

Clin d'œil sur les grandes TRANSITIONS ENERGETIQUES HISTORIQUES

Gilbert Ruelle

**Après ces quatre mois de débat public
sur la programmation pluriannuelle de l'énergie,**

**Un peu de recul et d'humour sur l'histoire
des grandes transitions énergétiques du passé**

Une présentation scientifique simplifiée à la portée de tout lecteur résume l'historique des relations entre l'homme et l'énergie, explique comment, après cinq millénaires de civilisation du cheval, deux transitions énergétiques essentielles – la métamorphose de la chaleur en travail et la domestication de l'électricité – ont aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles, engagé l'humanité dans une accélération foudroyante de ses moyens d'action par la mise à disposition de l'homme d'une énergie démultipliée, divisible et distribuée sur tous les territoires.

En ce début de 21^{ème} siècle, la conscience croissante d'un risque climatique aux perspectives apocalyptiques remet en question la boulimie énergétique, et surtout le choix des sources d'énergie pour les principaux secteurs de consommation – transports, habitat, industrie – afin de réduire les émissions de CO2 qui provenait principalement de l'utilisation du phénomène physique de combustion pour générer la chaleur, mère des autres formes d'énergie (mécanique, électrique).

En France, cette forme électrique est déjà très "décarbonée" grâce au choix fait dans les années 70 de l'énergie nucléaire qui produit 75 à 80% de la consommation électrique française sans aucune émission de CO2 puisque la chaleur y est produite par fission nucléaire et non plus par oxydation du carbone du combustible utilisé (lignite, charbon, gaz naturel)

Cette présentation délimite l'apport particulier de chacune des transitions historiques, ainsi que les zones de doutes légitimes qui ont pu planer dans l'esprit des citoyens à chaque étape au sujet des risques attachés à l'exploitation de chaque nouveau type de production ou transformation d'énergie.

L'**objectif** de ce papier est d'aider le citoyen non spécialiste à mieux comprendre la nature profonde de chaque transition pour mieux distinguer les décisions les plus raisonnables à prendre en cette année 2018 de réflexion nationale sur ce sujet pour les diverses formes de consommation et de production d'énergie (chaleur, électricité), dans chaque secteur (transports, habitat, industrie) pour:

- assurer un approvisionnement fiable en énergie à un coût raisonnable, compatible avec la poursuite du développement économique,
- tout en contribuant le plus fortement possible à la réduction du risque mondial de dérive climatique par la maîtrise des rejets de gaz à effet de serre.

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 une planète Terre, où une catégorie d'êtres vivants, l'homme, s'est tout récemment développée (environ trois siècles) en nombre et en confort de vie, aux dépens des autres vivants dont il a asservi la plus grande partie pour s'en nourrir et dont il conserve dans des réserves quelques exemplaires restés sauvages pour faire apprécier la biodiversité à leurs 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 mini 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 la science commence à comprendre comment fonctionne cet univers.

Nous pensons savoir qu'ile aurait eu un début il y a 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 Terre, il y a 4 à 5 milliards d'années, que beaucoup 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 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, mais sans pour autant déclencher cet emballement de progrès technique auquel nous assistons aujourd'hui.

Question: Pourquoi une apparition si 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 niveau de vie technologique et son "confort", c'est parce que nous avons su mettre à notre disposition une quantité suffisante d'ÉNERGIE, en franchissant quelques seuils principaux que l'on nomme en 2018
TRANSITIONS ENERGETIQUES.**

1^{ÈRE} TRANSITION ÉNERGÉTIQUE: LA DOMESTICATION DU FEU.

Dans le domaine de l'énergie, le premier scoop humain a été la maîtrise du **feu**. On ne peut évidemment pas parler d'invention du feu pour ces hommes 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.**

Le feu leur apporta effectivement 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, tuer davantage d'animaux sauvages pour mieux se nourrir.

2^{ème} TRANSITION ÉNERGÉTIQUE: LA DOMESTICATION DES ANIMAUX.

