

ENERGIE ET ECOLOGIE, LES TRANSITIONS HISTORIQUES

Gilbert Ruelle, Académie des technologies-Pôle énergie
et Association "Sauvons le climat"- Conseil scientifique

Les décisions de politiques en matière d'énergie et d'écologie exigent de peser face à face avec justesse des grandeurs de natures diverses, la plupart affectées d'une marge d'incertitude ou d'une probabilité de survenue. Ces récentes années, ces orientations ont mis en évidence des incohérences masquées sous de bonnes intentions et en même temps une négligence de l'avis des experts.

Il est vrai qu'une tolérance de l'incohérence est dans l'air du temps, parfois confondue avec ouverture d'esprit. Dans son best seller mondial "SAPIENS", Yuval Noah Harari écrit que "la cohérence est le terrain de jeu des esprits bornés" (page 198) et voit dans la "dissonance cognitive" une des sources de diversité des cultures. La culture scientifique doit rester à l'abri de ce vent sous peine de devenir capable de "décréter l'utopie".

En 2018, après quatre mois de débat public au printemps sur la programmation pluriannuelle de l'énergie, téléguidé par le ministre de l'écologie dans le périmètre imposé de la loi votée en 2015 gouvernant la transition énergétique et écologique, après la démission sans trop de surprise du ministre de l'écologie au cours de l'été, on peut se demander si l'origine de ce désordre ne se situe pas dans une interprétation biaisée du terme "écologie" dont l'emploi, en France, dérive régulièrement dans le sens de "sortie du nucléaire", en contradiction avec l'objectif climatique de l'accord mondial de Paris issu de la COP 21 dont la France se veut pourtant le champion.

Cette errance renouvelée dans une politique idéologique nous invite à prendre du recul en regardant dans le rétroviseur de l'histoire des relations entre l'homme et l'énergie, pour y repérer les précédentes grandes transitions historiques. C'est l'objet de la note qui suit, où nous soulignerons le mode de survenue des transitions énergétiques essentielles qui ont jalonné l'histoire, soit par une sorte de programmation répondant à un besoin vital, comme actuellement la nécessaire limitation de la dérive climatique, soit par une précieuse retombée de la réflexion scientifique d'un savant isolé (Carnot, Einstein) ou d'un groupe de chercheurs. Nous noterons au passage les craintes émergeant dans la société à chaque introduction d'une nouvelle technologie.

Cette présentation scientifique¹ en forme de lecture de vacances d'été reste à la portée de la plupart des lecteurs intéressés par ce thème des relations entre l'énergie et le citoyen.

D'autres regards que celui de l'énergie sur l'aventure humaine sont certes possibles sur d'autres thèmes, qui mettraient en évidence d'autres transitions, par exemple un thème "Homme et alimentation", pourrait, à partir de la période "cueilleur chasseur pêcheur", retenir les transitions "Développement de l'agriculture", puis "chimie et agriculture" pour ouvrir les débats actuels sur les pesticides et l'écologie. Dans le strict contexte actuel des choix énergétiques et de la dérive climatique, l'auteur n'a pas jugé nécessaire de retenir ici "agriculture" comme une des transitions énergétiques essentielles, mais seulement les modes nouveaux de production d'énergie qui ont favorisé le développement de l'agriculture, comme le cheval et les moulins.

Nota : Les lecteur peut n'avoir qu'un souvenir un peu flou de ses connaissances scolaires sur l'énergie, celles de base seront rappelées par endroit en italiques. De même, les connaissances actuelles sur l'énergie sont aussi plus intimes qu'à l'époque des deux dernières grandes transitions, vues sous l'angle des 4 forces (ou interactions) fondamentales de l'univers dont seule la force de gravitation était connue à l'époque de Newton; les commentaires nécessaires sous cet angle seront également en italiques.

La première partie de cette analyse a été présentée à la session de septembre 2018 de la Commission énergie et changement climatique (CECC) de l'Académie des technologies. À la suite de cette présentation, son Président avait suggéré de poursuivre la réflexion sur les possibles justifications rationnelles des décideurs politiques s'orientant vers des politiques différentes. C'est l'objet de la [partie 2](#) présentée à la CECC début 2019.

¹ Ce texte a été relu et amélioré par Hervé Nifenecker, Président d'honneur de "Sauvons le climat-SLC", Jean Poitou, climatologue, Président du conseil scientifique de SLC, Jean-Pierre Pervès, Jacques Treiner, Jean Fluchère, Bernard Durand et et d'autres membres de ce conseil scientifique que Gilbert Ruelle remercie ici pour leur coopération amicale.

LES TRANSITIONS HISTORIQUES

Nous roulons en voiture confortable, dont le GPS nous guide vers le lieu qu'on lui indique, en écoutant la radio qui nous informe de ce qui se passe dans le monde, Nous en voyons les images à la télévision. Un téléphone portable en poche, nous pouvons parler avec un ami en Chine, le rencontrer en dix heures d'avion. Nous voyons clair la nuit nous avons chaud l'hiver, les maladies ont moins de prise, la durée de vie s'allonge, les hommes se font toujours des guerres avec des armes de plus en plus sophistiquées, mais les plus épouvantables le sont tellement que personne n'ose plus s'en servir.

Nous vivons en ce 21^e siècle sur la planète Terre, où une catégorie d'êtres vivants, l'homme, s'est beaucoup développée dans les deux derniers siècles, en nombre et en confort de vie, parfois aux dépens des autres êtres vivants dont il a asservi la plupart pour s'en nourrir et dont il conserve dans des réserves quelques exemplaires restés sauvages pour faire apprécier la biodiversité à ses enfants.

Cette domination récente de l'homme sur la nature a pu s'établir, non pas parce qu'il avait plus de force physique, mais parce qu'il s'est trouvé muni d'un cerveau un peu plus performant qui lui a permis d'analyser le monde qu'il avait sous les yeux, d'en comprendre peu à peu les mécanismes, et d'inventer des outils démultipliant l'effet de ses actions sur ce monde. La technologie permet maintenant de détecter les plus subtiles particules et permet à la science de commencer à comprendre comment fonctionne cet univers.

Nous pensons savoir qu'il aurait eu un début il y a environ 13,7 milliards d'années, sans toutefois comprendre à partir de quoi, que ce n'est qu'après 8 ou 9 milliards d'années de bousculades cosmiques que cet univers aurait enfanté notre système solaire et notre Terre, il y a 4,57 milliards d'années, que beaucoup plus tard encore, dans un bouillonnement de vies de toutes natures, les premiers êtres vivants ressemblant à des hommes préhistoriques y seraient apparus il y a 4 à 5 millions d'années seulement, et que ce n'est qu'encore beaucoup plus tardivement, depuis seulement deux à trois petits siècles que nous avons commencé à jouir de ce confort de vie technologiquement avancée qui ne fait que s'accélérer de manière presque explosive. Pourtant la roue était inventée depuis cinq mille ans, et des pôles historiques de civilisation avaient pourtant laissé des traces en Chine, en Inde, en Égypte et au Moyen Orient, en Grèce et à Rome puis dans toute l'Europe, sans pour autant déclencher cet emballement de progrès technique auquel nous assistons aujourd'hui.

Question : Pourquoi une apparition aussi tardive du faciès technologique de notre vie moderne, de son "confort", et pourquoi son emballement actuel ? Comment s'explique une telle accélération dans les trois derniers siècles seulement ?

Réponse : Si nous avons atteint ce style de vie technologique et son "confort", c'est parce que nous avons su mettre à notre disposition une quantité suffisante et finement contrôlée d'ÉNERGIE, en franchissant quelques seuils principaux que l'on nomme en 2018 TRANSITIONS ÉNERGETIQUES, dont les trois plus importantes ne datent que de deux siècles et ont été franchies très rapidement.

Nous ne ferons qu'effleurer les premières de ces transitions, qui sont très anciennes et ont été très lentes, s'étalant sur des millénaires, à des dates décalées de plusieurs siècles d'une région à l'autre du monde, et ne faisant que domestiquer pour l'usage de l'homme des phénomènes naturels observables dans la nature comme l'interaction gravitationnelle et le rayonnement solaire, en améliorant simplement leur efficacité.

Nous analyserons plus en détail les trois dernières transitions énergétiques qui ont été des transitions rapides et puissantes, qui ont bouleversé les modes de vie des hommes en un seul siècle pour chacune d'elles, ce qui permet de comprendre cette arrivée si tardive du faciès technologique de notre société actuelle et son accélération.

Ces trois puissantes transitions ne sont plus des améliorations de ce que la nature sait faire et met sous les yeux des hommes, mais des aménagements technologiques créés par l'homme, des actes néguentropiques que la nature ne fait pas, à partir de la connaissance récemment acquise des autres interactions fondamentales (interactions électrique et nucléaire).

PREMIERE TRANSITION LENTE : LA DOMESTICATION DU FEU.

Le premier scoop humain dans ce domaine a été la maîtrise du **feu**. On ne peut évidemment pas parler d'invention du feu pour ces êtres **primitifs** qui avaient sous leurs yeux les feux de forêts déclenchés par la foudre, ce fut une domestication répondant à un besoin essentiel de ces hommes préhistoriques pour s'éclairer et se chauffer dans les cavernes où ils se protégeaient des carnivores. L'instinct de survie y était plus nécessaire qu'une pensée profonde, c'est pourquoi cette domestication est située vers - 450.000 alors que l'homo n'a été qualifié de sapiens que vers -200.000. **On peut pourtant soutenir que ce fut la première transition énergétique, dont le besoin impératif constitua probablement la première programmation pluriannuelle.**

En fait, le feu ne leur apporta pas beaucoup plus d'énergie dans son sens étymologique de travail (**erg**, werk, work). Elle fut plutôt une transition écologique qui leur apporta plus de sécurité, une température plus clémente, et leur permit de cuire leurs aliments et de durcir leurs pointes de flèches pour mieux se défendre et chasser. Puis, la pensée venant, ils s'aperçurent qu'en faisant beaucoup d'enfants l'alimentation qui conditionnait leur développement ne pouvait plus être assurée seulement par cueillette, chasse et pêche, et que **leur force était trop limitée** pour effectuer les travaux qu'ils ambitionnaient : abattre et traîner des arbres, labourer la terre pour y pratiquer l'agriculture, tuer davantage d'animaux sauvages pour mieux se nourrir.

2^{ème} TRANSITION LENTE: AGRICULTURE, DOMESTICATION DES ANIMAUX, MOULINS.

Environ 8000 ans avant notre ère, un début d'agriculture amorça un immense changement dans la vie des hommes et leurs structures sociales. On peut certes considérer que c'est une première forme de maîtrise de l'énergie solaire, mais ce changement dépasse largement le cadre de l'énergie, qui lui est adjacent sous plusieurs angles, car on peut considérer que l'énergie apportée par une alimentation plus abondante par l'agriculture (en gros, 2500 kcal par jour) a permis de passer d'une civilisation de chasseurs-cueilleurs à des civilisations sédentaires où de grandes villes ont pu se développer sur la base de surplus agricoles, dégageant du temps pour d'autres activités comme la métallurgie, les arts, et des construire des empires. Une forte montée de la population au néolithique en est le témoin, répétée plus tard au Moyen-âge avec les moulins.

Sous l'angle strict de l'énergie-travail, le développement de l'agriculture bénéficia de l'apport d'énergies extérieures à l'homme, par la domestication d'animaux, dont le cheval vers – 3500. Plus tard encore, l'apport d'énergie des moulins à vent et à eau accentua cet apport, particulièrement au moyen âge.

