

HISTOIRES D'ENERGIE & D'ECOLOGIE¹

Gilbert Ruelle, Académie des technologies

POURQUOI RACONTER DES HISTOIRE SUR L'ENERGIE ?

Simplement pour savoir de quoi on parle en découvrant au fil de ces histoires la variété des usages de l'énergie, la variété seulement apparente de ses sources, que la physique moderne ramène au nombre de 3, sa valeur qui est celle de ses usages, son coût qui n'est que celui de son extraction à partir de sources qui nous sont toutes offertes, la domestication de ces sources qui a permis de couvrir tous les besoins de l'homme (chaleur, lumière, nourriture, travail, informations), dans un hubris du développement industriel enrichissant et multipliant la population, mais commençant à dégrader l'environnement, ce qui amène à raconter aussi quelques histoires d'écologie, qui se développe sur ce terrain de l'inversion des relations entre l'homme et un environnement initialement *hostile* dont l'homme primitif devait se défendre, puis intimement connu et *modérément et écologiquement exploité* pendant les cinq millénaires de civilisation agricole du cheval, et qu'il faut maintenant *protéger* contre certaines imprévoyances de l'homme industriel

Chacun a une idée plus ou moins claire de ce qu'est l'énergie, empiétant parfois sur les idées de force ou de puissance, ceux qui en ont oublié la définition scolaire la retrouveront en annexe 1, mais même celui qui n'a pas beaucoup fréquenté l'école en a une représentation intuitive par des mots-clés qui tournent autour de cette définition précise: **l'énergie** est ce qui permet de **faire** quelque chose avec de la **force**, c'est le résultat de la **force en action**.

L'homme, après avoir transformé son instinct de conservation en esprit d'entreprise, a "**fait**" beaucoup de choses depuis l'ère du Miocène qui l'a vu naître et notre Anthropocène actuel, et pour réaliser ce développement, il a eu besoin de beaucoup d'énergie.

L'ENERGIE a donc toujours été pour l'homme un besoin qui semble avoir été facile à satisfaire puisqu'il a toujours trouvé ce dont il avait besoin, ou plutôt il a toujours su dépenser au mieux l'énergie qu'il découvrait de plus en plus abondamment, - cela s'appelle le développement - car il semble y avoir de l'énergie partout, on a su tirer de l'énergie des esclaves, du cheval, du bois, du charbon, du rayonnement solaire, du vent, du pétrole, des cascades puis des plus grandes chutes d'eau, du gaz naturel, du feu, et même de certains atomes en les faisant disparaître depuis que le magicien Einstein a découvert $E = m.c^2$, en échangeant de la masse m contre de l'énergie E .

- On n'utilise plus les esclaves parce que nous en avons maintenant à la maison quelques centaines utilisant docilement des sources d'énergies implantées dans les murs et que les galères ont été motorisées depuis longtemps. De même pour les chevaux dont nous avons presque autant sous le capot de nos voitures, et encore quelques centaines d'autres sur lesquels sont assis nos agriculteurs sur leurs tracteurs pour labourer nos champs.

- On a utilisé longtemps des moulins à vent quand les paysans apportaient des sacs de grain et d'olives pour les moulin en farine et en huile. Le goût actuel pour les sources naturelles les fait renaître sous forme d'élégantes éoliennes qui suivent les caprices du vent; quand il est fort, elles injectent de force des électrons dans un réseau électrique qui est la forme la plus en vogue du commerce d'énergie; quand il dort, les acheteurs d'électrons doivent chercher ailleurs. Le commerce est donc plus difficile car les clients de l'énergie électrique n'achètent pas des sacs d'électrons sortant du moulin, mais seulement le nombre exact d'électrons dont ils ont besoin à chaque instant, et le vent ne veut pas le comprendre et demande à être payé au mois.

- Pour les moulins à eau, dont la densité est 1000 fois celle de l'air, cela s'est mieux passé, on a pu réaliser de plus grandes puissances avec des machines plus petites, et comme il y a toujours en amont un stock d'eau plus ou moins important, on peut piloter la production et répondre à l'exigence d'instantanéité des clients de l'électricité. Cette source est si intéressante que la plupart des grands fleuves mondiaux en sont déjà équipés. On voit donc que l'intérêt de l'énergie se situe dans l'usage qu'on en fait pour satisfaire un besoin; Le soleil ne sert à rien pour couper un arbre, une cascade ne peut faire cuire un œuf.

L'énergie se déguise sous des formes diverses: *le rayonnement électromagnétique, la chaleur, l'énergie mécanique qui est le travail, l'énergie électrique, l'énergie nucléaire*, qui n'ont pas toutes la même panoplie d'usages².

- **Le rayonnement électromagnétique** : Outre son rôle très ancien dans la production végétale par le miracle de la chlorophylle, qui nous a légué en héritage nos plus grandes sources d'énergie (charbon, pétrole et gaz naturel) accumulées au cours des âges, le rayonnement solaire continue à fabriquer du bois, et avec son comparse le vent, à participer aux travaux agricoles pour le séchage des foin et de certains fruits. Les progrès de l'électronique vers le

¹ Version complète (en date du 16/01/ 2021)

² Sauf que si elles se présentent dans la nature sans que l'homme intervienne pour en prélever la forme qui lui est la plus utile, cette panoplie se réduit à un seul usage possible : la chaleur.

photovoltaïque lui permettent maintenant de participer à la production électrique en envoyant environ 10% de son énergie sur le réseau et de prendre ainsi une place parmi les sources modernes d'énergie sous forme électriques, limitée par la latitude, par son faible rendement et surtout par son intermittence.