Ils trouvèrent 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 seconde PPE fut tellement pluriannuelle qu'elle dura plus de 5 millénaires, car le cheval prit très vite une telle place dans la vie de l'homme, tant sa connivence avec l'homme par cette possibilité de pilotage de sa force et de sa rapidité lui ont assuré ce règne de plusieurs millénaires en auxiliaire des hommes qui utilisaient la **force des animaux domestiqués** pour les gros travaux et les transports, et en même temps le feu pour se chauffer, s'éclairer, cuire leurs aliments, fondre les métaux. Ce fut leur **seconde programmation pluriannuelle de l'énergie.**

LA CIVILISATION DU CHEVAL

Les rois et les princes empilaient des pierres joliment taillées pour en faire 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 alors cet animal chevauché par des hommes étranges qui leur inspira une terreur sacrée paralysant leur défense.

Durant ces millénaires, un système énergétique s'était donc construit à l'échelle 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 de 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 de la même entité : l'énergie.

Pour moulin du blé ou broyer des olives, certains avaient aussi eu l'idée de demander au vent l'énergie qu'ils pouvaient en extraire, 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.

Il restait encore des traces de ce très long règne du cheval dans le domaine de la force au début de la dernière guerre mondiale puisqu'en 1939 l'administration française recensait encore les chevaux de fermes pour un éventuel usage militaire, avant de s'apercevoir en juin 1940 que les chars allemands faisaient mieux.

Même après cette dernière guerre mondiale, lorsque 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 ÉNERGÉTIQUE: 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.

Ce fut Carnot qui comprit vers 1820 le mécanisme de la 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 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 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.

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 RÈGNE, 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.

Dans le domaine de l'énergie, voilà la plus grande étape du développement humain depuis la maîtrise du feu dont elle est d'ailleurs la prolongation puisque c'est le feu sous la chaudière qui apporte cette énergie énorme, disproportionnée avec toutes celles dont disposait l'homme jusqu'alors.

Mais notons 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.

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 homme 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. Pour ces grandes puissances, le circuit d'eau-vapeur fut généralement divisé en plusieurs parties thermiquement reliées par des échangeurs de chaleur, évitant de propager des pollutions possibles entre l'eau primaire de la chaudière, les circuits aval de la turbine qui extrait la fraction mécanique $(1 - T_f/T_c)$ de l'énergie thermique (1), et du condenseur qui évacue la fraction thermique résiduelle (T_f/T_c) vers l'environnement comme déchet chaleur.

Dans cet objectif réussi de disposer d'énergie mécanique 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, qui sont toutes des hydrocarbures émettant en brûlant du dioxyde de carbone CO₂ dont l'accumulation dans l'atmosphère se révèle, hélas, être l'agent principal du réchauffement climatique.

L'exploitation du cycle de Carnot $T_c > T_f$ vers de hautes T_c a conduit à utiliser comme fluide moteur les gaz de combustion eux-mêmes, 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.

RAFRAÎCHISSEMENT DES CONNAISSANCES

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) ont parfois des idées un peu confuses sur la définition de ces grandeurs qu'il ne manipule 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 :

- Chacun sait depuis l'école primaire qu'une surface d'un rectangle est le produit de ses deux côtés ; 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, ce qui permet d'appliquer à une masse M une accélération A , donc $F = M \cdot L.T^{-2}$

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; on appelle cette force son "poids", son kilogramme-poids.

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 1 kilogrammètre 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 $E = F \cdot L$, 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 modernes internationales de ces grandeurs: la force exprimée en Newton (N), l'énergie (ou travail ou chaleur) en Joule ($1J = 1N \times 1\text{mètre}$), la puissance en Watt ($1W = 1J/s$), et leurs multiples par les préfixes kilo $K (10^3)$, Mega $M (10^6)$, Giga $G (10^9)$, Téra $T (10^{12})$.

Rappelons aussi comment les unités "historiques" se relient à ces unités officielles:

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

Energie: 1 kilogrammètre = 9.81 Joule . 1 kilowatt-heure = 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 ($1 C = 4,18 J$).