Les hommes trouvèrent d'abord cette force qui leur manquait en convaincant quelques-uns de ces animaux sauvages plus forts qu'eux de les aider : le cheval, le buffle, le chameau, l'éléphant et quelques autres (sans oublier qu'ils utilisèrent aussi la force collective d'une partie de leurs semblables qu'ils réduisirent en esclavage et bâtirent d'immenses monuments en forme de pyramides que nous allons visiter aujourd'hui en Egypte ou au Mexique). Cette domestication de l'homme par l'homme a perduré jusqu'à très récemment et largement contribué au développement de l'agriculture dans certains pays.

Parmi les animaux domestiqués, le cheval prit très vite une place dominante dans la vie de l'homme, tant sa connivence avec l'homme par la facilité de pilotage de sa force et de sa vitesse lui a assuré ce règne de plusieurs millénaires en auxiliaire privilégié de l'homme. Cette seconde PPE fut tellement pluriannuelle qu'elle dura plus de 5 millénaires, où les hommes utilisaient la force des animaux domestiqués pour les gros travaux, les transports et la guerre, et en même temps le feu pour se chauffer, s'éclairer, cuire leurs aliments, fondre les métaux.

LA CIVILISATION DU CHEVAL

Les rois et les princes empilaient des pierres joliment taillées pour construire des châteaux dans de grands parcs où ils invitaient leurs amis châtelains-cavaliers à des chasses à courre ; ils partaient faire la guerre à cheval, leurs épouses voyageaient en calèche tirée par un attelage de chevaux pendant que les chevaux des paysans assuraient la subsistance de tous par leur travail. Ce noble animal a aussi accepté les tâches les plus fastidieuses, battre du grain en marchant sur place sur un tapis-tamis roulant où se déversaient les gerbes de blé, puiser de l'eau dans une noria où son cousin l'âne tourne encore en Afrique.

Et on peut même dire que le cheval a rapidement enrichi l'Europe par l'or d'Amérique en permettant une victoire facile des conquistadors espagnols sur les Aztèques et Incas, ces peuples amérindiens qui ignoraient jusqu'alors alors cet animal chevauché par des hommes étranges qui leur inspira une terreur sacrée paralysant leur défense.

Au fil de ces millénaires de coopération étroite entre l'homme et le cheval, certains avaient aussi eu l'idée, pour moulin du grain ou broyer des olives, de demander aux rivières et au vent l'énergie qu'ils pouvaient en extraire par des moulins, parfois du même ordre de grandeur que celle du cheval. Les moulins à vent étaient certes moins pilotables que le cheval car le vent est très variable (...meunier, tu dors, ton moulin va trop vite, ton moulin va trop fort...), mais ce n'était pas bien grave, la production de farine ou d'huile pouvant se stocker ou s'interrompre sans grand inconvénient, et c'était si romantique depuis Alfonse Daudet.

Là où il y avait des rivières, le moulin à eau était plus efficace, et entre le 11ème et le 13ème siècle, l'Europe s'est équipée de moulins à eau sur tous les cours d'eau accessibles, avec en gros un moulin tous les 2 km, favorisant le développement de l'agriculture et de la métallurgie.

Quant au soleil, l'énergie thermique de son rayonnement était directement utilisée dans les activités agricoles pour le séchage, du foin, des céréales, des haricots et autres fruits, de la viande et des poissons, permettant leur conservation d'une saison à l'autre.

Durant ces millénaires, un système énergétique s'était donc construit à l'échelle de puissance et d'énergie du cheval, d'une enviable écologie verte : décentralisé, bâti sur une autoproduction sans importation de matière énergétique. Le travail était plus efficace, l'unité de puissance au travail qui était "l'homme" étant devenue le "cheval", le cheval mangeait l'herbe du pré, et l'autoconsommation locale de cette énergie d'un ou plusieurs chevaux par famille d'agriculteurs moyens des villages, sans besoin d'un réseau de distribution d'énergie. Verte aussi par ces sources animales n'émettant pas de CO₂, mais toutefois un peu de méthane digestif.

Pendant ces millénaires, ils utilisèrent la force des animaux domestiqués pour les gros travaux, Ils utilisaient en même temps le feu pour se chauffer, s'éclairer, cuire leurs aliments, fondre les métaux, mais ignoraient que la chaleur et le travail étaient deux formes d'une même entité : l'énergie.

Il restait encore des traces de ce très long règne du cheval dans le domaine de la force avant la dernière guerre mondiale, lorsque Citroën sorti sa "15 chevaux citron", et encore après cette dernière guerre quand Renault sorti sa première voiture populaire dans les années cinquante, il la nomma "La quatre chevaux", et aujourd'hui encore, les catalogues indiquent la puissance des voitures en chevaux, héritier fiscal du cheval-vapeur bien qu'elles n'utilisent ni cheval ni vapeur.

La reconnaissance, aussi bien que la mesure, de l'importance du cheval dans le domaine de l'énergie devint en effet officielle vers la fin de son règne, lors de l'invention de la machine à vapeur qui le tua, par l'adoption comme unité de puissance du *cheval-vapeur*, qui montre bien que la puissance bien connue du cheval était une référence compréhensible par tout le monde.

Si le nom du cheval perdura encore quelques siècles à travers cette unité populaire de puissance, c'est pourtant l'invention de la machine à vapeur qui déclencha la fin de son règne et le démarrage de cet emballement technologique qui s'amplifia ensuite quelques décennies plus tard avec l'invention de l'électricité.

3^{ème} TRANSITION - ENERGETIQUE, PUISSANTE, RAPIDE, ET NEGUENTROPIQUE- : LA METAMORPHOSE DE LA CHALEUR EN TRAVAIL

Ce n'était pourtant pas une invention géniale exigeant la profondeur de pensée d'un Einstein ; Denis Papin fut plutôt un observateur attentif en observant vers 1670 que la vapeur émise par l'eau qui bouillait dans sa casserole soulevait le couvercle.

Tiens, se dit-il, y aurait-il une relation entre la chaleur et la mécanique ?

Il n'alla pas beaucoup plus loin car il remarqua aussi qu'en verrouillant le couvercle, la pression et la température de l'eau augmentaient, permettant au-delà des 100 degrés Celsius habituels, de cuire plus rapidement les aliments ; il fut donc plutôt l'inventeur de la cocotte minute.

Après un siècle d'essais de machines à vapeur artisanales de divers type, ce fut Carnot qui comprit vers 1820 le mécanisme transformation de la chaleur en travail, en montrant qu'elle était impossible avec une seule source de chaleur, mais qu'il en fallait deux, à deux températures différentes, l'une chaude et l'autre plus froide, et qu'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, on pouvait espérer récupérer une

partie **ordonnée, moins entropique**, de cette énergie d'agitation sous forme d'énergie mécanique, généralement plus précieuse car utilisable pour des travaux divers, avec un rendement en énergie au mieux égal à

$$1 - T_f / T_c.$$

Cette formule très simple montre bien qu'à partir d'une seule source ($T_c=T_f$), le rendement de la transformation de chaleur en travail est nul, donc on ne peut extraire d'énergie mécanique d'une seule source de chaleur, aussi haute que soit sa température. 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 $T=973$), le rendement plafonne vers 0,7. Dans beaucoup de cas, il est plutôt de l'ordre de 0,3 à 0,4.

Mais cela permit tout de même 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 mécaniques de plusieurs centaines, plusieurs milliers, et aujourd'hui jusqu'à 2 millions de chevaux-vapeur. 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, tout ce qui peut brûler. On n'est donc plus à l'échelle de l'animal, 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.

CHANGEMENT DE REGNE, LE NOUVEAU ROI EST LE FEU

Fini le règne du cheval. Si avec un grand bidon en tôle d'acier suffisamment épaisse, rempli d'eau chauffée et vaporisée sous pression par une flamme de quelque chose qui brûle en dessous, on peut produire des puissances mécaniques de plusieurs 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 qui est le cas aujourd'hui.

Comment exploiter pratiquement cette loi de Carnot pour tirer de l'énergie mécanique de la chaleur ? L'idée la plus simple était d'utiliser la vapeur elle-même comme source chaude, et puisqu'on avait dans l'air environnant une source plus froide, il suffisait de percer la chaudière et de laisser échapper la vapeur sous pression vers des cylindres munis de pistons mobiles qu'elle poussait, et qui, par un jeu de bielles et manivelles un peu semblable au jeu de jambes d'un cycliste qui pédale, transmettait le mouvement alternatif des pistons en mouvement rotatif, soit à des poulies entraînant par courroies des machines-outils de l'industrie naissante, soit aux roues des premières locomotives à vapeur. 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.

Les premières peurs technologiques

Toute technologie nouvelle inspirant de l'enthousiasme chez les uns et de la crainte chez les autres, on vit à l'Assemblée Nationale se lever le député Arago, pour prophétiser le pire avenir aux chemins de fer : pleurésies, fluxions de poitrine, explosions de locomotives, et autres catastrophes.

Plus tard, pour les plus grandes puissances électriques après l'invention de l'électricité, les machines à pistons furent remplacées par des turbines à vapeur générant directement un mouvement rotatif où la chaleur va se transformer en énergie mécanique, puis, par un alternateur, en énergie électrique encore plus précieuse que l'énergie mécanique.

Dans cet objectif réussi de disposer d'énergie mécanique, puis électrique, abondante à partir de sources de chaleur facilement trouvables dans la nature, ce qui brûle sous la chaudière pour entretenir ce feu est secondaire et a varié avec les opportunités géographiques, historiques et économiques : bois, et tous les végétaux plus ou moins fossilisés au cours des ères successives de la Terre sous forme de lignite, charbon, pétrole, gaz naturel, et les comptes nationaux de consommation d'énergie se sont tenu successivement en Mtec (millions de tonnes de charbon), puis avec le développement de l'automobile en Mtep (millions de tonnes de pétrole).

Ce fut d'abord et surtout du charbon parce qu'il y en avait un peu partout à portée de transport, et ça l'est encore aujourd'hui où le charbon reste la principale des sources d'énergie électriques (80%). Tous ces carburants fossiles sont des composés carbonés, allant du charbon, pouding de restes végétaux contenant du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote, du soufre, au pétrole et à l'hydrocarbure le plus pur le gaz naturel (méthane CH₄), émettant tous en brûlant du dioxyde de carbone CO₂ dont l'accumulation dans l'atmosphère se révèle, hélas, être l'agent principal du réchauffement climatique.

Cette ruée vers tous les combustibles disponibles sur Terre a permis le développement économique des 19^e et 20^e siècles, mais en ce début de 21^{ème} siècle, la conscience croissante d'un risque climatique aux perspectives catastrophiques remet en question la boulimie énergétique, et surtout le choix judicieux des sources d'énergie alimentant les principaux secteurs d'activité – transports, habitat, production électrique, industrie – afin de réduire les émissions de CO₂ qui provient essentiellement de l'utilisation du phénomène physique de combustion pour générer la chaleur, principale mère des autres formes d'énergie (mécanique, électrique).

L'optimisation de la formule de Carnot $T_c > T_f$ vers de hautes T_c a aussi incité, pour obtenir un meilleur rendement, à utiliser directement les gaz de combustion très chauds comme fluide moteur, plutôt que de la vapeur, soit en turbines à gaz, soit en moteur à explosion à pistons dans l'automobile, dont le développement fantastique fait du secteur des transports un des trois plus grands responsables du réchauffement climatique dans le monde, à côté de l'habitat et des centrales électriques à combustible fossile.

Cette **métamorphose de la chaleur en travail** a permis d'ajouter aux seules énergies renouvelables utilisées jusqu'alors (force de l'homme et des animaux, moulins à eau et à vent) des énergies beaucoup plus importantes issues de la chaleur de combustion, multipliant les sources d'énergie et les puissances disponibles pour les travaux humains, passant soudain de quelques chevaux à de centaines ou des milliers de chevaux. Après les soubresauts sociaux des débuts de l'ère industrielle et malgré deux guerres mondiales, la population s'est enrichie et accrue.

