur le long terme aux autres moyens de production électrique, la production de la filière nucléaire s'est révélée avoir eu mondialement le plus faible impact sur la santé publique. Qui le sait ?...

8

Pour l'homme de la rue, « Fukushima » reste le nom d'un accident nucléaire majeur, ce qu'il n'est pas, avant d'être celui d'un séisme et d'un violent tsunami responsable de 20 000 morts. Les statistiques d'exploitation du nucléaire sont rassurantes et ses avantages climatiques sont évidents ; mais les atermoiements politiques maintiennent une image brouillée de méfiance du nucléaire. Après même sa réélection en 2022, le président de la République a affirmé sa confiance dans l'énergie nucléaire², mais la dissolution de l'Assemblée nationale bouleversant le paysage politique de la France l'été 2024 maintient une certaine confusion sur la politique énergétique. Cela mé-

1 Rapport, n° 1028 - 16e législature — Assemblée nationale au nom de la « commission visant à établir les raisons de la perte de souveraineté et d'indépendance énergétique de la France ».

2 Discours de Belfort prononcé le 10 février 2022.

rite un réexamen global de la question de l'énergie permettant au public de juger plus objectivement la validité de cette doxa antinucléaire qui a paralysé la politique énergétique de la France pendant les deux premières décennies du ^{xxi}e siècle.

Si nous voulons cesser de perdre du temps dans la lutte contre la dérive climatique qui fait courir à l'humanité un ensemble de risques mondiaux beaucoup plus graves que celui de tout accident hypothétique de centrale nucléaire, il est urgent de cesser le bégaiement politique et de reprendre clairement, sans hésitation et avec la même ampleur, un chemin de lucidité. Il est le seul rationnel au regard de la science, de l'économie, de la santé publique et de l'indépendance énergétique à long terme de la France, et en même temps le meilleur vaccin contre cette dérive climatique sans nécessité de décroissance.

Pourquoi ces bégaiements politiques devant le développement d'une source d'énergie dont la France a plus d'un demi-siècle d'expérience satisfaisante ?

L'ACCUEIL DES NOUVELLES TECHNOLOGIES PAR LE PUBLIC

Toute avancée technologique inspire de l'enthousiasme chez les uns et suscite de la crainte chez d'autres. Déjà, lors de l'invention de la machine à vapeur, on vit à l'Assemblée nationale le député et académicien François Arago exprimer ses craintes en prophétisant le pire avenir aux chemins de fer, explosions des chaudières à vapeur des locomotives, et autres catastrophes. Un progrès chassant l'autre, cette peur disparut avec le remplacement de la vapeur par l'électrification des locomotives. Un autre exemple de plus grande ampleur et de plus forte similitude avec celui du nucléaire français, fut aux USA la grande peur du courant alternatif aux États-Unis³. En fin de XIX^e siècle, le courant continu était la forme naturelle sous laquelle l'électricité avait commencé son développement après l'apparition de la pile de Volta, de l'électrolyse et des batteries chimiques. La production de courant électrique continu était assurée par des petites dynamos fonctionnant en parallèle, assistées par des batteries de secours. Thomas Edison, fondateur de General Electric, fit fortune avec le courant continu en remplaçant l'éclairage au gaz des villes américaines par un éclairage électrique utilisant ses génératrices à courant continu alimentant ses lampes à filament de carbone vendues aux municipalités pour améliorer l'éclairage urbain.

Nicolas Tesla, jeune ingénieur croate immigré aux États-Unis, d'abord embauché par Edison, entra rapidement en conflit d'idées avec ce dernier et quitta General Electric pour développer ses propres idées chez son concurrent Westinghouse, car il entrevoyait un bien plus vaste marché de l'électricité sous forme de courant alternatif qui permet le transport de l'énergie électrique à longue distance en augmentant la tension⁴, par un nouvel appareil nommé transformateur qui permet de transférer

3 Nikola Tesla (trad. de l'anglais), *Mes inventions* [« *My Inventions: The Autobiography of Nikola Tesla* »], Paris, Un infini cercle bleu, 2007 (1^{re} éd. 1919), 121 p. (ISBN 978-2-35405-000-9).

Jonnes, Jill (2003). *Empires of Light: Edison, Tesla, Westinghouse, and the Race to Electrify the World*. New York: Random House. ISBN 978-0-37550-739-7.

4 On reparle aujourd'hui du transport de l'électricité sous forme de courant continu, car on sait convertir le courant alternatif en courant continu et réciproquement, ce qui autorise des lignes à courant continu haute tension. Cela était impensable à la fin du XIX^e siècle.

massivement de l'énergie électrique du circuit primaire au circuit secondaire de tension différente. Les circuits restent électriquement isolés l'un de l'autre, le transfert de puissance empruntant la voie immatérielle de la variation périodique du champ magnétique créé par le courant du circuit primaire. Le recours au courant alternatif permet d'électrifier un pays comme les USA ou un continent comme l'Europe par un système de trois réseaux superposés : — réseau 1 « artériel » à haute tension et haut débit, transportant massivement l'énergie produite par les centrales électriques vers quelques zones de consommation principale où les — réseaux 2 à moyenne tension transfèrent régionalement l'énergie sur de nombreux — réseaux 3 à basse tension jusqu'aux plus petits consommateurs.

Thomas Edison sentit venir la concurrence de son très profitable marché de séries de petites dynamos locales alimentant en continu-basse tension les services électriques locaux et les éclairages publics, au profit de grandes centrales en courant alternatif alimentant ces réseaux. Il entreprit une campagne de dénigrement du courant alternatif, propageant des informations erronées sur de nombreux accidents mortels impliquant le courant alternatif à haute tension. Il envoya ses techniciens parcourir les foires où ils électrocutaient en public des animaux, chiens, chats vagabonds, bétail, chevaux de réforme. Il lança un nouveau mot « whestinghoused » pour signifier « exécuté par électrocution » cherchant ainsi à discréditer son concurrent Westinghouse où œuvrait maintenant son adversaire Nicolas Tesla. Il exerçait en parallèle des pressions politiques sur différents États américains pour qu'ils interdisent l'usage du courant alternatif. Le sommet de sa campagne d'affolement du public fut l'exécution de l'éléphant Topsy, du cirque de Coney Island, qui venait de tuer trois spectateurs. Edison fut donc l'inventeur de la chaise électrique, dont la première fut construite par Harold Brown payé en sous-main par Edison qui se déclarait opposé à la peine capitale.

12

Le coup de grâce au courant continu⁵ fut asséné en 1893 par la commande à Westinghouse de la première centrale hydraulique des chutes du Niagara, équipée d'alternateurs étudiés par Tesla en alternatif triphasé à 25 Hz, et le transport aérien en haute tension vers la capitale de l'État, Buffalo. Le courant alternatif est maintenant mondialisé, en deux fréquences standard : 50 Hz et 60 Hz.

5 Le courant continu réapparaîtra pour des transports à très longue distance sous très haute tension (exemple 1 MV entre la centrale hydro-électrique de Cahora-Bassa au Mozambique et l'Afrique du Sud, ou pour des transports souterrains en zone urbaine).

Le courant alternatif, à ses débuts, était accusé du risque d'électrocution attaché aux tensions élevées pratiquées pour le transport de l'électricité à longue et moyenne distances. Un siècle d'utilisation a démontré la parfaite maîtrise de ce risque. Le nucléaire, lui, est soupçonné de présenter le risque d'exposer le public à des doses excessives de radioactivité en cas d'accident en service ou lors du traitement des déchets ; cependant l'exploitation des réacteurs nucléaires civils n'a pas conduit à des expositions significatives du personnel d'exploitation ou des populations. À l'exception de l'accident très particulier de Tchernobyl, le seul accident significatif d'origine nucléaire (Three Miles Island TMI – USA en 1979, avec fusion locale dans le cœur du réacteur⁶) n'a entraîné qu'une augmentation très limitée des rejets dans l'environnement sans aucune conséquence sur la santé publique.

6 Fukushima 1 et 2 ont aussi vu leur cœur fondre, mais l'origine de cet accident n'est pas interne comme à TMI.

III

COMMENT LE CONCEPT ET LES SOURCES D'ÉNERGIE ONT-ILS ÉVOLUÉ DANS L'HISTOIRE ?