4^{ème} TRANSITION ÉNERGÉTIQUE: 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 n'a pas été vraiment le résultat d'une programmation pluriannuelle de l'énergie, mais 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, mais ce fut un travail effectivement pluriannuel, et même pluri décennal.

On connaissait déjà certaines 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 et 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, Volta, Watt, Franklin, Ohm, Gauss, Oerstaed, Edison, 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'apporte la matière au champ 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.

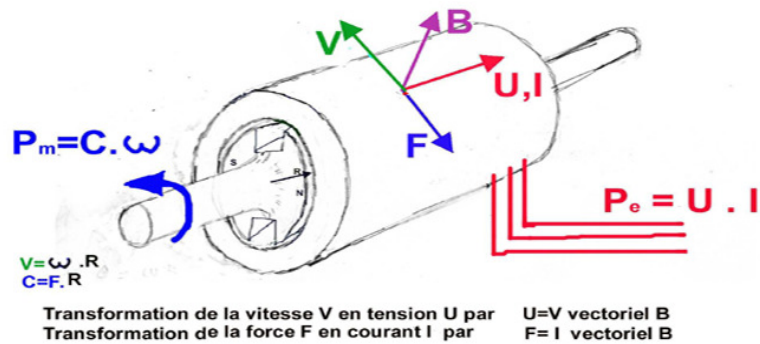
Il a fallu acquérir avec Tesla une vision de la grande électrotechnique moderne en faisant tourner des électroaimants au bout d'une turbine pour créer du courant alternatif triphasé, visionnaire de la structure rationnelle de toutes les machines électriques tournantes, alternateurs et moteurs, ainsi 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 tout 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 encore être utilisée sous cette forme pour des 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 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 grand 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 oeuvrait maintenant son adversaire Nicolas Tesla. Il exerçait en parallèle frs 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 ut 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 continu 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.

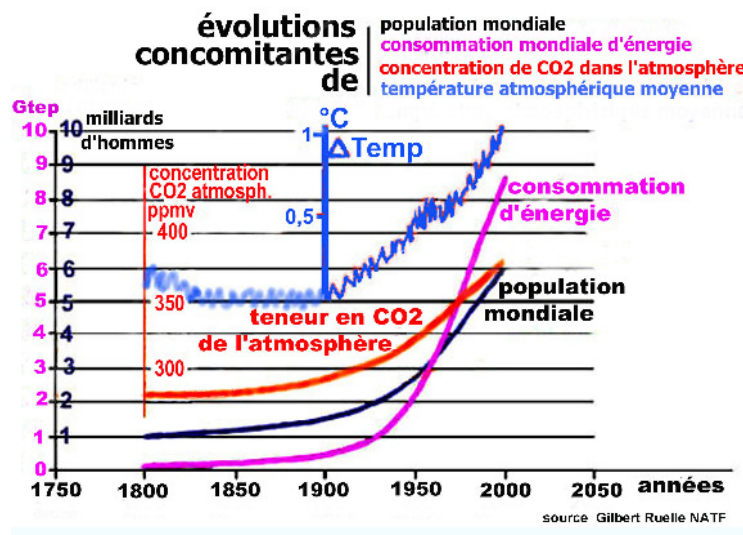
Récapitulons les apports essentiels de ces deux transitions énergétiques majeures

1. La machine à vapeur, expression verbale 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 les chevaux (et autres bœufs ou éléphants), ainsi que dans les moulins à vent et à eau.

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 multiplie presque à l'infini le potentiel de travail mécanique au service de l'homme.

Les puissances utilisables pour les travaux humains sont passées soudain de quelques chevaux à de 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 (figure 2, extraite des travaux de l'Académie des technologies CECC2008). On est frappé par la similitude des évolutions des quatre courbes: population mondiale, consommation d'énergie, taux de CO₂ dans l'atmosphère et réchauffement de l'atmosphère, qui prennent leur envolée ensemble au cours de la première moitié du vingtième siècle, et qui s'accroissent dans la seconde moitié.