Aidée par les progrès de la médecine, son espérance de vie s'est également allongée.

On lit sur la figure 1 que la population mondiale est passée de 1 à 7 milliards en environ 2 siècles, et frôlera 8 milliards vers 2020. Cette croissance de la population a été étonnamment accompagnée d'une croissance simultanée de sa richesse, de son espérance de durée de vie et de ses connaissances aussi bien fondamentales qu'appliquées, peignant sur notre civilisation actuelle un visage de confort très technologique. Au cours de la seconde moitié du vingtième siècle, la consommation mondiale d'énergie a quadruplé, la population mondiale a doublé.

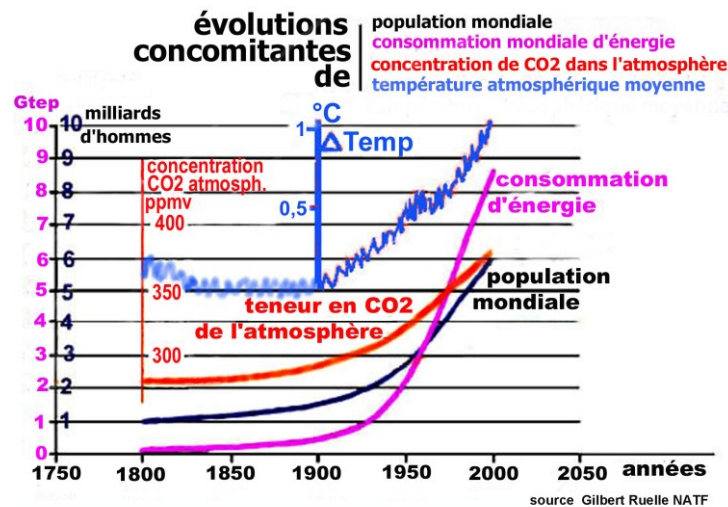


Figure 1 (extraite des travaux de l'Académie des technologies CECC 2008).

Nota : les oscillations de la courbe de température imagent l'incertitude autour de sa valeur moyenne

On est frappé par la similitude des quatre courbes : population mondiale, consommation d'énergie, taux de CO₂ dans l'atmosphère et réchauffement climatique, qui prennent leur envolée ensemble au cours de la première moitié du vingtième siècle, et qui s'accroissent dans la seconde.

Notons enfin que cette transition énergétique d'une ampleur exceptionnelle ne fut pas le fruit d'une programmation pluriannuelle de l'énergie, qui était restée pendant cinq millénaires à l'échelle du cheval sans que personne ne se plaigne trop de cette société très globalement paysanne et écologique où la durée de vie moyenne était de l'ordre de la moitié de celle que nous connaissons actuellement. Ce fut, comme pour d'autres par la suite, le résultat de l'élargissement de la pensée scientifique de quelques hommes.

RAFRAÎCHISSEMENT DES CONNAISSANCES DE BASE

Force, travail, énergie, puissance, chaleur, des notions qui ont jalonné le long chemin menant du cheval à la machine à vapeur. Le grand public (et aussi certains journalistes) a parfois des idées un peu confuses sur la définition de ces grandeurs qu'ils ne manipulent pas tous les jours, et il n'est peut-être pas inutile de les rappeler, en les reliant aux grandeurs de base que sont l'espace, imagé par la longueur L , la matière, imagée par sa masse M , le temps T , et en présentant au lecteur averti des excuses pour des rappels aussi élémentaires de "l'analyse dimensionnelle" que l'on enseigne au collège ou au lycée.

- Chacun sait depuis l'école primaire qu'une surface d'un rectangle est le produit de ses deux côtés, dont la nature profonde est d'être des longueurs L , ce produit $L \times L$, soit L^2 constitue la nature profonde d'une surface, que l'on appelle sa "dimension" L^2 .

- Un volume a donc une "dimension" L^3 .

- Une vitesse est une distance L parcourue en un temps T , soit L / T , ou $L.T^{-1}$.

- Une accélération A est un changement de vitesse en un temps donné $L.T^{-2}$.

- La force F , nous y arrivons, est d'après la loi physique qui, de fait, la définit par son action sur la matière, est ce qui permet d'appliquer à une masse M une accélération A , donc $F = M.L.T^{-2}$.

Souvenez-vous de l'école : une masse de 1 kilogramme, lâchée dans le vide, tombe de plus en plus vite, avec une accélération de 9,81 mètres par seconde par seconde, accélération de la pesanteur que l'on a nommée g (comme gravitation), sous l'effet de la force d'attraction de notre Terre. Chaque seconde, la vitesse augmente de 9,81 m/s.

Mais on peut faire plusieurs choses avec des forces, elles ne sont pas toujours en situation d'accélérer des masses. Si vous posez une masse de 1 kg sur le sol, elle ne tombe pas plus bas parce que le sol exerce une force de réaction égale et opposée et rien ne bouge. Si vous interposez votre main entre le kg et le sol, vous sentez un écrasement des petits ressorts que constituent les muscles de votre main et forment en se tendant la force de réaction, mais vous ne vous fatiguez pas, vous pourriez vous endormir dans cette position, vous ne dépensez pas d'énergie.

- Si maintenant vous soulevez verticalement ce poids de 1 mètre, vous dépensez de l'énergie pour effectuer un travail de 1kilogrammètre consistant à lutter contre la force d'attraction de la Terre sur une hauteur de 1 mètre.

La "dimension" de l'énergie (ou travail) est donc $E = F.L$, soit $E = M.L^2.T^{-2}$.

- La puissance, parfois confondue par quelque journaliste avec l'énergie, est l'aptitude à fournir une énergie donnée en un temps donné donc $P = M.L^2.T^{-3}$.

Rappelons les unités internationales de ces grandeurs : la force exprimée en Newton (N), l'énergie (ou travail ou chaleur) en Joule ($1J = 1N \times 1mètre$), la puissance en Watt ($1 W = 1J/s$), et leurs multiples par les préfixes kilo k (10^3), Méga M (10^6), Giga G (10^9). Rappelons aussi comment les unités "historiques" se relient à ces unités : Téra T (10^{12}).

Force : 1 Newton (N) = 1 kg poids/9.81 = 102 grammes poids.

Energie : 1 kilogrammètre = 9.81 Joule. 1 kilowattheure = 3 600 kilojoules.

Puissance : 1 cheval-vapeur (CV) = 0,735 kW > 1 kW = 1,36 CV.

Soulignons aussi que le joule quantifie aussi bien l'énergie que la quantité de chaleur, plus souvent exprimée en calories ($1 C = 4,18 J$).

Pour le lecteur qui souhaite compléter davantage ses [Hlk522352176](#) connaissances sur les concepts associés à l'énergie, notamment celui fondamental d'**ENTROPIE**, il trouvera [ICI](#) (par clic gauche ou Ctrl + clic gauche suivant format d'édition) l'annexe zéro du rapport de synthèse des travaux de la Commission énergie et changement climatique de l'Académie des technologies de 2000 à 2008.

4^{ème} TRANSITION- ENERGETIQUE, PUISSANTE, RAPIDE- : DOMESTICATION DE L'ELECTRICITE

Cette domestication de l'électricité provoqua au 20^{ème} siècle, la seconde révolution industrielle en accélérant la domestication de l'énergie par sa mise sous une forme transportable et divisible, encore plus précieuse que sa forme mécanique.

Elle fut le fruit d'une volonté de la société de mieux comprendre ces phénomènes électriques et magnétiques bizarres qui étaient jusqu'alors plutôt des jeux de société. Cette domestication ne fut pas une révélation, mais le fruit d'un long travail pluri décennal.

On connaissait déjà diverses manifestations de l'électricité, dont bien sûr les spectaculaires éclairs d'orage entre nuages, et la foudre qui provoquait parfois des incendies au sol. L'électricité faisait aussi partie de certains jeux de société où l'on faisait sautiller des petits papiers sur une table en frottant un morceau d'ambre (électron en grec). En frottant fort, on pouvait en faire jaillir quelques étincelles évoquant les éclairs d'orage. De son côté, le magnétisme était connu par les aimants en magnétite que l'on trouvait dans la nature et qui attiraient le fer.

Mais, l'histoire se répétant, de même qu'il avait fallu attendre 1820 et Carnot pour comprendre la relation chaleur-énergie, il a fallu attendre encore quelques décennies supplémentaires pour comprendre la profonde imbrication entre courant électrique et champ magnétique, l'un portant l'autre par nature, les variations de l'autre dans les temps créant l'un. Il est vrai que c'était plus compliqué que pour le couple chaleur/travail, et l'électromagnétisme est le fruit des travaux tout au long du 19^e siècle d'inventeurs dont les noms jalonnent l'histoire de la physique : Ampère, Coulomb, Volta, Watt, Franklin, Ohm, Gauss, Oersted, Faraday, Edison, Maxwell, Tesla...

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 (courant électrique) entre les atomes de certains métaux dits conducteurs, à partir de certaines réactions chimiques (piles) libérant des électrons.

Il a fallu observer avec Oersted que ce courant électrique déviait l'aiguille d'une boussole, donc que l'électricité portait du magnétisme.

Il a fallu comprendre la notion de champ, comprendre la perturbation qu'y apporte la matière 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 électro-aimants beaucoup plus puissants que les aimants naturels.

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.

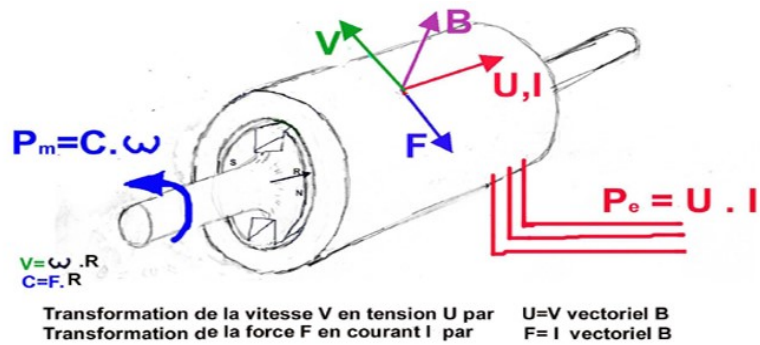
Il a fallu acquérir avec Tesla une vision de la grande électrotechnique moderne en faisant tourner des électroaimants au bout d'une turbine pour créer du courant alternatif triphasé, visionnaire de la structure rationnelle de toutes les machines électriques tournantes, alternateurs et moteurs, ainsi que du transport longue distance à haute tension de l'énergie sous sa forme électrique U.I, 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.

La puissance mécanique dont on dispose sur l'arbre d'une turbine sous la forme $C.\Omega$ d'un couple C tournant à la vitesse angulaire Ω peut être utilisée sous cette forme tant qu'il s'agit de puissances moyennes (propulsion marine), mais pour les grandes puissances, il n'y a pas d'autre usage direct de cette puissance monolithique que d'entraîner un alternateur (figure 1), qui est un aménagement électromagnétique de l'espace métamorphosant cette puissance mécanique $C.\Omega$ en puissance électrique U.I, par les deux transformations de la vitesse en tension et du couple en courant par les deux relations vectorielles:

- de la vitesse périphérique V ($\Omega.R$) en tension U par $\vec{U} = \vec{V} \wedge \vec{B}$

- de la force tangentielle ($F = C/R$) en courant I , par $\vec{F} = \vec{I} \wedge \vec{B}$

Figure 1 : Transformation de puissance mécanique en puissance électrique



La grande peur du courant alternatif

A technologie nouvelle, peur nouvelle. Le courant continu était vers 1890 la forme naturelle sous laquelle l'électricité avait commencé son développement après l'apparition de la pile de Volta et des batteries chimiques, de la galvanoplastie, de l'invention par Thomas Edison de l'ampoule à incandescence à filament de carbone sous 100 volts continus remplaçant l'éclairage public au gaz.