Avoir de l'énergie signifie avoir une vitalité et une ténacité permettant d'entreprendre et de réaliser des projets. C'est donc une qualité physique et mentale qui a été un moteur de développement au cours de l'histoire des hommes ; ceux-ci ne disposaient au départ que de leur cerveau et de la faible énergie fournie par la centaine de watts de leurs muscles. La science, avec son langage précis et quantitatif, a établi depuis une définition de l'énergie dans le cadre de la « mécanique rationnelle » qui est synonyme de travail, rappelé dans l'encart : $E = M.L^2.T^{-2}$ qui relie en analyse dimensionnelle le concept d'énergie E à trois autres concepts familiers d'espace (L), de temps (T) et de masse (M).

Il est courant de lire que l'énergie a été le sang du développement. Ce qui est vrai, mais à deux vitesses de développement : 1 — Une extrême lenteur pendant l'histoire ancienne séparant la domestication du feu de l'invention de la machine à vapeur. 2 — Une foudroyante accélération depuis les xix et xxe siècles.

HISTOIRE ANCIENNE DE L'ÉNERGIE

Quelques centaines de milliers d'années avant *Homo sapiens*, *Homo habilis* avait déjà fait connaissance avec certaines forces de la nature sans que son cerveau eût à se préoccuper d'en appréhender les concepts. Pendant les orages, il contemplait les éclairs et les incendies de forêt. Il cherchait comment allumer de petits feux pour se chauffer l'hiver et se protéger des animaux. Il avait quelques pistes plus ou moins efficaces, frotter longuement l'un contre l'autre deux bouts de bois très secs et cogner ensemble des blocs de silex pour y faire jaillir des étincelles sur le bois chaud et sec.

Il se sentait le maître de ses propres forces lorsqu'il bandait son arc ou cassait du bois sec pour allumer du feu.

En revanche, il ne s'était jamais senti maître de cette étrange force externe à son corps, qui le tirait toujours vers le bas, force dans laquelle il avait l'impression de baigner, qui semblait appartenir à la nature ambiante en l'ayant toujours tiré vers le bas sans qu'il le veuille. Enfant, il tombait souvent en courant après les lapins ; adulte, il trouvait plus fatigant de grimper aux arbres que d'en descendre. Ce n'est que lorsqu'il se baignait lui-même dans la rivière qu'il se plaisait à se sentir, avant Archimède, plus léger. Il avait fini par s'y habituer et donner un nom à cette force naturelle qu'il appela son « poids », sans avoir besoin de savoir que ce ressenti était l'expression de l'attraction gravitationnelle, la première des trois forces fondamentales de la nature qui fut identifiée longtemps avant de la comprendre, car la seule qui soit directement perceptible par nos sens, sous forme d'une force mécanique attirant entre eux tous les corps dotés d'une masse. Il n'avait rien trouvé d'utile à faire de cette force sur laquelle il lui semblait n'avoir aucune action possible. Il lui faudra attendre quelques centaines de millénaires pour comprendre comment les pommes mûres tombaient avec Newton, inventer l'horloge à poids disant coucou chaque heure, la roue à godets, ancêtre des moulins puis des énergies renouvelables.

En évolution vers le stade *Homo sapiens*, son cerveau commençait à rêver de travaux plus importants pour sa survie, exigeant plus d'énergie. Alors démarra la course à l'énergie... L'homme s'organisa en tribus en rassemblant les occupants de quelques habitats voisins pour augmenter sa puissance collective, la portant à quelques kilowatts lui permettant de chasser un plus gros gibier. Lorsque la tribu s'aventurait trop loin, il lui arrivait de se confronter à d'autres tribus, de se battre et de faire des prisonniers qu'elle gardait à son service, accroissant son pouvoir. C'est sans doute ainsi que fut inventé l'esclavage, qui a été, pour une part des tribus du monde, un début de développement témoignant de la difficulté intellectuelle initiale à imaginer la domestication d'autres sources d'énergie que celle de nos propres muscles et de ceux de nos semblables.

Beaucoup plus tard, mais identifiant toujours l'idée d'énergie mécanique à celle de muscles, l'homme a su convaincre quelques grands animaux de lui louer quelques dizaines de kilowatts de leur puissance pour transporter des charges, abattre des arbres, labourer. L'homme devint agriculteur. Tout au long des quelques milliers de siècles allant d'*Homo habilis* jusqu'à l'invention de la machine à vapeur, la consommation d'énergie mécanique, qui est une assez bonne image du rythme de déve-

loppement de la société est restée très faible, car la presque⁷ totalité des sources d'énergie utilisées par l'homme fut l'énergie musculaire des êtres vivants munis de mains, de bras, de pieds, de jambes d'hommes ou de pattes d'animaux domestiqués.

L'énergie de la gravitation ou du vent fut mobilisée dans des moulins. Mais c'est le cheval qui fut pendant les cinq derniers millénaires le plus remarquable exemple de connivence entre homme et animal pour l'agriculture, les transports et la guerre. Il reste des statues équestres ornant nos villes, et une unité de puissance, le modeste cheval-vapeur ch (1 ch=0,735 kilowatt) qui ne sert plus guère qu'à définir la puissance fiscale de nos voitures, et à rappeler que c'est bien la vapeur qui a remplacé le cheval en mettant fin à l'histoire ancienne de l'énergie par l'invention de cette « machine à vapeur » qui va multiplier par 10, 100, 1000... l'énergie disponible pour l'homme et lancer la première révolution industrielle.

Voilà résumés 500 000 ans d'histoire ancienne de l'énergie, dont le point de départ fut la domestication du feu chauffant, cuisant et éclairant par *Homo habilis*, et le point d'arrivée fut la domestication du feu travaillant par Carnot et Watt. Créer de la chaleur était facile, il suffisait de brûler une matière combustible, créer le travail est plus difficile et s'est fait attendre.

HISTOIRE MODERNE DE L'ÉNERGIE

L'histoire moderne de l'énergie s'ouvre vers 1820, par un bond dans l'ordre de grandeur de l'énergie mécanique mise à disposition de l'homme par cette fameuse « machine à vapeur », appellation puérile trop restrictive pour une invention qui a accéléré le développement économique mondial en apportant à l'industrie naissante une quantité inattendue d'énergie mécanique, donc de travail.

17

Toutes les formes familières de chaleur ou de lumière devinrent aussi des sources possibles de travail ; le bois qui jusqu'alors flambait dans l'âtre et chauffait aussi la cuisinière familiale pour y préparer les repas, le charbon qui jusqu'alors chauffait les poêles de nos chambres, le pétrole qui brûlait dans les « lampes à pétrole » suspendues au plafond pour éclairer nos soirées. Tous ces produits combustibles que l'on trouve dans la nature allaient maintenant pouvoir produire aussi de l'énergie

⁷ À l'exception des bateaux à voiles qui remplacèrent les galériens, et de quelques moulins à vent et à eau vers la fin de cette immense période.

mécanique en brûlant sous une chaudière close pour y faire bouillir de l'eau dont la vapeur sous pression s'échappait vers des cylindres équipés de pistons coulissants qu'elle pousse et qui, par un jeu de bielles et manivelles associées à un vilebrequin, créent un mouvement un peu semblable au jeu de jambes d'un cycliste qui pédale et transforment le mouvement axial alternatif des pistons⁸ en mouvement de rotation. À son tour ce mouvement de rotation était transmis par un jeu de courroies de poulies et aux machines-outils de l'industrie naissante. Autre application : ce système de bielles entraînait directement les roues des premières locomotives à vapeur.

Pourquoi avons-nous attendu 450 000 ans pour inventer la machine à vapeur ? « *Homo habilis* » avait domestiqué le feu sans en tirer d'énergie sous forme de travail, ce que la nature ne savait pas faire non plus ; et il n'avait pas aperçu dans cette nature d'autre source directe de travail que sa propre musculature et celles des membres de sa tribu et de ses esclaves. Du bois à brûler, il y en avait partout, mais l'homme n'avait pas imaginé que feu, chaleur et énergie mécanique puissent appartenir à la même catégorie de phénomènes physiques ; il avait adopté le feu et sa chaleur comme une commodité, un apport de confort, chauffant et éclairant un peu sa caverne tout en éloignant les carnivores, et améliorant ses repas sans penser que cette énergie pouvait décupler sa force.

Cette séparation entre concepts et usages s'est prolongée des centaines de milliers d'années. Il a fallu attendre le XIX^e siècle pour que la relation entre énergie mécanique, assurée de plus en plus par le cheval et les hommes, et chauffage et éclairage de l'habitat, assurés par le feu de bois dans l'âtre et la flamme des chandelles dans le chandelier soit comprise, puis utilisée.