Figure 2



2. l'électricité n'est pas une source d'énergie, mais un vecteur; C'est une mise en forme astucieuse d'énergie utilisant d'autres interactions physiques qui la rend plus utilisable, mais sans pouvoir en accroître la quantité.

L'électricité n'augmente ni la puissance, ni la ressource en énergie, mais lui confère une flexibilité sans égale en la mettant sous la forme électrique transportable et fractionnable.

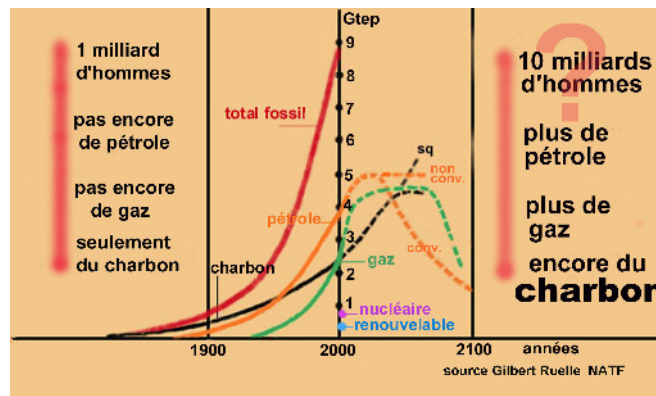
Répetons que ce sont ces deux transitions énergétiques fondamentales qui sont la cause essentielle de l'entrée de l'humanité dans l'ère moderne et son "confort" de vie croissant au cours des deux derniers siècles.

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, gaz.

- **La première inquiétude a porté sur les réserves.** Aurait-on assez de combustibles fossiles pour continuer ce développement? car 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 de conséquences apocalyptiques.

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 de l'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" (J. Poitou- GIEC).

Inutile de détailler davantage ces conséquences, il suffit de constater qu'elles ont suffisamment inquiété les climatologues du 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. 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.

5^{ème} TRANSITION ENERGETIQUE: domestication de l'énergie nucléaire

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

1. Force gravitationnelle: Les études de physique fondamentale des grands laboratoires du monde entier ont permis de comprendre que la nature dispose d'autres modes de liaisons entre ses composants (interactions d'attraction ou de répulsion), que l'interaction gravitationnelle que tout homme découvre dès sa naissance en se sentant attiré par le sol sous ses pieds, vers le centre de la

Terre. Deux corps de masses M et M' distantes de d s'attirent avec une force F , suivant la loi $F = G \cdot m \cdot m' / d^2$. La masse attire la masse.

Bien que ce soit la seule que nous ressentions directement par notre corps, c'est pourtant la plus faible des interactions physiques (notez la grande faiblesse de la constante G de la loi d'attraction universelle : $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$). C'est parce que c'est la seule qui s'exerce sur toute matière et que son effet est cumulatif sur les milliards de milliards d'atomes de matière dont nos corps sont faits, c'est une force macro, et non pas intra-atomique. Comme il y a beaucoup d'atomes dans votre corps et beaucoup plus encore dans la terre, vous vous apercevez que cette force existe, et comme il y en a encore beaucoup plus dans le soleil, la terre elle-même est attirée par le soleil et tomberait dessus si elle ne tournait pas autour, et nous tous avec elle, à la vitesse de 30 kilomètres par seconde.