La production d'électricité était assurée par des petites dynamos à courant continu fonctionnant en parallèle, assistées par des batteries de secours. Thomas Edison, industriel avisé, Président fondateur de Général Electric (GE), fut le grand défenseur du courant continu sur lequel il avait fondé les premières réalisations à l'échelle industrielle, lampes et dynamos, et détenait des brevets.

Nicolas Tesla, jeune et brillant ingénieur croate immigré aux Etats-Unis, eut très vite l'intuition du champ d'applications beaucoup plus vaste que pourrait couvrir le courant alternatif qui permet le transport de l'énergie électrique $U \cdot I$ à longue distance en augmentant la tension U par un nouvel appareil très simple nommé transformateur, réduisant d'autant le courant I , permettant le transport par de des câbles aériens légers en aluminium. Il eu aussi la vision des machines synchrones et asynchrones, plus simple que les dynamos à collecteur à lames, et imagina la structure rationnelle des alternateurs modernes de grande puissance localisés en centrales électriques.

Edison entrevit la concurrence de son juteux 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 un réseau. Il entreprit une campagne de dénigrement du courant alternatif, propageant des informations erronées sur de nombreux accidents mortels impliquant le courant alternatif.

Il envoya ses techniciens parcourir les foires où ils électrocutaient en public des petits animaux, chiens et chats vagabonds, puis du bétail et des chevaux de réformes. Il lança un nouveau mot "whestingoused" pour signifier "exécuté par électrocution" en discréditant en même temps sa compagnie concurrente 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, mais il ne put empêcher le développement du courant alternatif et des réseaux électriques à haute tension.

Le coup de grâce au courant continu² fut asséné en 1893 par l'attribution à Westinghouse du contrat d'équipement de la première centrale hydroélectrique des chutes du Niagara, avec alternateurs étudiés par Tesla en alternatif triphasé à 25 Hz, et transport aérien en haute tension vers Buffalo.

² Le courant continu réapparaîtra un petit siècle plus tard pour quelques transports à très longue distance sous très haute tension (~1 MV), ou souterrains.

Récapitulons les apports essentiels de ces deux transitions énergétiques majeures

1. L'invention de la machine à vapeur, expression courante tristounette pour désigner **une découverte énorme : l'obtention d'énergie mécanique à partir de la chaleur, ce qui accrut considérablement la ressource de cette précieuse énergie mécanique** que l'homme ne trouvait jusqu'alors qu'en quantités modestes dans la force mécanique directe des chevaux (et autres bœufs ou éléphants), ainsi que dans la force gravitationnelle par les moulins à eau et à vent. C'est l'extension directe de l'usage du feu pour s'éclairer et se chauffer en le faisant maintenant travailler pour l'homme, et comme il y a tant de choses à brûler sur Terre, cela multiplia presque à l'infini le potentiel de travail mécanique au service de l'homme.

En savoir plus ? Pourquoi peut-on extraire tant d'énergie du phénomène de combustion malgré un rendement de Carnot plutôt médiocre ?

Réponse: Parce que la combustion est un phénomène chimique d'oxydation du carbone et que les réactions chimiques sont gouvernées par l'interaction électrique lors des échanges d'électrons entre deux éléments chimiques (ici C et O) pour en former un ou deux autres (ici CO₂), libérant la différence d'énergie de liaison de cette interaction. Voir "[force électromagnétique "ICI](#)" (Ctrl+clic gauche) très puissante, comme expliqué dans l'hypertexte, et son affaiblissement par le rendement de Carnot au passage chaleur>travail n'en modifie guère l'ordre de grandeur.

Les puissances utilisables pour les travaux humains sont passées soudain de quelques chevaux à des centaines ou des milliers de chevaux. La ruée vers tous les combustibles disponibles sur Terre a permis le développement économique des 19^e et 20^e siècles : La consommation d'énergie s'est envolée. Aidée par les progrès de la médecine, la population mondiale est passée de 1 à plus de 6 milliards en 200 ans, et frôlera 8 milliards vers 2020. Au cours de la seconde moitié du vingtième siècle, alors que la population mondiale a plus que doublé, la consommation mondiale d'énergie a plus que quadruplé.

2. l'électricité n'est pas une source d'énergie, mais un vecteur ; C'est une mise en forme astucieuse d'énergie. Elle n'augmente pas la ressource en énergie puisqu'elle utilise les mêmes interactions fondamentales que la combustion, mais lui confère une flexibilité sans égale en la mettant sous la forme électrique transportable et fractionnable.

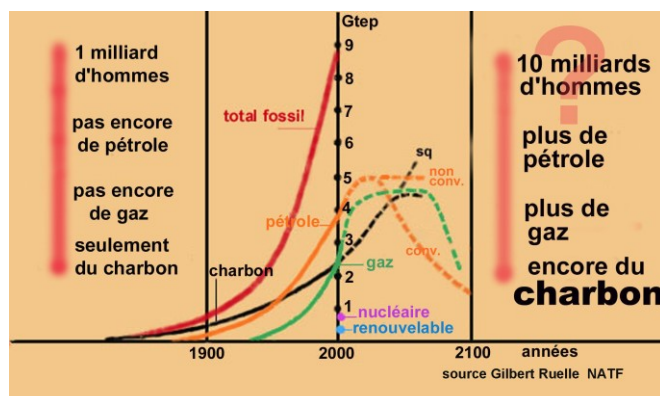
Répetons que ce sont ces deux transitions énergétiques fondamentales qui sont la cause essentielle de l'entrée de l'humanité dans l'ère moderne et son "confort" de vie croissant au cours des deux derniers siècles.

Doit-on s'inquiéter de cette envolée de la consommation d'énergie, alors que la plupart de ses conséquences ont jusqu'alors été positives pour l'humanité ?

Oui, il y a matière à s'inquiéter, car cette envolée qui a permis le développement économique des 19^e et 20^e siècles a aussi entraîné une ruée vers tous les combustibles disponibles sur Terre, bois, charbon, pétrole, gaz.

- La première inquiétude a porté sur les réserves. Aurait-on assez de combustibles fossiles pour continuer ce développement ? Jusqu'au milieu du vingtième siècle, on ne savait pas chauffer l'eau d'une chaudière autrement que par une combustion émettant du CO₂, ce CO₂ accumulé pendant une durée de vie de l'ordre du siècle est apparu à partir de 1990 comme un danger mondial par le réchauffement cumulatif du climat promettant des conséquences catastrophiques.

Figure 3



- Le réchauffement climatique a donc surclassé la crainte d'insuffisance des réserves fossiles.

"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 inhabitable et/ou incultivable 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.

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 de réorienter la production et la consommation d'énergie vers des modes exempts d'émission de dioxyde de carbone (le principal responsable de l'accroissement de l'effet de serre) et de méthane" (citation de Jean Poitou, climatologue, Président du Conseil scientifique de Sauvons le climat SLC).

Inutile de détailler davantage ces conséquences, il suffit de constater qu'elles ont suffisamment inquiété les climatologues du monde entier réunis dans le GIEC, créé en 1990 pour avoir réussi à convaincre la grande majorité des nations de se grouper dans une action commune accordant la priorité mondiale à la limitation à 2°C le réchauffement climatique en 2100 par rapport à 1990, en faisant le point chaque année sur l'avancement des actions dans une COP (Conférence Of the Parties)

En France, la majeure partie des émissions de dioxyde de carbone provient des transports et du chauffage des bâtiments (pétrole et gaz). Une transition énergétique qui vise à protéger le climat se doit donc prioritairement de réduire drastiquement l'utilisation de combustibles fossiles dans ces deux domaines. Par rapport à ces sources majeures de gaz à effet de serre, notre production d'électricité n'apporte qu'une faible contribution. Ce n'est donc pas sur elle que cette priorité doit s'appliquer.

5ème TRANSITION ENERGETIQUE : DOMESTICATION DE L'ENERGIE NUCLEAIRE

Préalable scientifique sur les interactions (ou forces) fondamentales de la nature, permettant de comprendre le principe de fonctionnement des centrales électronucléaires

1. Force gravitationnelle : Déjà rappelée en page 10,

2. Force électrique : Déjà rappelée en page 10

3. Force "forte": En pénétrant dans la structure intime du noyau des atomes, protons et neutrons eux-mêmes composés de quarks, un troisième mode de liaison est apparu dans le milieu du vingtième siècle, reliant ces nucléons entre eux, nommée sans originalité interaction nucléaire "forte", ou de manière simplifiée "force forte", extrêmement puissante (10^{38} fois plus que la gravité) une sorte de colle qui les associe, mais dont la portée est si courte (de l'ordre de 10^{-13} cm) qu'elle ne dépasse pas le noyau de l'atome, c'est pourquoi elle passe également inaperçue à notre échelle où on ne ressent pas directement la force forte parce que sa portée est trop courte, il n'y a plus de force électrique puisque l'atome est neutre, mais il y a toujours la force de gravitation qui est

proportionnelle au nombre d'atomes accumulés dans un corps. C'est le moment d'avoir une pensée attristée pour ce pauvre Newton qui ne connaissait qu'une seule de ces forces, la gravitation, sur laquelle il a bâti toute sa gloire il y a seulement 300 ans.

La création ou la rupture d'une de ces trois liaisons/interactions consomme ou libère une certaine quantité d'énergie, très importante pour ce troisième mode de liaison (force forte nucléaire)

Les constituants des noyaux, protons et neutrons (les nucléons) sont porteurs de l'interaction forte attractive, alors que les protons sont porteurs de l'interaction coulombienne (électromagnétique) répulsive entre particules de même charge (positive chez les protons). La 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. La radioactivité désigne les divers processus par lesquels un noyau instable émet des particules (radioactivité alpha, beta, ou gamma) ou fissionne pour atteindre des états plus stables.

Pour diminuer la proportion de protons, le noyau peut émettre des noyaux 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) et, aussi, si on dépose de l'énergie dans le noyau, généralement sous forme de capture d'un neutron, c'est la fission induite. Au cours de la fission quelques neutrons sont aussi émis. Du fait de la répulsion coulombienne les fragments de fission acquièrent de fortes énergies cinétiques qui sont transmises sous forme de chaleur au milieu proche. Les quelques neutrons émis dans le processus de fission 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 domestication de cette énergie est de contrôler le flux de neutrons percutant les noyaux.