18

Le progrès pendant ces millénaires n'a été que de remplacer caverne par chaumière ou par château.

Cette « machine à vapeur » n'était pourtant pas une invention géniale ne pouvant être comprise que par des percées scientifiques comme celles d'Einstein. Denis Papin avait déjà frôlé la réussite du passage de la chaleur à la mécanique en observant vers 1670 que la vapeur émise par l'eau qui bouillait dans sa casserole soulevait le

8 Plus tard, ces premières machines à vapeur à pistons furent remplacées par des turbines à vapeur générant directement un mouvement rotatif où la chaleur va se transformer en énergie mécanique, attelée à un alternateur transformant cette énergie mécanique en énergie électrique encore plus précieuse.

couvercle, et qu'en verrouillant ce couvercle, la pression et la température de l'eau augmentaient, permettant de cuire plus rapidement les aliments ; il a donc été d'abord l'inventeur de la « cocotte-minute ».

C'est Carnot, au début du XIX^e siècle, qui révèle que chaleur et travail sont bien cousins, la chaleur d'un fluide étant l'expression macroscopique du mouvement désordonné de ses particules, dont la température absolue T mesure la vitesse moyenne. En utilisant deux sources de chaleur, l'une chaude T_c et l'autre plus froide T_f , et en canalisant l'énergie désordonnée de la forte agitation thermique de la source chaude vers la moindre agitation de la source froide par un fluide transportant la chaleur entre les deux sources, Carnot illustra la récupération de la partie ordonnée de cette énergie d'agitation sous forme d'énergie mécanique, le rendement énergétique étant de $1 - T_f/T_c$. Cette formule très simple met en évidence qu'il est impossible d'extraire de l'énergie mécanique d'une source unique de chaleur ($T_c=T_f$), puisque le rendement du passage de la chaleur au travail est nul ; ceci est vrai quel que soit le niveau de température de la source ; elle montre aussi qu'avec deux sources, le rendement ne sera jamais mirobolant, car avec une source froide de l'ordre de l'ambiance 20 °C (soit $T_f=293$), même avec une source très chaude à 700 °C (soit $T_c=973$), le rendement plafonne vers 0,7. Il est bien souvent de l'ordre de 0,3 à 0,4. Mais de manière surprenante, cela permit pourtant de lancer la première révolution industrielle ; car en faisant bouillir de l'eau sous pression à plusieurs centaines de degrés Celsius (300 à 700 °C dans les diverses chaudières actuelles), même avec ces rendements limités, on peut extraire selon la taille de la chaudière, des puissances de plusieurs centaines voire plusieurs milliers de chevaux. C'est comme si on avait créé à volonté des milliers de chevaux ne mangeant plus de l'herbe, mais du bois, du charbon, du gaz naturel. Et l'homme put prendre conscience du temps qu'il avait perdu en ignorant que la chaleur et le travail étaient deux formes de la même entité : l'énergie.

L'idée la plus simple pour exploiter cette loi de Carnot pour tirer de l'énergie mécanique de la chaleur était d'utiliser la vapeur elle-même comme source chaude. On avait dans l'air environnant une source plus froide et il suffisait donc de créer un exutoire à la chaudière. Les trains de cette époque consommaient donc du charbon et de l'eau qu'il fallait renouveler puisque c'était directement l'eau vaporisée de la chaudière qui servait de fluide moteur. Dans le développement de l'automobile, le moteur a conservé la structure à cylindres et pistons de la machine à vapeur initiale, mais l'optimisation de la loi de Carnot a conduit à y remplacer la vapeur par

une utilisation directe du gaz de combustion très chaud améliorant le rendement et permettant de simplifier la construction.

CHANGEMENT DE RÈGNE, LE NOUVEAU ROI EST LE FEU

Avec un grand bidon en tôle d'acier assez épaisse, rempli d'eau chauffée et vaporisée sous pression par une flamme en partie basse, on peut produire des puissances mécaniques de plusieurs dizaines, centaines ou milliers de chevaux. L'animal cheval a perdu la bataille de l'énergie et n'a plus qu'à se consacrer au sport de l'équitation, ce qu'il fait aujourd'hui pour notre plaisir.

Les industriels anglais qui utilisèrent des machines à vapeur, enrichies par James Watt d'un volant et d'un régulateur de vitesse, furent agréablement surpris d'en tirer une puissance aussi inattendue qu'ils attribuèrent peut-être à la haute qualité de leur charbon ou aux améliorations de Watt. Français et Anglais se sont-ils posé la question de l'origine d'une telle puissance ? On n'en trouve pas trace dans la littérature.

La véritable source de cette énergie imprévue était l'atome, mais personne ne le savait ! Ce n'est qu'au début du ^{xxe} siècle que les connaissances fraîchement acquises en chimie sur la structure de l'atome nous ont permis de comprendre *a posteriori* que lorsque nous regardons le feu dans l'âtre, les flammes qui dansent et qui nous réchauffent sont les expressions, visuelles et thermiques, de l'interpénétration de la « peau » des atomes de carbone du bois et de l'oxygène de l'air !

20

Les atomes auraient-ils une peau ??? Comme nous le savons aujourd'hui, cette « peau » est faite d'un anneau d'électrons (porteurs d'une charge électrique négative) tourbillonnant autour d'un noyau constitué de lourds protons (porteurs d'une charge électrique égale et opposée, positive) et de quelques neutrons éventuels sans charge électrique.

Cette surprenante abondance d'énergie est le fruit de l'interaction des particules de charges opposées, positives et négatives, qui ont su traverser cette « peau » pour se rencontrer et créer par cette réaction chimique des molécules d'autres corps (comme CO₂) tout en libérant sous forme de chaleur par cette réaction très exothermique l'excès d'énergie non investie dans la création de CO₂. Cette très grande force de liaison entre les composants électriques de l'atome, si tardivement

utilisée par Carnot pour en extraire la précieuse énergie mécanique est d'un ordre de grandeur très supérieur ($\sim 10^{38}$ fois) à la force gravitationnelle qui fait tomber les pommes trop mûres et les enfants qui courent trop vite.

Pour tenter de visualiser un aussi gigantesque rapport de 10^{38} entre ces deux forces fondamentales de la nature, on peut imaginer la pomme de Newton juste avant sa chute, encore immobile, en équilibre entre les deux forces égales et opposées de l'attraction gravitationnelle de la gigantesque masse de la planète Terre qui la tire vers le bas, et la force électrique assurant la cohésion de la minuscule queue de pomme qui la retient avant de casser lorsque le mûrissement biochimique aura suffisamment détérioré les composants élémentaires assurant la résistance de cette queue de pomme de quelques millimètres de diamètre.

Cette force électrique entre composants de l'atome est la véritable source d'énergie qui a permis la première révolution industrielle, et assure encore actuellement 70 à 80 % de l'énergie que nous produisons et consommons par sa partie issue d'une combustion.

Domage que cette force électrique fût si bien cachée sous le nom de « machine à vapeur » : nous aurions gagné deux siècles pour nous habituer à cette idée nouvelle et inattendue que les plus grandes sources d'énergie se trouvent dans les liaisons entre les composants les plus petits des atomes de notre univers. Mais ce n'est que pendant la première moitié du xx^e siècle qu'au-delà de la physique atomique qui est le substrat de la chimie et, donc, des phénomènes de combustion et de la machine à vapeur qui en découle, s'est développée la physique interne des noyaux atomiques, la physique nucléaire, dont les énergies se sont matérialisées en 1945 par les deux bombes qui ont tué 200 000 Japonais. Il en est resté une certaine confusion entre physique atomique et physique nucléaire, puisque tout ce que nous appelons énergie atomique provient certes des atomes, mais plus précisément des forces présentes dans les noyaux des atomes...

À l'époque, l'ignorance de cette liaison électrique si puissante entre composants électriques de l'atome, que nous utilisions pourtant depuis si longtemps dans tous les usages du feu sans la connaître n'avait d'égal que la même ignorance que nous avons de l'électricité elle-même. Connue comme phénomène physique naturel, sonore et visuel par les éclairs des orages, l'électricité statique était aussi connue par de petits jeux de société consistant à faire sautiller des petits papiers en les attirant

par des morceaux d'ambre vigoureusement frottés. De son côté, le magnétisme était connu par les pierres de magnétite, aimants naturels qui attiraient le fer et faisaient dévier l'aiguille des boussoles.