C'est quand même à partir de cette faible interaction que l'on a pu puiser une énergie mécanique utilisable en l'extrayant d'une autre source mécanique (moulins à eau et maintenant centrales hydroélectriques, et indirectement moulins à vent et éolienne)

2. Force électrique: Un deuxième mode avait été mis en évidence lors de la domestication de l'électricité, où ce n'est plus la masse qui est créatrice de cette force de liaison, mais la polarité électrique + ou - . Deux électrons – et – se repoussent, un proton + attire un électron - . Ce mode de liaison entre électrons et noyau est beaucoup plus puissant que la gravitation à laquelle nous sommes habitués, mais passe inaperçu dans la vie courante parce que les atomes sont neutres, sans polarité (sauf sur le trajet des éclairs pendant les orages où l'atmosphère est ionisée), mais cette liaison a sa domination secrète sur la cohésion de la matière et règne sur la chimie où il y a échange d'électrons entre noyaux d'atomes différents. Cette liaison était donc en fait utilisée depuis la domestication du feu, mais était cachée sous le masque de la chaleur produite par une combustion, réaction exothermique d'oxydation du carbone par l'oxygène de l'air, dont Carnot a su tirer les clés de la première révolution industrielle (chaleur>travail), avant sa mise en œuvre sans masque dans la seconde révolution industrielle (domestication de l'électricité)

3. Force "forte": En pénétrant dans la structure intime du noyau des atomes, protons et neutrons eux-mêmes composés de quarks reliant ces nucléons entre eux, un troisième mode de liaison est apparu dans le milieu du vingtième siècle, nommée sans originalité: la force "forte", extrêmement puissante (10^{40} fois plus que la gravité) une sorte de colle qui les associe, mais dont la portée est si courte (10^{-13} cm) qu'elle ne dépasse pas le noyau de l'atome, c'est pourquoi elle passe également inaperçue à notre échelle. force forte parce que sa portée est trop courte, plus de force électrique puisque l'atome est neutre, et, 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 consomme ou libère une certaine quantité d'énergie, très importante pour ce troisième mode de liaison (force forte nucléaire)

Certains atomes dits radioactifs, comme l'uranium 235, possèdent un noyau très volumineux (92 protons et 143 neutrons) qui écarte un peu tous ces nucléons les uns des autres, i, autorisant l'échappement de certains neutrons (fission), libérant leur énergie de liaison sous forme de chaleur transférée au milieu proche. Par cette perte de neutrons, l'atome évolue vers un état plus stable de moindre masse, l'énergie émise correspondant à cette perte de masse selon la célèbre loi d'Einstein $E = M \cdot c^2$, 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:

- Extrayant son énergie de la domestication de la plus forte des liaisons physiques connues (la force forte liant les nucléons), 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.

- Ceci explique aussi que cette énergie est porteuse d'indépendance, car pour des énergies finale du même ordre de grandeur, la France n'importe annuellement qu'environ un demi milliard d'euros d'uranium pour sa production électrique contre environ cinquante milliards de pétrole pour les transports. Cet avantage a été d'un grand poids lors du lancement du programme nucléaire français.
- Et explique la compétitivité d'une énergie aussi dense, 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.
- **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 liaison des neutrons qui s'échappe dans l'eau primaire de la chaudière. Cet 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 cette 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 la force forte encore beaucoup plus forte que la force électrique de la combustion-chaleur, à partir d'un "combustible" qui est une matière radioactive, actuellement 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 sur le site du débat, à la contribution GR n°4.**

Donc, sauf à renoncer à l'usage de la logique, ce n'est pas dans le nombre de morts par accident nucléaire qu'il faut chercher le motif d'un refus de cette filière énergétique, car aucune des autres grandes sources d'énergie n'a fait moins de morts à production égale au cours du dernier demi-siècle.

Curiosité: On sait comment se sont formés les combustibles fossiles; mais quid des radioactifs?

Dans les premières secondes de l'univers, l'énergie gigantesque injectée au Big-Bang s'est condensée en particules les plus élémentaires (quarks et antiquarks), qui ont commencé à s'assembler en protons et neutrons, puis en noyaux légers par fusion nucléaire, et enfin en atomes d'hydrogène et d'hélium assortis de leurs électrons vers 500 000 à 1 million d'années lorsque la température a chuté vers 3000 degrés par l'expansion.

Après un milliard d'années, l'univers a commencé à perdre son homogénéité, des amas d'hydrogène se sont formés par attraction gravitationnelle, et se sont échauffés par cette compression gravitationnelle, jusqu'à des températures supérieures à 10 millions de degrés permettant la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium.