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 étant la vitesse de la lumière. **C'est donc la masse qui est transformée en énergie utilisable dans cette transition 5 (comme c'était la chaleur dans la transition 3). C'est le principe de fonctionnement de la domestication de la fission nucléaire utilisée actuellement dans les centrales électronucléaires à fission.**

Les attraits essentiels de l'énergie nucléaire en découlent :

1. Extrayant son énergie de la domestication de la plus forte des liaisons physiques connues (l'interaction forte liant les nucléons, encore 100 fois plus forte que la force électromagnétique gérant les réactions chimiques de combustion) elle permet de produire massivement de l'énergie électrique avec le minimum "d'entrants" (on ne peut plus parler de combustible), ce qui explique la puissance mystérieuse de cette source, où la fission d'un gramme d'uranium fournit la même énergie électrique que la combustion de 2,2 tonnes de charbon.
2. Ceci explique aussi que 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'€ d'uranium pour sa production électrique contre environ cinquante milliards d'€ de pétrole pour les transports. Cet avantage a été d'un grand poids lors du lancement du programme nucléaire français.
3. Et explique la compétitivité d'une énergie aussi concentrée, confirmée par la Cour des comptes à diverses reprises depuis 2012, évitant tout "coût masqué" en ratissant les investissements développement passés et les provisions affectées au traitement des déchets et 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.
4. **Mais surtout, l'eau de la chaudière nucléaire n'est plus chauffée par une combustion émettrice de CO₂, mais par la récupération sur place de l'énergie de fission dans les barreaux du combustible nucléaire (essentiellement de l'oxyde d'uranium) sous forme de chaleur qui est transférée à l'eau primaire de la chaudière. 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 70 où la conscience du problème climatique n'était pas encore éveillée, prend toute sa valeur maintenant où la question climatique devient capitale car il n'existe pas de moyen plus puissant, plus sûr et plus économique de respecter les engagements pris par les nations de limiter le réchauffement à 2 degrés en fin de siècle.**

Notons aussi que cette transition énergétique a un point commun avec la troisième, celle de Carnot, qui sans le savoir, a exploité la seconde catégorie de force de la nature, la liaison électromagnétique, beaucoup plus puissante que la liaison gravitationnelle. Cette troisième transition (chaleur > travail) avait permis un accroissement

considérable des ressources énergétiques par l'exploitation de cette puissante force électrique présente dans une grande quantité de corps sur Terre (les combustibles).

De même, la cinquième transition énergétique (matière > énergie) recule encore davantage les limites des réserves d'énergie en tirant parti de l'interaction forte encore ~100 fois plus forte que la force électrique de la combustion-chaleur, à partir d'un "combustible" qui est une matière radioactive - actuellement surtout l'uranium 235, dont il existe d'autres variétés - et qui pourrait devenir quasi illimitée par le développement de la technologie surgénératrice.

Que d'avantages ! On doit même en ajouter un : le nucléaire n'étant plus, en 2018 une technologie vraiment nouvelle avec environ 450 réacteurs en service dans une vingtaine de pays, il bénéficie d'un demi-siècle d'expérience, donc de statistiques sur des réacteurs nucléaires de diverses familles technologiques, établies par les grands organismes internationaux (ONU, OCDE, UNION EUROPEENNE...), qui démontrent que, contrairement à une opinion assez générale entretenue par certains médias, l'énergie nucléaire est celle qui a eu depuis 50 ans l'impact minimum sur la santé publique. L'Académie des technologies a regroupé ces études dans un rapport: [Impact sur la santé des filières de production d'énergie, consultable ICI](#) (Ctrl+clic gauche)

Donc, sauf à renoncer à l'usage de la logique, 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 au cours du dernier demi-siècle.

Ces 3 puissantes transitions ont le caractère commun d'être de vraies créations humaines

- *Le feu, phénomène naturel survenant spontanément sans action de l'homme, dans des circonstances climatiques particulières, est producteur spontané de chaleur et de lumière, mais n'a jamais été producteur spontané d'énergie mécanique qui est la forme d'énergie la plus demandée pour le développement des activités humaines. Il a fallu attendre 1820 pour qu'un homme, Sadi Carnot, comprît que la chaleur est une forme désordonnée de l'énergie dont on peut extraire une fraction $1 - T_f / T_c$ ordonnée sous forme mécanique, qui multiplia la ressource d'énergie mécanique et permit l'exceptionnel développement industriel et humain des 19^{ème} et 20^{ème} siècles (croissances simultanées de la cette forme d'énergie, de la population, de la richesse, de la durée de vie, des connaissances, malgré trois grands guerres – 1870/71, 1914/18, 1939/45 – et quelques grandes épidémies mondiales. Ce fut donc une initiative humaine néguentropique.*

- *L'électricité, autre phénomène naturel qui sauta aux yeux et aux oreilles des premiers humains pendant les orages, fut l'objet d'une curiosité restée longtemps stérile, sans utilité pour les hommes. C'est l'accumulation des connaissances sur l'électromagnétisme fin 19^{ème} qui bouleversa la situation en faisant émerger de vastes domaines amplifiant la révolution industrielle: énergie, télécommunications, automatismes... Dans le domaine de l'énergie, c'est sans doute l'idée du courant alternatif triphasé de Tesla qui fut l'apport le plus efficace, aussi bien au niveau de la génération par la conception rationnelle des grands alternateurs qu'à celui du transport par réseaux haute tension interconnectés, comme ce fut celui de Maxwell dans le domaine des télécommunications. Sans apporter de ressource énergétique nouvelle, l'électricité offrit une souplesse d'usage et de transport de l'énergie irremplaçables qui en a multiplié les applications.*

- *La radioactivité, autre phénomène naturel, émane de certains atomes arrivés sur notre planète Terre lors de l'explosion de Supernovae où leurs noyaux déjà très lourds en protons, se sont lourdement chargés en neutrons (uranium 235: 92 protons, 143 neutrons) pendant l'explosion, affaiblissant la stabilité de ces gros noyaux par les effets contradictoires de l'attraction nucléaire entre nucléons et de la répulsion électrique coulombienne entre protons de même charge électrique +. Ils se transforment alors spontanément par désintégration nucléaire pour atteindre des états plus stables, de moindre masse, en dégageant une énergie E correspondant à la masse disparue m selon la célèbre loi d'Einstein $E=mc^2$, c étant la vitesse de la lumière.*

Cette transformation spontanée de masse en énergie se termine sous la forme chaleur, qui sur la Terre, la facilité l'éclosion de la vie (sans elle la température serait 16°C plus basse), mais sans l'homme, n'aurait jamais produit que de la chaleur.

L'uranium 235, l'uranium 238 et le thorium 232 sont les noyaux les plus lourds existant encore depuis la dernière explosion de supernova précédant la formation du système solaire. Grâce à leur très longue période de désintégration, (de l'ordre du milliard d'années), ils sont encore présents sur Terre.

La Terre contenait donc les isotopes de l'uranium dès sa solidification il y a 4,57 milliards d'années, avec un taux de radioactivité moyen 4 à 5 fois supérieur à celui d'aujourd'hui, car depuis, chacun de ces radionucléides a subi des désintégrations successives selon sa propre période.

Un exemple frappant de radioactivité naturelle est la quinzaine de réacteurs nucléaires naturels découverts dans la mine d'uranium de Oklo, au Gabon, ayant fonctionné il y a environ 2,5 milliards d'années et pendant plusieurs millions d'années. Comme la période de désintégration de l'uranium 235 (le seul fissile) est beaucoup plus courte que celle de l'uranium 238 (700 millions d'années contre 4,5 milliards d'années), la concentration en uranium 235 était à l'époque plus élevée qu'actuellement et il n'était pas nécessaire d'enrichir l'uranium comme on le fait maintenant pour alimenter les réacteurs modernes. En présence d'eau et sous la pression due à une profondeur de plusieurs kilomètres, des réacteurs naturels se sont alors amorcés spontanément sous terre, et ont fonctionné dans des conditions voisines de nos réacteurs actuels, produisant localement les mêmes déchets nucléaires qui font souci actuellement, et dont la nature locale a su limiter la migration, alors qu'ils n'étaient pourtant pas enfermés dans des conteneurs sophistiqués.

Cette chaleur nucléaire perdue dans les anciens réacteurs naturels d'Oklo est maintenant contrôlée et transformée en énergie électrique dans les réacteurs nucléaires modernes. La nature a donc su produire naturellement des réacteurs nucléaires, produisant spontanément de la chaleur, mais ni énergie mécanique ni énergie électrique. Ce constat montre à quel point les domestications néguentropiques de la chaleur et de l'électricité ont été des étapes fondamentales dans le développement humain.

ET POURTANT ! DE SURPRENANTES DECISIONS POLITIQUES

En 2015, par la voie démocratique, le vote de la loi LTECV prévoit une baisse d'un tiers de la part du nucléaire dans la production électrique française, associée à un développement non limité d'énergies renouvelables coûteuses, donc subventionnées, et intermittentes, donc difficiles à intégrer dans le réseau auquel elles ont pourtant obtenu la priorité d'accès, ce qui n'a pas permis de progresser dans le sens de l'objectif principal pourtant toujours revendiqué de la réduction des émissions de CO₂, qui ont au contraire augmenté depuis ces dernières années.

Les questions où interviennent des phénomènes physiques complexes exigent des connaissances scientifiques suffisantes pour être débattues et décidées avec rigueur et objectivité. Or, il apparaît depuis quelques années que la culture scientifique est à reconquérir. Une tribune du Huffington Post du 26 février 2018 s'élève vigoureusement contre le recul de la rationalité scientifique dans notre société, signée par plus de 60 personnalités, scientifiques, dont 4 prix Nobel.

Les élections démocratiques sur de tels sujets mènent à considérer que tous les avis se valent, la voix d'un expert n'est que celle d'un électeur parmi d'autres, pas davantage, ce qui introduit une notion étrange et dangereuse d'une "Science citoyenne". Cette "science" ne se démontrerait plus, elle se décréterait (Il faut décréter l'utopie, a osé déclarer Nicolas Hulot), et les médias lui associent des risques souvent exagérés ou infondés générateurs d'une peur fédératrice qui consolide une conviction autour d'une peur devenue citoyenne. Il est vrai que pour le citoyen moyen plein de bonne volonté, cherchant à démêler ce qui est vrai, ce qui est faux, ce qui est déformé, ce qui n'est pas chiffré, ce qui est éventuellement possible dans un siècle, mais pas dans les 10 ans... n'est pas chose aisée.

L'orientation est donc difficile sans une certaine culture scientifique. Une doxa populaire a pu ainsi se développer, qui est un mélange de foi assez naïve dans les énergies renouvelables, de laisser-aller contradictoire à utiliser tant qu'il sera possible les énergies fossiles malgré leur influence néfaste, mais si lointaine et encore douteuse pour certains scientifiques, sur le climat, et de méfiance, voire de rejet de l'énergie nucléaire dont les risques sont jugés incomparables avec ceux des autres sources d'énergie, qui fait du nucléaire un sujet tabou où l'émotionnel rend le discours rationnel inaudible.

ESSAYONS DONC DE COMPRENDRE, en parcourant les "ressentis" de l'électeur moyen

PREMIER RESSENTI GENERAL : LES ENERGIES RENOUVELABLES SONT SYMPATHIQUES

Elles sont naturelles et leurs sources nous sont familières dans la nature présente, soleil, vent, fleuves, biomasse.

Contrairement aux énergies fossiles qui puisent dans un stock géologique fatalement limité, les EnR sont durables puisque leurs sources issues du soleil, se renouvellent naturellement, vent, eau des fleuves, soleil, biomasse sont des sources renouvelables.

Le soleil et le vent étant des ressources assez bien distribuées, les EnR offrent donc une certaine sécurité d'approvisionnement, et donnent ainsi naissance au concept populaire d'énergie décentralisée, chacun pouvant produire l'énergie qu'il consomme ou la trouver à proximité sans nécessiter de grands réseaux de transport. Etant des énergies de faible densité, elles sont de taille plus modeste, plus à échelle humaine que les grandes énergies thermique ou nucléaire. De plus, elles ont une apparence de gratuité car il n'y a pas de combustible à payer. Comment ne pas être favorable aux énergies renouvelables ? Et qui peut être contre l'idée de les développer au maximum ?

SECOND RESSENTI GENERAL : LES ENERGIES FOSSILES NE DIPARAITRONT PAS SI VITE, ET IL NE SERA PAS FACILE DE S'EN PASSER.