Le développement de l'électromagnétisme ne s'est pas fait, contrairement à celui de la relativité, à l'ombre d'un génie comme Einstein ; il fut le fruit d'une volonté de la société de mieux comprendre ces phénomènes électriques et magnétiques bizarres, à travers de multiples hommes de science apportant chacun sa contribution en expériences et réflexions tout au long du XIX^e siècle, dont quelques-uns méritent d'être cités.

Il a fallu cesser de s'amuser avec l'électrostatique et ses quelques électrons arrachés de force par frottement à des corps isolants, comprendre avec Volta et Ampère qu'on pouvait en faire circuler des milliards entre les atomes de certains métaux dits conducteurs, à partir de certaines réactions chimiques (piles) libérant des électrons. Il a fallu observer avec Ørsted que ce courant électrique déviait l'aiguille d'une boussole, donc que l'électricité portait du magnétisme ; puis l'étudier avec Ampère et comprendre la notion de champ et la perturbation qu'y apporte le fer par sa perméabilité magnétique en le transformant en champ d'induction ; imaginer qu'avec du courant électrique autour d'un noyau de fer maximisant le rapport induction/champ, on pouvait créer des électroaimants beaucoup plus puissants que les aimants naturels.

22

Il a fallu comprendre avec Maxwell la nature intime des ondes électromagnétiques, leur propagation, leur parenté avec la lumière et leur potentiel incroyable de support d'information et communication. Il a fallu acquérir avec Tesla une vision de la grande électrotechnique moderne en faisant tourner des électroaimants entraînés par une turbine pour créer du courant alternatif triphasé. Tesla fût un visionnaire de la structure rationnelle de toutes les machines électriques tournantes, alternateurs et moteurs, ainsi que du transport longue distance à haute tension de l'énergie sous sa forme électrique ($P = U.I^9$), clés de la seconde révolution industrielle permise par la distribution de l'énergie électrique sur tous les territoires à partir d'une production « centralisée » dans des centrales électriques.

9 P puissance, U tension, I intensité

La puissance mécanique dont on dispose sur l'arbre d'une turbine sous la forme $C.\Omega$ d'un couple C tournant à vitesse angulaire Ω (oméga) peut être utilisée directement sous cette forme mécanique tant qu'il s'agit de puissances moyennes (marine...), mais pour les grandes puissances, il n'y a pas d'autre usage d'une telle puissance mécanique que d'entraîner un alternateur qui est un aménagement électromagnétique de l'espace transformant la vitesse de rotation en tension électrique U et le couple en courant électrique I . Ainsi une méga ou giga-puissance mécanique localisée non transportable est transformée en puissance électrique avec un rendement qui peut atteindre 98 %, et cette énergie électrique est transportable et fractionnable sous des tensions adaptées au besoin, là aussi avec des rendements excellents. C'est cette flexibilité de transport et usage qui explique l'importance de l'énergie sous sa forme électrique.

L'électricité n'est pas une source d'énergie. Il n'existe pas dans la nature de sources d'électricité comme il existe des mines de charbon, des puits de pétrole, des poches de gaz naturel, des chutes d'eau, du vent et du soleil. C'est un vecteur d'énergie, qui, n'augmente pas la ressource en énergie, mais, utilisant l'électron comme support d'énergie et d'information, possède une variété et flexibilité d'applications sans égale : éclairage, chauffage, automatismes de surveillance-contrôle, stockage indirect d'électricité, motorisations diverses depuis le petit outillage jusqu'aux TGV, soudure à l'arc, calcul, information, télécommunications, et maintenant informatique et intelligence artificielle, ce qui a augmenté considérablement sa consommation. L'électricité est devenue la forme d'énergie la plus noble, car d'application la plus générale et la plus facile à utiliser.

Doit-on s'inquiéter de cette envolée de la consommation d'énergie ? Oui, car cette envolée a été fondée à 80 % sur la combustion, et a donc provoqué une ruée sur tous les combustibles disponibles sur Terre : bois, charbon, pétrole, gaz. Cette ruée sur tout ce qui brûle a induit deux risques : un risque d'épuisement des ressources, réel, mais vite surpassé par le risque climatique qui s'impose aujourd'hui. Jusqu'au milieu du ^{xx}e siècle, on ne savait pas chauffer l'eau d'une chaudière autrement que par une combustion émettant du CO_2 . Ce gaz accumulé dans l'atmosphère pendant une durée de vie de l'ordre du siècle est apparu à partir de 1990 comme un danger mondial par son effet de serre créant un réchauffement cumulatif du climat promettant des conséquences catastrophiques.

« Le climat de la Terre se modifie dans une voie très incertaine pour le futur de nos civilisations, avec une montée implacable du niveau des mers rendant inhabitables et/ou incultivables des régions très peuplées ; avec une intensification des événements extrêmes et des dégâts qu'ils causent ; avec une altération des régimes de pluviosité qui mettent en péril l'agriculture vivrière »¹⁰. Le GIEC montre dans ses rapports que l'évolution en cours du climat est due essentiellement aux émissions de gaz à effet de serre par les activités humaines. L'énergie est la source très majoritaire de ces émissions. Il est donc essentiel d'en réorienter la production vers des sources n'émettant pas ou peu de CO₂, essentiellement nucléaire, les équipements hydroélectriques étant déjà largement réalisés, et les énergies renouvelables du soleil et du vent étant handicapées par leurs intermittences difficiles à gérer ; mais le succès de la conversion de la chaleur en travail depuis le xix^e siècle a été tel que 80 % de l'énergie mondiale provient encore aujourd'hui de la combustion, alimentant le réchauffement climatique.

Tableau 1 — De l'*Homo habilis* au xx^e siècle, les sources et vecteurs d'énergie.

Cerveau, muscles, hommes, esclaves, soleil, bois, feu, vent, cheval, bœuf, dromadaires, chutes d'eau, éléphants, ânes et mulets, chiens de traîneau, charbon, machine à vapeur, gaz méthane, électricité, batteries, réseaux, atome, uranium.

Cela rappelle « Paroles », le recueil de poèmes surréalistes de Jacques Prévert, mais c'est aussi la liste des sources et vecteurs d'énergie dans lesquelles les hommes ont appris à puiser à travers les âges et les continents. Le cerveau a permis de comprendre les mécanismes de l'énergie. Mais ce sont les femmes qui par leur travail irremplaçable et permanent ont permis de mobiliser puis comprendre toutes ces énergies.

Une telle liste de sources et vecteurs d'énergie, assez folklorique, a un parfum d'histoire, de géographie et de climat. Un physicien y préférera sans doute une taxonomie rigoureusement fondée sur des critères exclusivement basés sur la physique. Albert Einstein va nous montrer la voie.

¹⁰ Citation de Jean Poitou, climatologue, président du Conseil scientifique de « Sauvons le climat SLC ».

EINSTEIN, $E=mc^2$ ET LES HISTORIENS DE L'ATOME

Le début du xxe siècle a connu un approfondissement inédit de toutes les sciences et, notamment, de la physique concernant aussi bien l'infiniment grand de l'univers que l'infiniment petit de la matière, avec Albert Einstein et la relativité générale, et en même temps l'école de Copenhague et la physique quantique.

La découverte d'Einstein la plus connue du public tient dans sa célèbre équation $E=mc^2$ qui introduit la toute nouvelle idée d'une relation d'équivalence entre l'énergie E portée par toute matière et sa masse m , le lien c^2 étant fait d'espace et de temps d'un univers (le nôtre) dans lequel la vitesse c de la lumière est une constante absolue, indépendante du référentiel de mesure.

Armés de la relativité générale, les physiciens eurent l'idée de jouer aux historiens de l'univers en partant de la vérification récente par leur collègue astronome Hubble que l'univers était bien en expansion et se refroidissait en perdant de la densité d'énergie. Ce constat suggéra aux physiciens de simuler un voyage dans le passé en créant des particules plus lourdes et de la matière plus dense telle qu'elle existait probablement en des temps où l'énergie était plus dense ($E=mc^2$). Pour cela les physiciens ont envoyé dans le vide de leurs dispositifs d'expérimentation des impulsions d'énergie de plus en plus fortes pour y créer de telles particules dans une sorte de rétroviseur du temps que sont les grands accélérateurs/collisionneurs de particules tel que le grand collisionneur de hadrons du Cern à Genève.