Les plus grosses étoiles, soumises à une plus forte compression gravitationnelle, atteignent des températures plus élevées autorisant d'autres types de réactions nucléaires qui épuisent l'hydrogène en quelques millions d'années seulement, conduisant à un effondrement gravitationnel qui porte leur température vers 200 millions de degrés, ce qui permet la fusion des noyaux d'hélium en noyaux de carbone, puis elles gonflent en géantes rouges, et quand tout l'hélium est consommé, elles se contractent en s'échauffant vers 500 millions de degrés, ce qui permet la formation des

atomes plus lourds : néon, oxygène, sodium... jusqu'au fer, car toutes les réactions de fusion nucléaire des corps les plus légers (de l'hydrogène au fer) dégagent de l'énergie.

Au-delà du fer, le processus de fusion devient consommateur d'énergie, donc faute de carburant, la pression radiative ne peut plus équilibrer la compression gravitationnelle et ces grosses étoiles s'effondrent alors sur elles-mêmes, l'extrême compression entre les particules permettant aux électrons de fusionner avec les protons pour les transformer en neutrons. Au stade final, ces grosses étoiles riches en neutrons explosent en supernovae.

C'est au cours de cette explosion que sous une pluie de neutrons apportant leur énergie, se forment les éléments plus lourds que le fer, jusqu'aux éléments très lourds comme l'uranium, et tous les isotopes chargés en neutrons, dont certains sont instables. Ils se transforment alors spontanément par désintégration nucléaire pour atteindre des états plus stables: ce sont les isotopes radioactifs ou radionucléides. Expulsés dans l'espace, une partie de ces radionucléides a atteint le système solaire. On les retrouve dans les planètes.

La radioactivité interne des planètes telluriques Venus, la Terre, Mars est une des sources d'énergies qui fixent la température de surface. Comme Mars est plus petit que la Terre, il contenait à l'origine moins d'éléments radioactifs et s'est donc refroidi plus vite, d'où la différence d'évolution. Sur la Terre, la radioactivité a facilité l'éclosion de la vie, sans elle la température moyenne serait 16°C plus basse.

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 4,5 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.

D'autres sources de radioactivité que cette radioactivité tellurique existent : les rayons cosmiques pénétrant dans la haute atmosphère en sont une, soit par action directe, soit par création de radionucléides en percutant des composants de l'atmosphère (carbone 14, tritium. Les examens et traitement médicaux de médecine nucléaire en sont une autre, artificielle, mais qui a les mêmes effets à dose égale.

Une grande partie du public n'a pas suffisamment conscience que la radioactivité est un phénomène naturel, que nous vivons dans une radioactivité ambiante où chaque homme reçoit une dose de rayonnement ionisant annuelle variable avec le lieu, la nature des sols et l'altitude. En France, chaque individu est soumis annuellement à une dose due aux radiations ionisantes naturelles de l'ordre de 2,4 mSv variable suivant les régions. Elle atteint 100 mSv/an dans certaines parties du monde, au Kerala (Inde), à Ramsar (Iran).

Cette radioactivité ambiante vient de plusieurs sources; sur la moyenne française de 2,4 mSv/an, on décompte :

- ~0,5 mSv venant du sol (rayonnement tellurique)
- ~0,4 mSv venant de l'espace (rayons cosmiques, doublant tous les 1500m d'altitude)
- ~1,4 mSv par respiration de radon (gaz radioactif résultant de la transformation du radium)
- ~0,4 mSv par la nourriture qui contient toujours des éléments radioactifs
- ~0,8 mSv par les examens médicaux radiographiques
- ~0,02 mSv résidus des essais de bombes nucléaires dans l'air des premières années de la guerre froide
- ~0,01 mSv provenant de l'ensemble des industries et centrales nucléaires

Les retombées en France de Tchernobyl 1986 ont représenté en 1986 0,025 à 0,04 mSv, décroissant en 1987 à 0,001 à 0,0015.