Elles sont la cause principale du réchauffement climatique, et de surcroît cause de pollutions régionales, On observe cependant que la crise économique qui dure fait passer cette préoccupation climatique derrière celles de l'emploi et de l'équilibre économique, et qu'une tendance actuelle dans beaucoup de pays est de continuer à utiliser ces sources fossiles en fermant au moins provisoirement les yeux sur le climat, car chacun est conscient que ces énergies fossiles se sont révélées les plus faciles et les moins coûteuses à exploiter, que le charbon au 19^{ème} siècle, le pétrole et le gaz naturel au 20^{ème} siècle, sont à l'origine du développement économique dont le monde entier a bénéficié au cours des deux derniers siècles, et continuent à l'être pour les pays en développement.

Elles représentent encore 80% de la consommation mondiale d'énergie primaire.

TROISIEME RESENTI GENERAL : LE NUCLEAIRE SUSCITE UNE CRAINTE DIFFUSE

Sans remonter à l'usage militaire de l'atome, son application civile à la production d'énergie électrique confirme la puissance mystérieuse, donc inquiétante de cette source où quelques grammes d'une matière particulière produit la même énergie que quelques tonnes de charbon.

S'y ajoute que le risque induit sur l'homme par les rayonnements ionisants accompagnant les réactions nucléaires reste perçu comme encore insuffisamment connu puisqu'il continue à faire l'objet de débats d'experts sur la validité de la loi linéaire sans seuil³ et l'hormésis⁴. Ce risque est évocateur de conséquences décalées dans le temps telles que cancers, et présente un caractère durable car les combustibles nucléaires usés restent radioactifs pendant des siècles à l'état de déchets qu'il faut savoir gérer. Le niveau de formation scientifique du public moyen est insuffisant pour lui permettre d'établir sa propre évaluation du risque à partir des informations (et désinformations) dont il dispose dans les médias courants, et il doit déléguer sa confiance à des organismes tiers dont il doit estimer la compétence et l'objectivité. En outre, certains organismes antinucléaires, discréditent les experts du domaine aux yeux du grand public.

Comment donc ne pas être réservé vis-à-vis d'une énergie aussi puissante et aussi mystérieuse aux yeux du grand public? Le nucléaire a donc ceci de particulier que sa perception sociale est dominée par son aspect risque, contrairement aux autres sources d'énergie dont pourtant les statistiques démontrent à posteriori qu'elles sont beaucoup plus risquées, mais pour lesquelles cet aspect existe depuis longtemps, mais ne fait plus la une des médias. Il en résulte une exigence croissante d'une sûreté d'exploitation au plus haut niveau, face à tous types d'accidents ou d'actions humaines imaginables, très au-delà de celle exigée d'autres installations industrielles quant à la prévention et la limitation des risques. Les deux grands accidents ayant provoqué des fuites de radioactivité à Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011 ont réactivé cette exigence.

Les risques du réchauffement climatique semblent moins préoccupants car plus lointains, et la science retrouve ici la confiance du public qui pense volontiers qu'elle trouvera bien une parade au réchauffement d'ici la fin de ce siècle. Dans leur majorité, les pays sont actuellement plus préoccupés par leur développement économique, et surtout par les problèmes d'emploi qui conditionne leur stabilité sociale, ils n'accordent donc pas réellement la priorité à la lutte contre la dérive climatique.

- Les grands pays émergents grands émetteurs de CO₂ (Chine, Inde...) poursuivent l'exploitation des combustibles fossiles dont ils disposent. Ils développent en parallèle l'énergie nucléaire, dont ils estiment les risques raisonnables et développent aussi les énergies renouvelables en complément dans un mix énergétique visant à réduire un peu les émissions de CO₂,

- Aux Etats-Unis les ombres du peak-gas et même du peak-oil se sont évanouies pour plusieurs décennies avec l'apparition des gaz et huiles de roche mère qui a fait plonger le prix américain du gaz d'un facteur 2 à 3, et passer en quelques années les Etats-Unis du statut d'importateur anxieux à celui d'exportateur heureux, rendant le nucléaire moins compétitif pour quelque temps. La confiance dans l'énergie nucléaire y reste toutefois intacte, et l'exploitation des réacteurs y sera poursuivie jusqu'à 60 ou 80 ans.

- Certains pays, surtout en Europe, accordent un poids si grand au troisième terme de cette doxa qu'ils s'orientent de manière contradictoire vers une réduction (France), voire une exclusion programmée de la part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique (Allemagne), en n'envisageant qu'à plus long terme l'abandon des énergies fossiles dont ils disposent sur leur territoire national), choisissent un modèle énergétique contenant un taux de plus en plus élevé d'énergies renouvelables dans le mix énergétique, allant dans certains pays jusqu'à 80 ou 90%.

³ Loi simplificatrice suivant laquelle l'effet d'une dose de rayonnement est proportionnel à la dose reçue, sur toute l'échelle de valeur des doses. Il est maintenant admis par les spécialistes qu'il existe un seuil, d'au moins 100 mSv/an, en dessous duquel aucun effet pathologique n'a jamais pu être observé.

⁴ L'hormésis est une sorte de vaccin naturel qui permettrait aux populations régulièrement exposées à de faibles doses de radioactivité, de s'y accoutumer, voire de mieux résister à des doses un peu plus élevées. Ce phénomène permettrait d'expliquer pourquoi les habitants de régions du monde où règne une radioactivité naturelle de 50 à 100 mSv/an (Inde, Iran, Brésil) ne semblent pas manifester plus de mortalité statistique que les pays où la radioactivité ambiante est entre 2 et 10 mSv/an.

Une évolution aussi radicale vers une si nouvelle répartition des rôles des différentes sources d'énergie nous oblige à réexaminer ces ressentis le plus rationnellement possible, en évitant de se laisser asphyxier par l'émotionnel qu'ils véhiculent, mais soulignons d'abord que le Le Débat Public sur la PPE a donné l'occasion aux spécialistes de chaque secteur de faire des présentations souvent remarquables de chacun des sujets partiels évoqués dans le débat, auxquels il est préférable de se reporter. Nous ne ferons ici que rappeler les lignes principales des difficultés rencontrées pour aller dans le sens de la LTECV

UTILISER AU MAXIMUM LES ENERGIES RENOUVELABLES?

Qui peut être contre l'idée de développer les énergies renouvelables au maximum ? A priori Personne, mais au maximum de quoi ?

1.1- Les développer au maximum de leur capacité quel que soit leur coût ?

- L'image d'éternité des énergies renouvelables peut conduire à penser que leur capacité n'est pas limitée, Mais on ne peut en tirer plus que leur flux naturel à un instant donné, flux imposé par la nature sans que l'homme puisse l'augmenter.

- L'idée que l'énergie du vent et du soleil sont gratuites est parfois ancrée dans l'opinion car il n'y a pas de combustible à payer. Ce raisonnement est trop sommaire car tout comme le vent, les combustibles fossiles sont un don gratuit de la nature et ne coûtent rien en eux-mêmes. C'est leur mise en œuvre qui est coûteuse ! Ce n'est pas la ressource qui est coûteuse, mais l'accès à la ressource qui exige des investissements pesant sur le prix du kWh. Il en est de même de toutes les formes d'énergie, mais l'accès aux énergies renouvelables coûte plus cher que celui aux autres (l'exception étant l'énergie hydraulique) parce que ce sont des énergies très diluées (de faible densité surfacique ou volumique). Les lois de la physique imposent qu'extraire une énergie diluée est plus coûteux en investissements (volume de matériaux, complexité, emprise au sol)⁵, que pour les énergies fossiles qui sont beaucoup plus concentrées. Aussi, en dépit de la gratuité évidente de l'énergie entrante (vent, courant d'eau, rayonnement solaire), le coût de l'énergie utilisable par le consommateur est plus élevé que celui de l'énergie issue de combustibles fossiles.

Cet investissement est plus réduit en cas d'un usage thermique direct de l'énergie, ce qui est possible pour la biomasse, le solaire et la géothermie.

En ce qui concerne la production d'énergie sous forme d'électricité, l'ordre de grandeur de leur coût était, dans une étude de l'Académie des technologies de 2013, de l'ordre de 8 c€/kWh électrique produit pour l'éolien terrestre, de 15 à 25+ pour l'éolien en mer, de 25 à 30 pour le solaire photovoltaïque, à comparer à 6 à 7 pour le thermique fossile et 4 à 6 pour le nucléaire existant. Dans une période économique difficile, la prise en compte des coûts n'est pas une préoccupation secondaire.

Pour se développer, les EnR électriques sont donc subventionnées, avec l'espoir que leur développement industriel puisse entraîner une baisse de leurs coûts qui leur permettrait de se rapprocher de la compétitivité avec les autres sources. Le problème de la pertinence et de la durée de ces aides se pose : on pourrait souhaiter que les filières qui sont déjà dans leur phase de maturité technique et industrielle et bénéficient d'un très large marché, comme l'éolien à terre, n'aient plus besoin de ces aides, et que celles comme le solaire qui ont devant elles un large potentiel de développement exigeant encore beaucoup de recherche voient leurs aides porter davantage sur ces recherches plutôt que sur l'installation de panneaux photovoltaïques utilisant les technologies actuelles à faible rendement, encore loin de la compétitivité économique.

Notons aussi que le plafonnement de capacité des EnR n'est pas que d'ordre économique, il est aussi d'ordre sociétal, par la concurrence sur l'occupation des sols, des côtes et des mers, par la conservation des paysages...etc.

⁵ Un exemple simple est la comparaison d'une turbine hydraulique et d'une éolienne : la puissance délivrée par une turbine est proportionnelle à sa 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 $1000^{1/2}$, 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.

En ce qui concerne l'énergie (thermique) reçue du soleil, elle est certes de l'ordre de 1kW/m² dans les conditions les plus favorables, mais les conditions réelles de transformation exigent avec les technologies actuelles environ 2 ha/MW électrique quel que soit le système photovoltaïque ou thermodynamique, ce qui correspond à environ 0.05 kW électrique/m².

1.2- Les développer au maximum de leur possibilité d'insertion dans le réseau électrique ?

Les deux énergies renouvelables qui disposent du plus grand potentiel de développement, l'éolien et le solaire sont des énergies intermittentes.

Les formes d'intermittence de ces deux énergies sont différentes, celle du soleil étant beaucoup plus prévisible (jour/nuit, couverture nuageuse moyenne) de même que sa variabilité journalière assez cohérente avec la demande de mi-journée, et saisonnière, à contretemps des besoins

Par contre, l'intermittence de l'éolien est beaucoup plus préoccupante, car particulièrement élevée et mal prévisible. La raison en est que sa puissance varie comme le cube de la vitesse du vent, ce qui amplifie très fortement les variations du vent. Il en résulte que pour une puissance installée donnée, la puissance moyenne délivrée au long de l'année n'est que 20 à 35% de cette puissance (coefficient de charge)

Cette forte variabilité de l'éolien exige de faire appel à d'autres sources d'énergie en stand-by, généralement thermiques (Allemagne, Espagne, Danemark...), pour remplacer l'éolien défaillant, entraînant une augmentation du coût de l'énergie ainsi produite par ces moyens complémentaires s'ils n'existent pas déjà, ainsi qu'une émission de CO2 qui réduit l'intérêt écologique de l'énergie éolienne si ces moyens sont à créer (turbines à gaz).

Par ailleurs, le réseau étant dimensionné pour la puissance moyenne, le suréquipement de la puissance installée par rapport à cette puissance moyenne (de 3 à 5, inverse du coefficient de charge), génère une surproduction pendant les périodes de bon vent, que le réseau a des difficultés à écouler, entraînant momentanément des prix de gros négatifs sur les marchés spot, ou dans certains pays des primes à la jachère (arrêt imposé des éoliennes avec compensation financière, en Allemagne, Royaume uni, Canada) ou des surtaxes sur l'éolien excédentaire (Danemark).