Cette méthode originale de recherche historique a remarquablement fonctionné et les physiciens ont pu écrire un grand livre d'histoire de l'univers où ils concluent qu'il est âgé de 13,7 milliards d'années, né sous la forme d'une super-hyper-gigantesque impulsion d'énergie portée par un rayonnement électromagnétique à environ 10^{32} degrés, à un instant $t = 10^{-43}$ seconde d'un temps qui venait d'être inventé. Cet univers nouveau-né n'occupe alors que 10^{-24} micron d'espace, mais entre au même instant dans une expansion fantastiquement rapide, supra-luminale par instants, accompagnée d'un effondrement de sa température. Évoquant une explosion, cet instant de l'univers a été baptisé *Big Bang*.

L'expansion de l'espace allonge la longueur d'onde du rayonnement qui perd de l'énergie. L'énergie totale se conservant dans le système isolé « univers », sa partie

rayonnement faiblissant se dépose sous la forme nouvelle de « masse » sur cette création récente, la « matière » la plus élémentaire, les « quarks », et aussi sous forme de liaisons entre ces quarks qui vont s'agglutiner par trois dès que la température aura baissé de 10^{13} à 10^{12} degrés pour former les premières briques de notre univers actuel, les protons et neutrons, puis les particules les plus légères (leptons), dont les ancêtres de nos électrons. La liaison gravitationnelle se dépose vers 10^{-33} seconde, puis vers 10^{-32} seconde la force « forte », qui assure la cohésion des noyaux atomiques, et à peu près en même temps une force « électrofaible » provisoire qui va se dissocier en force électrique et force « faible » (inutile à cet exposé résumé) vers 10^{-12} seconde, lorsque la température aura chuté à 10^{15} degrés.

Cette évolution s'est faite en conservant une structure de famille d'une génération à l'autre :

- **génération actuelle** et seule génération connue jusqu'en 1972, dite électronique : composée de deux quarks, u (up) et d (down), qui forment les protons et neutrons par assemblages, et de deux leptons, l'électron et le neutrino. En montant le niveau d'énergie, les physiciens ont mis au jour en 1976 les membres d'une

- **génération précédente**, où le lepton correspondant à l'électron est le muon, 100 fois plus lourd que l'électron et exigeant 105 MeV pour sa création dite muonique. Les autres membres de cette famille sont deux quarks d'autres saveurs : le quark « étrange » (strange), et le quark « charmé » c, le dont les énergies de création sont de 175 MeV et 1270 MeV. Toujours plus haut, dans la chaleur intense des collisions produites dans les grands accélérateurs, les physiciens ont terminé en 1995 le dénombrement d'une

26

- **troisième génération** ascendante, dite tauique, toujours constituée de deux quarks et de deux leptons : les deux quarks sont le « beau » quark b, comme beauty qui « pèse » environ 5 giga électronvolts (GeV), et le tout dernier quark t comme « top » qui a exigé l'énergie énorme de 174 GeV. Le lepton correspondant à l'électron est le tauon, qui est environ 3 000 fois plus lourd que l'électron et demande 1784 MeV, et le lepton correspondant au neutrino est le tau neutrino « pesant » un peu moins de 36 MeV.

Ces deux dernières générations sont des produits de laboratoire, ils n'existent plus dans la nature sauf quelques-uns d'entre eux comme le muon, produit en haute atmosphère par des rayons cosmiques très puissants, résidus d'explosion de supernovae, mais toutes ces générations qui se sont succédé au cours du refroidissement de l'univers, coexistaient dans les premiers instants. L'énergie des particules des tout premiers temps devait se compter en milliards de milliards de téraélectronvolts, totalement hors d'atteinte des moyens de l'homme qui ne pourra donc jamais reconstituer le temps zéro.

L'énergie du rayonnement initial est donc maintenant cachée dans la matière, sous la forme de trois interactions fondamentales (aussi nommées liaisons ou forces) reliant entre eux les constituants de cette matière, et issues des instants successifs de formation de celle-ci.

Cette hauteur de vue sur le transfert de l'énergie de rayonnement vers la matière naissante élargit notre regard aux formes originelles de l'énergie prélevée sur le rayonnement du *Big Bang* au cours de l'expansion des premiers instants créant la matière, qui reste porteuse de cette énergie sous la forme de trois types de liaisons entre les éléments sur lesquels se sont fixées ces trois formes basiques d'énergie. Ces niveaux d'énergie si dispersés des liaisons entre les composants de la matière, permet aux trois interactions fondamentales d'être présentées ci-après dans l'ordre de leur usage historique par les hommes, qui est l'ordre inverse de leur importance comme source fondamentale d'énergie.

L'UNIVERS FONCTIONNE AVEC TROIS INTERACTIONS (OU LIAISONS, OU FORCES) FONDAMENTALES

27

1. l'Interaction gravitationnelle (ou force de gravité, ou attraction universelle. Universelle, car c'est une attraction mutuelle entre masses, fonction linéaire de ces masses et fonction inverse du carré de leur distance mutuelle ($f = g \cdot m_1 \cdot m_2 / d^2$). S'appliquant à la totalité de l'espace, de l'intérieur des atomes à l'espace sidéral des galaxies, c'est la seule des trois interactions à ne pas être limitée à l'intérieur de l'atome. Elle est directement perçue par nos sens et nous est familière depuis nos premières chutes de l'enfance ; ce fut donc la première identifiée, seule connue

à l'époque de Newton qui lui a consacré une analyse après avoir reçu, dit-on, une pomme sur la tête. Comme le rappelle la grande faiblesse de la constante g de la loi d'attraction universelle : $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg.s}^{-1}$, c'est de loin la plus faible des trois interactions fondamentales, plusieurs dizaines d'ordres de grandeur derrière l'interaction électrique (10^{38} fois moins), elle-même de deux ordres de grandeur sous l'interaction nucléaire.

2. Interaction électrique (ou liaison ou force électrique, ou petite porte de l'atome), tardivement identifiée, car cachée à l'intérieur des atomes dès leur formation. La force électrique a disparu à l'extérieur des atomes, car les atomes sont tous électriquement neutres. L'interaction électrique s'exerce entre composants de l'atome électriquement chargés, répulsive entre signes identiques $+/+$ ou $-/-$, attractive entre signes contraires $+/-$. Elle s'exerce donc dans l'atome par répulsion entre protons du noyau, agent de l'énergie nucléaire de fission des atomes lourds, et par attraction entre protons et électrons, dont les électrons périphériques des atomes clés de la chimie. Elle est ce mystère d'efficacité de la combustion qui a tant préoccupé Carnot.

3. Interaction forte (ou nucléaire, ou liaison nucléaire). Cette interaction forte était aussi passée inaperçue, car sa portée ne dépasse pas le noyau des atomes. C'est la plus forte liaison (137 fois supérieure à la liaison électrique), une attraction mutuelle s'exerçant entre tous les composants du noyau des atomes (quarks, protons, neutrons), sorte de colle assurant la cohésion de la matière. C'est l'outil de l'énergie nucléaire. Une modification spontanée ou contrôlée de cette liaison s'exprime par une production d'énergie sous forme de chaleur et de rayonnement. Dans l'univers, c'est l'outil naturel du fonctionnement interne du soleil et des étoiles. Sur Terre, elle a favorisé l'apparition de la vie en augmentant d'une quinzaine de degrés la température de la terre par la désintégration avec libération de chaleur de ses constituants natifs radioactifs.

C'est l'outil de production d'énergie électrique des réacteurs nucléaires en exploitation dans le monde (~400).

C'est aussi l'outil spontané des réacteurs nucléaires naturels historiques découverts à Oklo (Gabon) qui ont fonctionné pendant plusieurs millions d'années en ne produisant que de la chaleur, quelques autres milliards d'années avant la naissance de Carnot.

PERFORMANCES ET ATTRAITS DE LA PRODUCTION ÉLECTRONUCLÉAIRE

Puisant son énergie dans la plus forte des liaisons, l'atome permet de produire massivement de l'électricité avec le minimum « d'intrants », la fission d'un gramme d'uranium 235 produisant autant d'énergie électrique que la combustion de deux tonnes de charbon, sans aucune émission de CO₂ puisqu'il ne s'agit pas d'une combustion. Dans la filière actuelle de la fission nucléaire, la récupération de l'énergie contenue dans cette interaction forte est obtenue par la mise en opposition des deux plus fortes liaisons de la nature, la liaison nucléaire et la liaison électrique :

- la liaison nucléaire, attraction extrêmement puissante entre les nucléons (protons et neutrons composant le noyau de l'atome), a une portée très courte (de l'ordre de 10⁻¹³ cm) ne dépassant pas le noyau ;
- la liaison électrique, répulsion de longue portée des protons entre eux (++) qui restent toutefois collés par la force nucléaire qui est plus forte, ce qui maintient la stabilité (pour les corps non radioactifs).