ES SURPRENANTES DECISIONS POLITIQUES

Les questions où interviennent des phénomènes physiques complexes exigent des connaissances scientifiques suffisantes pour être débattues et décidées dans la rigueur et l'objectivité. Or, il apparaît depuis quelques années que la culture scientifique est à reconquérir.

Une tribune, signée par plus de 60 personnalités, scientifiques, dont 4 prix Nobel, universitaires, responsables politiques (anciens ministres, présidents du Conseil constitutionnel, de l'Assemblée Nationale...), publiée par le Huffington Post du 26 février 2018 s'élève vigoureusement contre le recul de la rationalité scientifique dans notre société. Cette "inculture scientifique" d'une grande part du public, donc de l'électorat, est d'ailleurs attestée par le résultat d'enquêtes stupéfiant cité par Jean-Marc Jacovici (~77% des interrogés croient que les centrales nucléaires contribuent aux émissions de gaz à effet de serre), ainsi que celle d'une partie du milieu politique issu de ces élections, ont conduit ces dernières années à des décisions politiques surprenantes sans justification rationnelle, qui confirment que le langage scientifique et toutes ces statistiques vérifiées par les grands organismes internationaux et les académies nationales sont devenus inaudibles. Les informations à caractère technologique, scientifique (ITS) et médicales, sont de plus en plus complexes et difficiles à s'approprier et *l'humilité de l'ignorance serait devenue inacceptable*. Nous n'acceptons pas de ne pas savoir. La connaissance est remplacée par la conviction, l'opinion.

Les élections démocratiques sur de tels sujets mènent à considérer que tous les avis se valent, un véritable expert n'est qu'un électeur parmi d'autres, et à introduire une notion étrange et dangereuse d'une "Science citoyenne". Cette "science" ne se démontrerait plus, elle se décréterait, 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..., l'orientation est difficile si sa culture scientifique est un peu "limitée".

Une doxa populaire a pu ainsi se développer, qui est un mélange de foi dans les énergies renouvelables, de consentement contradictoire à utiliser tant qu'il sera possible les énergies fossiles malgré leur influence néfaste 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 souvent le discours rationnel inaudible.

Cet état d'esprit a conduit en 2015, par la voie démocratique, au vote de la loi LTECV prévoyant 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 d'aller dans le sens de l'objectif principal déclaré de la réduction des émissions de CO₂, qui ont au contraire augmenté depuis ces trois dernières années. Dans les autres pays, la "transition énergétique" recouvre un éventail de sens allant d'une maîtrise améliorée de la consommation d'énergie à une sortie du nucléaire, avec en toile de fond un développement très poussé des énergies renouvelables.

Le cap annoncé de cette transition reste toutefois en France la lutte contre le réchauffement climatique.

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

PREMIER RESENTI GENERAL : LES ENERGIES RENOUVELABLES SONT SEDUISANTES

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 que les grandes énergies thermique ou nucléaire, plus à échelle humaine.

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.

Tout homme soucieux d'écologie ne peut être que favorable à une limitation de l'usage des énergies fossiles puisqu'elles ne sont pas durables, étant constituées d'un stock épuisable en quelques générations au rythme croissant de leur exploitation.

Elles sont de surcroît cause de pollutions locales, et la cause principale du réchauffement climatique, 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 RESSENTI 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 fournit 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 seuil¹ et l'hormésis². 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 de 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 évaluer la compétence et l'objectivité.

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 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 pays émergents grands émetteurs de CO₂ poursuivent l'exploitation des combustibles fossiles dont ils disposent. Ils développent en parallèle l'énergie nucléaire et 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,

¹ 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.

² 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.

rendant le nucléaire moins compétitif pour quelque temps. La confiance dans l'énergie nucléaire y reste toutefois intacte, et l'exploitation des réacteurs s'est poursuivie jusqu'à 60 ou 80 ans.

- Certains pays accordent un poids plus grand au troisième terme de cette doxa et s'orientent 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%.