La prévisibilité de l'éolien est très liée à la météorologie, assez bonne à 24 heures, ce qui permet d'établir un plan de charge approché. Elle est à peu près nulle à moyen et long terme. La variabilité à court terme n'est malheureusement qu'assez peu atténuée par le foisonnement qu'on peut espérer dans un réseau étendu.

Le réseau impose des contraintes à l'électricité injectée

En l'absence de mesures de limitation/retrait de la consommation, la distribution d'électricité n'a pas le droit d'être intermittente. Un réseau électrique doit donc être capable de fournir de l'électricité à tous ses clients, dont la demande n'est prévisible que statistiquement et approximativement.

Comme l'électricité ne peut se stocker directement, et que son stockage indirect est coûteux et limité, le gestionnaire du réseau doit disposer à tout moment d'une réserve de puissance qu'il puisse mettre très rapidement en service.

Si une part importante de cette production, dite non commandable, présente une forte variabilité et des intermittences imposées par la nature des sources, les centrales de production commandables héritent de la responsabilité totale de l'ajustement entre demande variable et production variable. Elles doivent donc disposer de puissants moyens de réaction rapide déjà en fonctionnement. Si ces moyens sont insuffisants, l'importance et la rapidité des fluctuations de l'éolien et du solaire limitent de facto leur contribution à la production d'électricité, qui ne peut être que minoritaire. Le moyen le plus largement utilisé est l'appel à des centrales thermiques à charbon ou des turbines à gaz pendant les périodes de faible vent (Allemagne, Espagne, Danemark).

Ces nécessaires compensations de la variabilité de l'éolien (et bientôt du solaire photovoltaïque) limitent la part de ces énergies intermittentes à un taux dépendant des moyens disponibles pour secourir le réseau en cas de défaillance des sources. Parmi ces moyens, le stockage indirect d'énergie électrique apparaît le plus important à mettre en œuvre.

LE STOCKAGE

- Le plus connu, le plus puissant et le plus économique en rendement est le stockage d'eau en altitude par pompage nocturne et turbinage aux heures de pointe, ce sont les **STEP** (stations de transfert d'énergie par pompage). La technologie est tout à fait mature, leur coût, variable selon les sites, est de quelques c€/kWh stocké.

Les pays développés en sont déjà largement pourvus (300 à 400 dans le monde). C'est ce type de stockage qui permet au Danemark d'exploiter un niveau élevé d'éolien en utilisant par son interconnexion les importants moyens de stockage hydraulique de la Norvège.

Mais la capacité globale de stockage n'est pas à l'échelle des besoins futurs de compensation si le pourcentage de sources intermittentes atteint les valeurs envisagées dans les scénarios allemands. Les possibilités d'équipements supplémentaires sont limitées par le relief et l'occupation humaine des sols.

Ce stockage abondant par STEP en France ne représente que 0,1 TWh alors qu'une journée moyenne d'hiver, la consommation électrique est de 1,5 TWh. Les déstockages ne sont généralement utilisés que pour passer les pointes du matin et du soir. Pour avoir des stockages inter-saisonniers il faut beaucoup rêver.

Les parcs européens de production d'électricité étant généralement dimensionnés pour passer les pointes d'hiver, ils sont donc surdimensionnés en besoin annuel d'électricité.

Et si on les dimensionnait pour fournir seulement l'énergie électrique annuelle, on serait défaillant pendant au moins 4 mois.

Si on savait stocker économiquement sur des longues périodes, un parc légèrement suradapté en énergie permettrait de passer les pointes, or les outils de production d'électricité sont très capitalistiques et tous les électriciens voudraient trouver le graal.

En Europe, pour stocker une semaine de la production actuelle d'éolien, il faudrait à peu près 2500 GWh, à comparer à environ 100 GWh existant actuellement.

Les **batteries** électriques : Les accumulateurs à ion-lithium ont envahi le marché de l'électronique portable. Mais pour gagner les applications de réseau et le marché des véhicules électriques qui est le plus accessible, il reste beaucoup de chemin à parcourir. Il faudra multiplier leur capacité de stockage par environ quinze pour égaler celle de l'essence, malgré le faible rendement des moteurs thermiques actuels.

L'énergie contenue actuellement dans TOUTES les batteries du monde est de l'ordre de 1 TWh, ce qui ne permet pas d'espérer gérer les fluctuations des sources intermittentes des réseaux avec des batteries. L'avenir du stockage par batterie repose sur deux progrès essentiels qui restent à faire, baisser considérablement le coût, et augmenter la capacité par unité de masse et la tolérance au cyclage.

- Un autre moyen de stockage, l'**hydrogène**, a soulevé beaucoup d'enthousiasme chez certains qui sont allés jusqu'à parler comme Jeremy Rifkin de l'avènement d'une civilisation de l'hydrogène, mais c'est à coup sûr le moyen le plus lointain. L'idée générale est d'utiliser l'électricité en excès pour produire par électrolyse de l'hydrogène que l'on stocke et que l'on brûle ensuite sans émission autre que de l'eau. On peut imaginer que de grands stockages souterrains permettraient une compensation saisonnière des consommations car la même caverne peut contenir 65 fois plus d'énergie remplie d'hydrogène que remplie d'air comprimé comme dans les CAES⁶. Mais les obstacles à lever sont le rendement qui est le plus faible parmi tous les moyens de stockage, un coût élevé, et un très net manque de maturité de la technologie des piles à combustibles pour des applications industrielles banalisées. Une préoccupation importante sera l'acceptation publique de stockages d'un gaz, explosif s'il est mis en présence d'air.

D'autres formes d'utilisation de l'hydrogène pour un stockage d'énergie sont envisagées par sa transformation en méthane par réaction sur le CO₂, voire en méthanol. Ces solutions coûteuses et de faible rendement sont embryonnaires et demandent à être et chiffrées avec réalisme.

LE SUPER – RESEAU

Une réflexion s'est engagée sur la possibilité d'accepter une part croissante d'énergies intermittentes en ayant simplement recours à une mutualisation immédiate des défaillances et des surcapacités par transport d'électricité sur un super-réseau THT sur de longues distances intra-européennes, équilibrant le nord et le sud de l'Europe. Les puissances échangeables doivent alors croître de manière considérable, par exemple la liaison France-Espagne qui n'était en 2012 que de ~1 GW et va passer à ~2 GW avec l'extension actuellement en cours, devrait être multipliée par environ 40.

De plus, on doit noter que l'intérêt d'un tel super-réseau européen repose sur l'hypothèse contredite par les observations, d'un foisonnement suffisant des phénomènes météorologique à travers l'Europe pour assurer qu'il y aura toujours assez d'électricité pour tous les pays connectés, et qu'inversement, en cas d'excès de production dans une partie de l'Europe, il y aura toujours acheteur de cet excès dans une autre partie.

⁶ CAES (Compressed Air Energy Storage) : Stockage d'énergie par air comprimé dans des cavités souterraines.

L'investissement correspondant à un "Super Grid" peut être évalué à environ 500 milliards €.

Le coût et les difficultés sociétales rencontrées pour implanter de nouvelles lignes haute tension n'augurent pas favorablement de la construction d'un super-réseau plusieurs fois plus puissant que celui qui existe. S'il faut enterrer les lignes, l'investissement fait un bond.

Est-il alors possible d'accepter des niveaux élevés d'intermittence?

Le problème de l'intermittence accompagnant les nouvelles énergies renouvelables a été sous-estimé. Passé inaperçu au début de l'introduction des énergies renouvelables, il émerge au fur et à mesure que le taux d'énergies intermittentes dans le bouquet énergétique atteint un niveau révélateur. La perception initiale des énergies renouvelables décentralisées porteuses d'autonomie s'est effacée au profit de grandes fermes d'éoliennes groupées dans les zones venteuses d'Europe du nord, dont il faut exporter l'énergie en excès pendant les périodes de forte production, et remplacer la production pendant les périodes de hautes pressions sans vent, ce qui exige un énorme renforcement des lignes intra-européennes

Susciter une nouvelle demande d'électricité effaçable est une autre voie de réflexion proposée par Henri Prévot : Une demande d'électricité pourra aisément s'effacer si l'électricité peut être remplacée par une autre forme d'énergie. Il en est ainsi des véhicules hybrides rechargeables. En cas de défaut d'électricité, les véhicules fonctionneront avec du carburant pétrolier ou, mieux, du biocarburant : on aurait tort de négliger la contribution des véhicules hybrides à la sécurité d'approvisionnement. C'est un service que pourrait rendre également un chauffage hybride : une résistance électrique introduite dans l'eau d'un chauffage central existant pourrait être mise hors tension en cas de manque d'électricité sans que les utilisateurs s'en rendent compte puisque la chaudière au fioul ou au gaz aura pris le relais. Au lieu d'une résistance électrique, on pourrait ajouter une pompe à chaleur à la chaudière au fioul ou au gaz.

L'évanouissement de l'idée d'énergie renouvelable porteuse d'autonomie gagne progressivement le domaine du solaire, qui aurait pu être un modèle d'énergie décentralisée autonome avec des panneaux solaires photovoltaïques (PV) et thermiques contribuant par autoconsommation à réduire l'énergie prélevée sur les réseaux, mais c'est un solaire PV connecté au réseau que l'on a développé, permettant de puiser sur le réseau sans le recours à des batteries lorsque le soleil fait défaut, avec des incitations financières qui étaient d'emblée si élevées qu'il était devenu plus profitable de revendre la totalité de l'énergie PV à EDF à 60 c€/kWh plutôt que de la consommer, et d'acheter sa propre consommation à un tarif 4 ou 5 fois moins cher, à charge pour le gestionnaire de réseau de transporter et distribuer cette énergie PV délocalisée revendue à perte, et à charge pour le consommateur moyen de payer la différence à travers une CSPE dont la charge croissante sur les autres consommateurs ne devenait plus justifiable, et a amené à trouver d'autres procédés de subvention, qui par ailleurs se réduisent par la baisse du coût des panneaux PV produits majoritairement en Chine.

Stabilité instantanée des réseaux. Dans un réseau de transport en courant alternatif, à tout instant, la production d'électricité doit être strictement égale à la consommation faute de quoi la fréquence du réseau s'écarte de 50 Hz, ce qui n'est acceptable que dans de très étroites limites, au-delà desquelles la stabilité globale du système électrique est mise en cause avec des risques de black-out plus ou moins généralisés. C'est une condition de viabilité de tout mix énergétique.

Or, une étude approfondie réalisée au niveau de l'ensemble des 34 pays européens interconnectés, la seule existant actuellement à cette échelle à ce jour (TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE EUROPEAN ELECTRICITY SYSTEM WITH 60% RES - Alain Burtin et Vera Silva – 17 juin 2015 – EDF R&D) montre qu'en l'état actuel des connaissances et technologies, la limite d'insertion maximale d'électricité intermittente ne dépasse pas 40 % en moyenne annuelle. Il est donc impossible de fonder actuellement une PPE sur « 80 % de renouvelables » et a fortiori « 100 % de renouvelables » qui relèvent à ce stade de la « pensée magique » tant que l'on ne disposera pas de solutions de stockage de l'électricité à la fois à très grande échelle, inter-saisonniers et viables économiquement (c'est ce dernier point qui bloque, l'électricité étant un bien de première nécessité dont le prix doit absolument rester soutenable).

Regardons maintenant d'un peu plus près la doxa populaire concernant le nucléaire.