Cette force répulsive augmente avec le nombre de protons alors que la force attractive créée par l'interaction forte dépend peu du nombre de nucléons. Lorsque la proportion de protons augmente, la stabilité des noyaux diminue, au point qu'ils peuvent devenir instables. Pour réduire la proportion de protons, le noyau peut émettre un électron positif¹¹ (radioactivité bêta+), émettre un noyau d'hélium (radioactivité alpha) ou se casser en deux, c'est la fission nucléaire qui peut arriver spontanément pour les noyaux vraiment très lourds (curium, californium). La radioactivité désigne les divers processus par lesquels un noyau instable émet des particules (radioactivité alpha, bêta, gamma) ou fission pour atteindre des états plus stables.

29

Dans les réacteurs, la fission est obtenue par injection d'énergie dans le noyau, généralement par capture d'un neutron (fission induite).

Au cours de la fission, quelques neutrons sont émis, qui peuvent être, à leur tour, absorbés par des noyaux d'uranium et provoquer leur fission. C'est la réaction en chaîne. L'art de la conduite d'un réacteur est de contrôler le flux de neutrons percutant les noyaux.

11 Ce qui correspond à la transformation d'un proton en neutron.

La somme des masses de deux fragments de fission est inférieure à celle du noyau d'uranium initial, cette perte de masse correspondant à une production d'énergie selon la célèbre loi d'Einstein $E = m.c^2$. C'est donc bien la masse qui est transformée en énergie. C'est le principe de fonctionnement de la domestication de la fission nucléaire utilisée actuellement dans les centrales électronucléaires à fission.

À titre d'exemple, lorsque EDF remplace annuellement un tiers de l'uranium d'un de ses réacteurs nucléaires de 1000 Mégawatts, ce tiers usagé qui a travaillé trois ans en fournissant 7 TWh d'électricité (7 milliards de kilowatts-heures) a perdu 3 kg de sa masse.

Les attraits essentiels de l'énergie nucléaire en découlent : extrayant son énergie de la plus forte des liaisons physiques, plus de 100 fois plus forte que la liaison électrique gérant les réactions chimiques de combustion, elle produit massivement de l'énergie électrique avec le minimum « d'intrants » (on ne peut plus dire combustible), ce qui explique la puissance « mystérieuse » de cette source.

Cette énergie est porteuse d'indépendance nationale, car pour des énergies finales du même ordre de grandeur, la France n'importe annuellement qu'environ un demi-milliard d'euros d'uranium pour sa production électrique contre environ cinquante milliards pour le pétrole des transports¹². Cet avantage d'indépendance a été d'un grand poids lors du lancement du programme nucléaire français. Elle explique également la compétitivité d'une énergie aussi concentrée, confirmée par la Cour des comptes à diverses reprises depuis 2012, évitant tout « coût masqué » en incluant les investissements initiaux, les développements passés, les provisions affectées au traitement des déchets ainsi que celles affectées au démantèlement des centrales en fin de vie, situant ce coût entre 4 et 6 c€/kWh selon les hypothèses financières pour le parc nucléaire français actuel.

Mais, intérêt important, l'eau de la chaudière nucléaire n'est plus chauffée par une combustion émettrice de CO₂, mais par la récupération directe sur place de l'énergie cinétique des neutrons et des produits de fission dans les barreaux du combustible nucléaire et dans l'eau primaire sous forme de chaleur. Cette production de chaleur sans émission de CO₂, avantage qui n'était pas un objectif à l'époque du lancement du programme français dans les années 1970 où la conscience du problème clima-

tique n'était pas encore éveillée, prend toute sa valeur aujourd'hui où la question climatique devient capitale, car il n'existe pas de moyen plus puissant et plus sûr de respecter les engagements pris par les nations de limiter le réchauffement à deux degrés en fin de siècle.

Notons aussi que cette transition (matière → énergie) a un point commun avec la transition (chaleur → énergie), c'est de reculer encore davantage les limites des ressources énergétiques en tirant parti de la liaison forte, environ 100 fois plus forte que la liaison électrique de la combustion, à partir d'un « combustible » qui est une matière radioactive — actuellement surtout l'uranium 235 — dont il existe d'autres isotopes — et qui pourrait devenir quasi illimitée par le développement de la technologie surgénératrice.

Potentiel de l'énergie nucléaire : Nous n'avons évoqué que l'énergie de fission des atomes lourds, en service dans plus de 90 % des réacteurs actuels avec l'uranium 235, qui ne représente que 0,7 % de l'uranium naturel. S'il devenait nécessaire d'utiliser des atomes de départ plus abondants, l'uranium 238 (99,3 % de l'uranium naturel) dont la France dispose d'un stock considérable, et/ou le thorium très abondant, qui sont fertiles¹³ et qui pourraient être rendus fissiles dans des réacteurs à neutrons rapides (RNR), à l'étude depuis une vingtaine d'années au sein du Forum international Génération IV, et dont la France a une connaissance de plus de cinquante ans avec les réacteurs expérimentaux successifs de Rapsodie à SuperPhénix. Il existe aussi dans les centres de recherche internationaux une diversité de projets d'autres familles de réacteurs en étude, depuis les petits réacteurs modulaires (SMR) inspirés des réacteurs de sous-marins, jusqu'aux projets plus lointains de fusion d'atomes légers dans des réacteurs du type Tokamak dont un premier prototype supraconducteur a été construit à Cadarache dans les années 80¹⁴. Et un second beaucoup plus puissant est en construction dans le cadre du programme ITER.

Que d'avantages ! On doit même en ajouter un : le nucléaire bénéficie maintenant d'un demi-siècle d'expérience, donc de statistiques d'exploitation sur des réacteurs nucléaires de diverses familles technologiques, établies par les organismes internationaux (ONU, OCDE, IAEA, Union européenne...), qui démontrent que, contrai-

13 Un noyau atomique est fissile s'il se sépare en deux noyaux plus petits (et en libérant de l'énergie) naturellement avec une probabilité d'où découle sa « durée de vie ». Les noyaux fertiles sont des noyaux naturellement stables, mais qui peuvent se séparer en deux noyaux plus légers et en libérant de l'énergie sous l'effet d'une collision avec un neutron d'énergie appropriée.

14 West

rement à une croyance assez générale, l'énergie nucléaire est celle qui a eu depuis cinquante ans l'impact minimum sur la santé publique. Un membre de l'Académie des technologies a regroupé ces études dans un rapport Impact sur la santé des filières de production d'énergie.¹⁵

Donc, sauf à renoncer à la raison, ce n'est pas dans l'usage normal ou les accidents qu'il faut chercher le motif d'un rejet de cette filière énergétique, car aucune des autres grandes sources d'énergie n'a fait, et de très loin, moins de victimes en exploitation au cours du dernier demi-siècle. Pourtant, en Europe, on connaît l'intransigeance de l'Allemagne qui a décidé de renoncer au nucléaire après l'accident de Fukushima, et la pression qu'elle exerce sur la Commission de l'UE pour faire voter une taxonomie excluant le nucléaire en différenciant ses conditions de financement (voir plus loin Taxonomie énergie UE).

15 Gérard Grunblatt (2015) — Communication à l'Académie des technologies — Incidence sur la santé humaine des différentes sources de production d'énergie électrique : évaluation sur les cinquante dernières années.

Voir aussi Afis (2019) — L'impact sur la santé des différentes sources de production d'énergie.

IV

SUR LES DISCORDANCES DANS L'UNION EUROPÉENNE : LES TAXONOMIES

Les discussions au sein de l'Europe

Dans l'Union européenne, les États sont responsables du choix des sources d'énergie¹⁶, qui ont d'ailleurs été historiquement calquées sur les ressources naturelles de chaque État. La Commission européenne s'est toutefois engagée dans une recommandation, masquée sous un classement dit « taxonomie verte », favorisant les financements européens des énergies réputées « vertes » d'où le nucléaire serait exclu. Après de longs débats, le texte proposé accepte le nucléaire et le gaz naturel dans cette taxonomie verte, mais seulement comme « énergies de transition »¹⁷. L'étude présentée ici montre abondamment que l'énergie nucléaire n'a pas vocation à être seulement une énergie complémentaire de transition de quelques décennies, mais une énergie de base sur une durée conséquente, sous des formes évolutives d'abord avec les technologies déjà industrialisées, puis avec les technologies des filières de réacteurs à neutrons rapides qui sont déjà acquises (TRL élevé) et permettent par l'utilisation de l'uranium 238 de mettre la France à l'abri d'un manque de ressources énergétiques pendant plusieurs siècles et simplifie grandement la question des déchets. Et en attendant les éventuels réacteurs de fusion dont il est encore difficile aujourd'hui de préciser une date de disponibilité industrielle.