Une évolution aussi radicale vers une si nouvelle répartition des rôles des différentes sources d'énergie nous oblige à examiner ces ressentis le plus rationnellement possible, sans se laisser assiéger par l'émotionnel qu'ils suscitent, 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

1 : 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 donne à penser que leur capacité n'est pas limitée, Mais on ne peut en tirer plus que leur flux naturel,

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)³, 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.

³ 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 kWélectrique/m².

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.

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 généralement 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 évacuer, 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

Sauf mesures de contrôle 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. 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 d'énergie électrique apparaît le plus important à mettre en œuvre.

LE STOCKAGE

- Le plus connu et le plus puissant 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. . 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'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 CAES. 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 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, va passer à ~2 GW avec l'extension actuellement en cours, devrait être multipliée par environ 40.

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 H. 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 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 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 la CSPE qui pèse de plus en plus lourd sur les autres consommateurs.

Il est donc difficile de croire béatement que l'on va pouvoir alimenter le réseau Français avec 100% d'énergie renouvelable

stabilité instantanée des réseaux. A 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-saisonnières 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).

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. 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.

Ce risque est très 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. On devrait par ailleurs parvenir à une gestion plus rationnelle de l'évacuation provisoire des populations⁴. La norme d'évacuation est de 20 mSv/an, alors qu'il est bien reconnu des milieux scientifiques qu'aucun effet sur la santé n'a jamais été observé en dessous de 100 mSv/an. 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.

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

1.1 ⁴ [Faut-il revoir les conditions d'évacuation à la suite d'un accident nucléaire ?](#) Hervé Nifenecker, site Internet SLC 20 mai 2011.

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 césium⁵ 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 radioactives⁶.

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".

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.

Dans ses filières actuellement utilisées, l'énergie nucléaire accumule des **déchets radioactifs** issus du combustible usé, qui constituent aussi un sujet de crainte. Leur sort définitif ne sera fixé en France qu'au terme d'un processus rigoureux s'étendant jusque vers 2020. Dans cette attente, ces déchets sont stockés en piscine de refroidissement au centre nucléaire de La Hague dans des conditions de sécurité satisfaisantes. Les progrès dans la préparation du stockage souterrain définitif sont publiés chaque trimestre dans le journal de l'ANDRA. Cette question des déchets se réglera aussi progressivement par une meilleure connaissance du dossier de la part du public, et la prise de décision avant 2020 sur le mode et le lieu de stockage en France.

Parmi les éléments contenus dans les combustibles usés, les filières nucléaires actuelles, accumulent du **plutonium**. Cet isotope du plutonium est dit "civil", car il est inapte à une utilisation militaire. Stocké soit 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.

Cet aspect se clarifiera aussi dans les années 2020 par une prévision plus précise sur la date d'arrivée des réacteurs de génération IV.

Le coût des dommages que le choix du nucléaire permet d'éviter est largement supérieur aux évaluations de coûts 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, cela fait 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 ouvert⁷.

⁵ 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.

⁶ Césium : le Japon avance dans le traitement des sols et des eaux contaminées

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.

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 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, 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.

Le problème est alors d'éviter que cette crainte confuse ne rende l'approche rationnelle inaudible de façon durable, et de retrouver la rationalité de l'approche.

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 partagé⁸, 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 avec les avis des experts.

Ce papier déjà trop long n'entrera pas dans une analyse plus détaillée de toutes les questions adjacentes aux choix dont le débat public sur la PPE parle avec abondance – sobriété énergétique, doses radioactives tolérables, validité de la loi linéaire sans seuil, gestion des déchets, démantèlement capacité des ENR intermittentes...).

Le lecteur qui le souhaite peut trouver une partie de ces questions abordées sur le site du débat, dans le "Point de vue n° 51" contribution GR n°2 DOXA et ses annexes, mais s'il veut aller plus au cœur des analyses, il y a 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.

G.R.

⁸ Devise de l'Académie des technologies