Le public est familier des énergies fossiles et a généralement une assez bonne connaissance de leur formation géologique historique, alors qu'ils lisent parfois que l'énergie nucléaire est une énergie artificielle dangereuse, inventée par l'homme. Pour les plus curieux qui aimeraient comprendre également le processus naturel de formation des ressources nucléaires, cliquer [ICI](#) (C trl+clic gauche).

Dans ce survol des problèmes qui sont partout, regardons en face ceux du nucléaire, qui présente certes un très faible risque d'accident majeur, mais ces rares accidents ont un caractère plus dramatique que d'autres accidents industriels, non pas par le nombre de morts, comme nous venons de le voir, mais par les conséquences sociales locales associées à l'évacuation de population et par la contamination radioactive des sols, condamnant des villages et des surfaces agricoles pendant des années.

Comme le confirme un demi-siècle d'exploitation du parc mondial, et en particulier l'accident de TMI (Three miles Island) aux USA, ce risque est extrêmement réduit dans les réacteurs du parc français du type à eau pressurisée (PWR), régulièrement améliorés et rajeunis par des modifications prenant en compte les retours d'expérience internationaux.

L'évacuation préventive et temporaire des populations, qui a été correctement conduite à Fukushima et a protégé la population du risque de contamination importante, reste de toute manière mal vécue. Cette contrainte constitue le reproche principal aux yeux du public, car à Tchernobyl la plus grande part de la morbidité a été due à ce traumatisme social causé par les déplacements de population. Les réacteurs du parc Français ont réduit ce risque au maximum via l'installation de recombineurs d'hydrogène pour éviter les explosions (vues à Fukushima) et des filtres à sable sur le circuit de décompression des enceintes pour retenir plus de 95 % des aérosols de césium (filtres absents à Fukushima).

On devrait par ailleurs parvenir à une gestion plus rationnelle de l'évacuation provisoire des populations⁷. La norme d'évacuation est de 20 mSv/an, alors que 50 à 100 mSv/an est le niveau de radioactivité naturelle dans quelques régions du monde en Iran, en Inde et au Brésil sans que soit connue de conséquences sur la durée moyenne de vie de la population locale. Si on fait l'hypothèse de retenir 40 mSv/an au lieu de 20 et si l'on conserve la loi très pessimiste d'une relation linéaire sans seuil, le coût économique serait 50 à 100 fois plus faible.

Rappelons que le dernier modèle de réacteur EPR tolère une fusion totale du cœur sans nécessiter d'évacuation locale temporaire, et n'est donc pas concerné par ce problème. Dans le concept « ni agresseur, ni agressé ».

La contamination radioactive des sols et des eaux a été un problème majeur dans l'accident de Tchernobyl où le réacteur de type ouvert a laissé échapper de grandes quantités de produits radioactifs à haute altitude transportés à des centaines de kilomètres au gré des vents, activé par l'incendie du graphite (modérateur du réacteur) pendant une semaine. A Fukushima, sans explosion du réacteur lui-même, et par suite de vents favorables, la zone terrestre polluée a été limitée à environ 2.000 km² autour de la centrale et une pollution moindre, dont le césium⁸ représente l'élément principal par sa demi-vie d'une trentaine d'années. Des moyens de récupération partielle des sols commencent à exister (lavage des surfaces étanches, décapage des sols cultivés et traitement des gravats, plantation de végétaux spécifiques absorbant le césium), d'autres sont en développement au Japon pour les sols et les eaux radioactives⁹.

Les effets retardés ? Aucune victime à ce jour pour Fukushima ? A ce jour ! voilà un boulevard de possibilités de désinformation sur les effets des radiations sur la santé. On a même pu lire sur certains médias : "les victimes de Fukushima ne sont pas encore nées".

⁷ [Faut-il revoir les conditions d'évacuation à la suite d'un accident nucléaire ?](#) Hervé Nifenecker, site Internet SLC 20 mai 2011.

⁸ L'iode et le césium ayant été envoyés beaucoup moins haut qu'à Tchernobyl sont retombés plus près de la centrale ; ceci explique qu'avec des rejets dix fois plus faibles, les contaminations par m² aient été du même ordre de grandeur.

⁹ Césium : le Japon avance dans le traitement des sols et des eaux contaminées

Quel pourcentage des citoyens savent ce qu'est un becquerel, un gray, une curie ou un sievert ? Pour ceux qui font l'effort de se renseigner sur les différents degrés du risque associé aux différents degrés d'irradiation (exprimés en Sievert), il subsiste des doutes dans leur esprit par la confusion entre les doses tolérables sans effet pathologique observable (<100mSv/an), et les limites de dose fixées par les normes de radioprotection avec une prudence extrême (<1mSv/an) qui ménagent des marges de plusieurs ordres de grandeur entre les deux.

La radioactivité, est un phénomène physique trop mal connu du public, contrairement aux sources d'énergie plus classiques. Le public doit prendre conscience que la radioactivité est un phénomène naturel qui n'a pas été inventé par l'homme, mais simplement domestiqué comme le feu et l'eau. Cet aspect exige un effort d'information sur la radioactivité, sa nature, ses risques et ses mesures. Une base de connaissances minimales est disponible ICI ([ctrl+clic gauche](#)).

Les déchets

La production nucléaire, comme toute industrie, accumule des **déchets radioactifs** issus de la transformation atomique du "combustible" usé qu'il faut savoir gérer afin d'éviter tout risque de dispersion. En France, c'est l'AGENCE NATIONALE DES DECHETS RADIOACTIFS ANDRA) qui est chargée de cette gestion. Pour les déchets de très faible activité, les stockages existent et sont gérés par l'ANDRA. Idem pour les déchets de moyenne radioactivité à vie courte qui font l'objet d'une gestion différente. Enfin, restent les déchets de moyenne et haute radioactivité à vie longue (moins de 4 % des déchets) qui sont actuellement stockés sous forme de vitrifiât englobés dans un conteneur en acier inoxydable pour leur manutention et qui sont entreposés à l'usine de retraitement de la Hague. Leur sort définitif sera fixé en France au terme d'un processus rigoureux s'étendant jusque vers 2020 et ils seront alors probablement stockés de façon définitive dans une couche géologique d'argilite à 500 mètres sous terre. Les progrès dans la préparation du stockage souterrain définitif sont publiés chaque trimestre dans le journal de l'ANDRA. Le lecteur trouvera une présentation de l'ensemble du sujet dans l'hypertexte lié en cliquant sur [déchets](#) ([ctrl+clic gauche](#)).

Dans les filières nucléaires actuelles, parmi les éléments contenus dans les combustibles usés, les apports de neutrons sur l'uranium 238 le transmutent en plutonium 239, puis 240, isotope du plutonium dit "civil", car il est inapte à une utilisation militaire¹⁰. Les isotopes impairs du plutonium sont d'excellents combustibles fissiles.

Ce plutonium est soit stocké directement en déchets (comme aux USA et en Finlande), soit séparé par retraitement et partiellement réutilisé dans le combustible MOX (France, Japon). Le stock de plutonium est géré dans l'attente des réacteurs de la génération IV dont il sera un des combustibles.

Si le développement de ces réacteurs de génération IV a été suspendu en France en 2019, l'uranium étant abondant et bon marché, il est poursuivi en Russie, en Chine, en Inde et aux USA, pays qui ont une réelle ambition pour le futur.

Le coût des dommages que le choix du nucléaire permet d'éviter est largement supérieur à celui d'accidents hypothétiques. Si on ne refuse pas de comparer des conséquences bien réelles d'un autre choix de mode de production avec des conséquences probabilistes liées à l'hypothèse d'un accident, on peut estimer que si le nucléaire remplace une centrale à lignite, à puissance équivalente, celle-ci aurait produit sur les 30 dernières années environ 500 TWh, à 30 morts par TWh suivant les calculs d'ExternE, soit 15 000 morts prématurées (et 150 000 maladies graves).

Cette centrale à lignite aurait aussi produit 1 tCO₂ par MWh, à un coût des dommages de 100 €/MWh. Et quid des 45 000 personnes qu'il est envisagé d'évacuer dans les 15 ans pour prolonger les mines de lignite à ciel ouvert¹¹.

Parmi toutes les sources d'énergie, le nucléaire est certainement celle qui porte le plus grand potentiel de développement vers de nouvelles filières technologiques laissant espérer une augmentation du rendement, de la sûreté, et de la facilité de gestion des déchets. Sans aller jusqu'à évoquer la fusion nucléaire contrôlée (successeurs de ITER) trop lointaine pour être abordée ici, le développement probable vers le milieu du siècle des réacteurs à neutrons rapides (RNR) étendra la réserve mondiale d'énergie par l'utilisation de l'uranium 238 à un niveau suffisamment élevé pour ne plus être une préoccupation. Il en va de même du développement d'une filière utilisant le thorium.

¹⁰ Le réacteur de Tchernobyl était "ouvrable" pendant son fonctionnement, permettant de prélever en début de réaction du plutonium 239 qui se forme le premier et est le seul isotope utilisable pour une bombe.

¹¹ Bertrand Barré Agora SLC 24 février 2013

EN FORME DE CONCLUSION

Lorsque les risques associés à une technologie complexe deviennent eux-mêmes complexes, et incomplètement cernés, l'approche logique déterministe usuellement appliquée aux technologies et événements plus simples, devient plus difficile à mettre en œuvre, et se trouve, dans l'esprit d'une partie du public, écrasée par les réactions émotionnelles d'une doxa rendant l'approche rationnelle inaudible.

Les responsables exécutifs titulaires de fonctions électives tiennent compte plus que d'autres de cette doxa populaire, qui amène à considérer que les risques les plus importants ne doivent plus être évalués à l'échelle de leur très faible probabilité, mais considérés comme certains dans leur survenue, le problème étant alors d'en évaluer et limiter les conséquences.

Il est nécessaire que ces responsables politiques puissent retrouver la rationalité de l'approche en évitant que ces craintes confuses ne la maintiennent inaudible de façon durable.

C'est cette rationalité qui nous a servi ici de guide. Pour que les mécanismes démocratiques permettent d'effectuer des choix énergétiques partagés par les citoyens, sans avoir à les déléguer nécessairement aux seuls experts ou à nier ces experts, il est indispensable que ces citoyens s'approprient préalablement les enjeux clairement explicités de toutes les options, en gardant au premier plan les exigences de sûreté pour toutes les filières énergétiques, sans négliger les autres critères d'économie et d'indépendance énergétique, et en n'oubliant jamais le contexte du changement climatique auquel nous ne pouvons échapper.

Pour un progrès raisonné, choisi et partagé¹², le public doit prendre conscience de ces données factuelles pour enrichir sa propre doxa afin de permettre par les voies démocratiques des choix conciliant cette doxa populaire avec les avis des experts.

Ce papier déjà trop long n'entrera pas plus avant dans une analyse plus détaillée de toutes les questions adjacentes aux choix dont le débat public sur la PPE parle avec abondance – sobriété énergétique, stockage de l'énergie électrique, stabilité dynamique des réseaux électriques, doses radioactives tolérables, validité de la loi linéaire sans seuil, gestion des déchets, démantèlement des centrales nucléaires...Le lecteur qui souhaite aller plus loin peut trouver dans l'ensemble des contributions reçues par la CNDP au cours de ce débat public sur la PPE une richesse considérable d'informations scientifiquement solides, écrites par des spécialistes des domaines concernés, qu'il serait précieux de classer et conserver sous une forme informatique ouverte à définir pour une meilleure information permanente des citoyens.

Suggestion : Le tri, l'assemblage et la présentation de ces précieux documents ne pourraient-ils être une tâche conduite par une commission commune des académies nationales concernées, des sciences, des technologies et de médecine ?

FIN DE LA PREMIERE PARTIE

¹² Devise de l'Académie des technologies