La taxonomie étant la science des lois de la classification, il serait plus rationnel de supprimer « de transition » comme qualificatif de l'énergie nucléaire, qui sera le vaccin le plus efficace contre la dérive climatique, et la seule source d'énergie dans laquelle l'humanité pourra encore puiser dans la continuité d'un progrès construit dans la sagesse. Cette modification apporterait une meilleure concordance entre la rigueur qu'exige une taxonomie et les caractères propres imposés à chacune des sources par la physique.

¹⁶ Article 122 du traité sur le fonctionnement de l'Union européenne, issu du traité de Lisbonne (2007).

¹⁷ Règlement de la Commission du 9 mars 2022

PROPOSITION DE CRITÈRES

Pour un décideur qui souhaite affiner son jugement, établir une taxonomie des critères d'adéquation à tel ou tel objectif est une excellente idée. Par exemple, la vocation d'une centrale électrique est d'alimenter de grands réseaux et il serait donc utile d'établir une taxonomie de l'adéquation des sources d'énergie à l'alimentation des réseaux électriques, d'où la proposition qui suit.

*Tableau 2 — Adéquation des sources d'énergie à l'alimentation
des réseaux électriques*

1. Ne pas émettre de gaz à effet de serre, afin de limiter la dérive climatique.
2. Être compétitif, l'électricité devenant de plus en plus un bien public prenant en charge tous les échanges d'énergie.
3. Dans les statistiques mondiales des impacts d'accidents sur la vie humaine, être dans le plus bas dixième.
4. Être une composante de l'indépendance nationale, économique et stratégique, pour fiabiliser le service.
5. Être disponible à tous moments de l'année, pour améliorer le service rendu.
6. Si on exploite une source intermittente, elle doit être associée à un stockage ou une production de secours. Être pilotable en puissance active (MW) pour ne pas dégrader le service.
7. Au moins pour les grandes puissances, être pilotable en puissance réactive (MVAR).
8. Disposer d'une inertie spécifique (T_a) pour participer au maintien du synchronisme. Protéger l'environnement en produisant la plus grande puissance sur la surface au sol la plus réduite.
9. Respecter les normes concernant les émissions polluantes ou radioactives.
10. Disposer d'une assez grande liberté de choix des emplacements de centrales électriques
11. S'assurer d'un retour de l'énergie investie suffisant pour ne pas pénaliser le niveau économique de la société
12. Être d'une puissance unitaire suffisante pour ne pas multiplier les connexions et la surface couverte.

V

HÉRITAGE ET MARQUES DE FAMILLE DES TROIS GRANDES INTERACTIONS

Les sources d'énergie évaluables par cette taxonomie sont issues de la matière à travers une des trois interactions fondamentales dont elle garde en héritage une marque de famille, qualités ou défauts.

– **Héritage de l'interaction nucléaire** : Cette source d'énergie a prouvé sur un demi-siècle d'exploitation à haut niveau en France qu'elle satisfait la totalité des critères de qualité des deux taxonomies évoquées (celle de la Commission européenne et celle proposée ici). Elle a aussi prouvé qu'elle est gérable avec le plus haut degré de sûreté, et qu'au niveau mondial, malgré une diversité de technologies et de règles de sécurité, les statistiques montrent que le nucléaire reste la filière énergétique ayant eu le plus faible impact sur la santé humaine sauf non-respect des règles d'exploitation (Tchernobyl).

On peut également scruter par cette taxonomie le comportement des autres sources d'énergie.

– **Héritage de l'interaction électrique** (ou nucléaire petite porte) : la glorieuse famille de l'interaction électrique qui nous a fait entrer dans l'ère de l'industrie, de la technologie et connaître le confort technique du mode de vie actuel, est aujourd'hui discréditée parce qu'elle porte l'énorme défaut d'être atteinte d'une maladie de famille congénitale : l'obligation qui découle des lois de la chimie d'émettre du CO₂ conjointement à toute extraction d'énergie par cette liaison, quelles que soient l'origine et la forme finale de cette énergie, charbon ou gaz naturel pour les mégawatts électriques du réseau, pétrole pour les chevaux-vapeur de la voiture ou gaz pour les calories pour le chauffage. Cette maladie est encore celle de 80 % de la consommation mondiale d'énergie, et ne lui permet pas de satisfaire au critère n° 2. Elle n'est pas mortelle en soi, mais pourrait le devenir par ses conséquences climatiques si les mesures prises étaient insuffisantes (capture et stockage du carbone, énergies renouvelables — EnRI) ou erronées (refus du nucléaire). À l'intérieur d'une même famille, chaque membre peut être atteint à des degrés divers, le charbon étant le

plus atteint ; le gaz naturel se sent moins malade et en profite pour remplacer rapidement, provisoirement et à peu de frais, le charbon dans les centrales thermiques.

- Héritage de l'Interaction gravitationnelle : L'extraction d'énergie d'une chute d'eau entre clairement dans la famille gravitationnelle, la masse de la Terre attirant verticalement la masse de l'eau.

À première vue, cette liaison gravitationnelle semble moins évidente pour les éoliennes exploitant le vent qui souffle horizontalement, mais la formulation de l'énergie cinétique du débit massique de l'eau à son arrivée verticale sur une turbine hydraulique ($\frac{1}{2} m.v^2$) est aussi celle de l'énergie contenue dans le débit massique de l'air devant l'éolienne, avec la même dimension de l'énergie ($M.L^2.T^{-2}$). L'énergie du vent entre donc bien, elle aussi, dans la famille de la liaison gravitaire, mais la densité huit cents fois plus faible de l'air constitue le grave handicap des éoliennes¹⁸. Turbiner de l'air est beaucoup moins efficace que turbiner de l'eau. Les autres handicaps des éoliennes que sont l'intermittence et la difficulté à piloter l'énergie délivrée confirment l'impossibilité de ce rattachement en raison du rôle qu'y jouent les phénomènes météorologiques, face auxquels nous sommes impuissants comme nous le sommes devant les lois de la gravitation universelle définissant la circulation annuelle de notre planète Terre sur son orbite rythmant les saisons.

Quant à l'énergie solaire, la rattacher à la famille gravitaire paraît beaucoup plus inattendu, et pourtant ! Ce rayonnement qui nous arrive du soleil est le fruit de l'extrême pression gravitaire régnant au centre du soleil qui y allume et entretient à des millions de degrés les réactions nucléaires d'où émergent les photons à 6 000 degrés, dont certains iront en huit minutes arroser la Terre, et ce sont encore les lois de la gravitation qui fixeront la position de la terre et donc l'heure, le lieu et l'angle d'arrivée de ce rayonnement.

Toutes les énergies renouvelables sont donc bien de la famille des liaisons gravitationnelles ($f = g.m1.m^2/d^2$) dont on sait l'extrême petitesse (10^{-38} fois la force de

18 La puissance délivrée par une turbine est proportionnelle à la surface balayée (carré du diamètre), à la densité du fluide qui la traverse, et au cube de la vitesse de ce fluide. L'air ayant une densité 1000 fois plus faible que l'eau, il en ressort que pour fournir la même puissance, le diamètre d'une turbine à air doit être environ $800^{1/2}$, soit ~30 fois plus grand que celui d'une turbine hydraulique pour des vitesses de fluide comparables, d'où des éoliennes de 100 mètres de diamètre pour produire 3 MW alors qu'une turbine hydraulique de 3 mètres y suffit.

liaison électrique), n'ayant d'effet perceptible que si au moins une des masses en jeu est gigantesque pour soumettre les autres masses à une attraction significative. Sur Terre, cette attraction gravitationnelle n'a d'effet permettant des applications énergétiques, ou les perturbant, que par la force gravitationnelle de la Terre elle-même (centrales hydrauliques, éoliennes, solaires), du soleil (solaire PV et autres) et de la lune (centrales marémotrices), Terre, Soleil et Lune étant les trois seules gigantesques masses pas trop éloignées.

De ce constat d'une très faible densité énergétique, dont l'origine réside dans un corps céleste sur lequel nous ne pouvons avoir aucune action significative, même s'il est sous nos pieds, il dérive que la marque de famille des énergies renouvelables est « dépendance » faite de six caractéristiques illustrant l'impossibilité d'action sur la cause (masse, distance, position angulaire, rotation).

Tableau 3 — Les limites des énergies intermittentes

- Intermittences incontrôlables.
- Pilotage difficile et limité
- Ne pouvant gérer un réseau isolé sans stockage électrique, et qui doivent s'adosser à des sources pilotables dans les réseaux importants
- Coût élevé (tous éléments du système compris) et, donc, adaptation difficile au marché
- Aujourd'hui, plus pour le photovoltaïque que pour l'éolien,
- Puissances unitaires limitées à la dizaine ou quelques dizaines de mégawatts
- Mobilisation de grandes surfaces au sol, et de multiples raccordements

Malgré cet avantage apprécié de ne pas émettre de CO₂, les énergies renouvelables répondent à moins de la moitié des critères de cette taxonomie de la bonne adaptation à l'alimentation d'un réseau.

Les énergies renouvelables sont par nature intermittentes et leur pilotage est limité, ce qui est un défaut majeur pour la production électrique, et exige une association à des générateurs pilotables en puissance suffisante, à des stockages indirects d'énergie électrique ou à des flexibilités contraintes.

Il semblerait donc judicieux de qualifier « d'énergie de transition » les énergies renouvelables, non pilotables et condamnées à l'intermittence et à une faible densité d'énergie exigeant de grandes surfaces au sol, par leur appartenance à la famille de

l'interaction gravitationnelle. À l'exception du grand hydraulique restant disponible sur quelques sites, ces sources d'énergie ne sont pas les mieux adaptées à l'alimentation d'un grand réseau dans des conditions économiques acceptables.

L'homme avait fait usage de la liaison gravitationnelle en production d'énergie avant les deux autres liaisons plus efficaces, à une époque où l'électricité n'étant pas encore domestiquée, les paysans apportaient au meunier les sacs de grain ou d'olives qu'ils venaient rechercher sous forme de sacs de farine et de bouteilles d'huile. Les moulins à eau sont devenus des centrales hydroélectriques et les moulins à vent des éoliennes, dont le produit « électricité » n'est pas stockable, ce qui oblige soit à doter les éoliennes d'un pilotage rapide, ce qui est pratiquement très difficile, soit de leur adjoindre un stockage tampon, solution onéreuse.

Cette nouvelle contrainte de réglage rapide a pu être acceptée par les turbines à eau grâce à la densité de l'eau huit cents fois plus élevée que celle de l'air, et à son état liquide qui permet de la canaliser en tuyaux, de la stocker provisoirement en réservoir amont en barrant un cours d'eau et de régler le débit, et donc la puissance par action sur des vannes manœuvrables quasi instantanément, toutes propriétés qui permettent des puissances unitaires élevées et des facilités de régulation exceptionnelles, évitant toute intermittence, et étendant la régulation du réseau jusqu'au réglage en énergie négative par les STEPS, stations de pompage en heures creuses et turbinage en heures de pointe de consommation.

Ainsi la densité élevée de l'eau liquide à température ambiante a permis aux moulins à eau de survivre à l'électrification du monde en devenant des centrales hydroélectriques remplissant tous les critères de qualité d'exploitation sur un grand réseau, semblant avoir vaincu sa maladie familiale de la « dépendance ».

38

L'étude montre donc que les énergies renouvelables, intermittentes par nature, ne satisfont qu'à moins de la moitié des critères d'adéquation à l'alimentation fiable d'un grand réseau électrique, et sont limitées par la faiblesse intrinsèque de leur densité énergétique qui exige de grandes surfaces et de nombreuses connexions conduisant à des coûts non compétitifs ne pouvant justifier une subvention permanente.

Les réalités présentées ici sont connues des milieux scientifiques, mais moins de l'électeur moyen et des milieux politiques. Dans la méconnaissance de ces réalités, une doxa populaire un peu confuse rassemble deux ressentis du public :

- certes la filière nucléaire possède une remarquable densité d'énergie qui lui permet de produire autant d'électricité en cassant les noyaux d'un gramme d'uranium 235 qu'en brûlant deux tonnes de charbon, et le coût annuel de l'uranium importé par la France n'est que le centième du coût du pétrole importé pour nos voitures (~0,5 Mrds € contre ~50) pour des volumes d'énergie comparables, et sans émettre de CO₂, ce qui en fait l'énergie la plus écologique.
- mais une telle concentration d'énergie fait peur; elle porte encore le souvenir ineffaçable du début militaire foudroyant de l'atome qui mit fin en 1945 à la dernière guerre mondiale avec deux bombes, puis en 1986 de l'incroyable accident nucléaire de Tchernobyl, survenu hors service en explorant les limites de stabilité du réacteur après neutralisation préalable volontaire des protections, puis en 2011 d'un tsunami exceptionnel à Fukushima tuant 20 000 personnes sur les villes et villages de la côte, et noyant la centrale nucléaire du même nom sans y faire de victime d'origine nucléaire, alors que dans la presse et, donc, dans l'esprit du public, le nom de Fukushima reste associé à accident nucléaire plutôt qu'au tsunami. Comment ne pas être méfiant face à cette énergie, aussi bien que face à la désinformation qui accompagne la présentation de ses risques jugés par certains comme incomparables à ceux des autres sources d'énergie. Le nucléaire devient un sujet tabou où l'émotionnel remplace trop souvent le rationnel, car le citoyen moyen ne dispose pas des informations nécessaires à un jugement rationnel.

Les énergies renouvelables, de taille modeste, flattent l'idée citoyenne d'énergie décentralisée, chacun pouvant produire l'énergie qu'il consomme sans nécessiter de grands réseaux de transport. Pourquoi se poser toutes ces questions sur les risques du nucléaire quand nous avons sous la main les sources d'énergie sympathiques, plus sûrement écologiques, du vent et du soleil ? Elles sont perçues par certains comme illimitées, car renouvelables, et même gratuites parce que naturelles et qu'il n'y a pas de combustible à payer, sans prendre conscience de leur caractère de flux d'énergie intermittents, imposés et incontrôlables, ni de leur faible densité qui oblige à défigurer la planète par de gigantesques champs d'éoliennes et de panneaux solaires, ni des matériaux rares et non renouvelables consommés dans leur construction.

CONCLUSION : POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

UN PROGRÈS RAISONNÉ

Nos sociétés technologiques sont de plus en plus complexes ; elles sont porteuses de progrès, voire du Progrès... Mais celui-ci s'est parfois accompagné de risques, de dangers, de dominations et de contraintes. Cette dualité des effets du Progrès induit inconsciemment dans les jugements individuels des éléments émotionnels de doxa personnelle. D'où l'intérêt de recourir individuellement et collectivement à l'avis d'experts de chaque domaine, mais l'histoire récente a montré que des experts autoproclamés sont plus souvent sollicités que les véritables experts. Ils sont pourtant bien identifiés et groupés après sélection par leurs pairs dans les académies et les associations scientifiques spécialisées, munies d'un conseil scientifique. La prise en considération de leurs avis réduirait considérablement le rôle de l'émotionnel.

UN PROGRÈS CHOISI

Les choix démocratiques, dans des matières scientifiques et techniques si complexes que la plupart d'entre nous ne peuvent les maîtriser complètement, appellent de nouveaux processus de décision. Cela est d'autant plus important que les choix dans ces matières engagent notre Société dans le long terme, y compris pour les générations futures.

Il convient d'éviter que les émotions ne viennent occulter la raison. Pour cela, l'éducation, l'information et la formation sont essentielles, mais insuffisantes. Il faut renforcer le débat public fondé sur des faits ; peut-on, par exemple, dépasser la

perception que Fukushima fût un accident nucléaire alors que ce fût une catastrophe naturelle sans conséquences de santé publique significatives liées aux radiations ? Il faut favoriser les échanges et débats publics, rendre leur place aux corps intermédiaires et les entendre.

UN PROGRÈS PARTAGÉ

L'ampleur des engagements et décisions requises pour atteindre la décarbonation de nos économies, et la durée de la transition poursuivie nécessitent le plus large consensus. C'est le rôle des politiques de le faire émerger en promouvant un **Progrès raisonné, choisi et partagé** : c'est le motto et la mission de l'Académie des technologies.