- **La chaleur et le feu**: Cela fait quelques centaines de milliers d'années que l'homme primitif avait domestiqué le feu, et la panoplie d'usages qu'il en avait tirée l'avait déjà bien aidé; il avait pu se chauffer, s'éclairer, cuire ses aliments, durcir ses pointes de flèches, cuire des poteries d'argile et fondre des métaux, mais il n'avait pas été assez malin pour ajouter à sa panoplie l'usage le plus fécond, celui de se faire aider par le feu dans ses travaux de force. Il a fallu attendre jusqu'au début du 19^{ème} siècle de notre ère pour trouver comment faire travailler la chaleur en en extrayant une fraction sous forme d'**énergie mécanique, aussi appelée travail**, qui est la forme d'énergie mécanique la plus performante pour le développement général de la société

La domestication de **l'énergie électrique** fin 19^{ème} siècle n'accrut pas la ressource car ce n'est pas une source, mais un vecteur d'énergie qui en a par contre multiplié la consommation en apportant sa transportabilité à grande distance et sa facilité de découpage en libres quantités. Elle en élargit aussi la panoplie des usages, pouvant produire du travail, de la chaleur, de la lumière aussi bien que de des informations, générant les télécommunications, les automatismes et l'informatique³.

Ce fut l'explosion de l'énergie-travail, puis de l'énergie électrique, lançant l'ère industrielle par la machine à vapeur, puis le trio turbine-alternateur-transformateur, adaptant à tous besoins l'énergie issue de la combustion de tout ce qui peut brûler, surtout des combustibles fossiles qui représentent encore 80% de la consommation mondiale d'énergie tant les sources sont encore abondantes, et constitue par ses émissions de CO2 la cause essentielle du réchauffement climatique.

En réaction à l'hubris de ce développement industriel intensif qui a enrichi et multiplié la population, l'environnement naturel a réagi à l'accumulation progressive des divers rejets et déchets issus de ces activités par une dégradation des conditions de vie : pollution atmosphérique des grandes métropoles industrielles surpeuplées, accumulation de déchets, notamment de déchets plastiques dans les océans, baisse de la biodiversité, quelques accidents spectaculaires, et surtout un réchauffement climatique mondial provoquant notamment une montée inquiétante du niveau des océans.

L' **ECOLOGIE** s'est développée sur ce terrain de l'inversion des relations entre l'homme et un environnement initialement *hostile* dont l'homme primitif devait se défendre, puis intimement connu et *modérément et écologiquement exploité* pendant les cinq millénaires de civilisation agricole du cheval, et qu'il faut maintenant *protéger* contre certaines imprévoyances de l'homme industriel.

ET QUID DE L'ENERGIE NUCLEAIRE ? Le 20^{ème} siècle a connu un approfondissement inédit de toutes les sciences, et notamment de la physique, concernant aussi bien l'infiniment grand de l'univers que l'infiniment petit de la matière, avec Einstein et la relativité générale, et en même temps l'école de Copenhague et la physique quantique. L'énergie eut sa part dans cette évolution par la domestication de l'énergie atomique dont l'entrée militaire fracassante mit fin avec 2 bombes à la dernière guerre mondiale en 1945, ce qui imprima dans l'esprit du public une ineffaçable image de superpuissance, de danger, de risque à cette énergie si disproportionnée avec ce que l'on connaissait.

Les applications civiles se sont développées dans le domaine médical et dans l'énergie, montrant après plus d'un demi-siècle d'exploitation de ~450 réacteurs dans le monde, que **l'énergie nucléaire** obtient les meilleures notes dans tous les domaines, et notamment de très loin les meilleures notes concernant l'incidence sur la santé publique, ainsi que sur l'efficacité de la lutte contre le réchauffement climatique, ce qui en fait la source d'énergie la plus "verte" après deux siècles d'énergie plutôt "noire" à 80%.

Une partie du public ignore ces vérités, car il refuse dogmatiquement toute comparaison avec d'autres sources d'énergies, tant cette forme d'énergie quasi magique lui semble encore pleine d'inconnu et de risques que l'on n'a pas encore su imaginer; il milite contre le nucléaire, aidé par d'autres parties du public qui ont des intérêts particuliers dans telle ou telle autre source d'énergie et constituent de puissants lobbies. Voilà pourquoi raconter des histoires vraies sur l'énergie, car le public est plus sensibilisé par les médias sur la nécessaire protection de l'environnement, qu'informée avec objectivité des réalités scientifique. Ce public lit et entend donc tout et son contraire sur l'énergie, et retient de ses lectures et écoutes des médias et du monde politique des images connotées dépendant de son niveau de connaissances scientifiques.

Il classe **ECOLOGIE** parmi les mots à connotation positive, comme nature, renouvelable, vert, bio, parce que tout le monde aime bien la nature, surtout depuis que l'on est passé d'une civilisation agricole rurale à des activités industrielles ou de services dans une vie citadine.

ÉNERGIE est un mot sur lequel il hésite un peu plus; il lit que c'est une clé du développement, mais que doit-il penser du développement dont il a oublié qu'il jouit et dont pourtant il ne lit pas que du bien ? Il lit aussi qu'il faut économiser l'énergie, il l'associe alors à ressources, à facture; sa connotation en devient un peu plus douteuse, évoquant pollution, CO2, réchauffement climatique ou pénurie, qui incitent à en réduire sa consommation sur un chemin de décroissance.

³ L'adolescent qui travaille sur son ordinateur et le soir recharge téléphone portable, ordinateur et tablette sur une prise de courant de sa chambre a-t-il une pleine conscience de la noblesse de cette forme d'énergie?

Certains perçoivent même la connotation du mot énergie comme franchement négative lorsqu'il est suivi de nucléaire, alors qu'elle reste positive lorsqu'énergie est suivi de renouvelable ou précédé de bio.

La démocratie se mérite par un niveau de connaissances et d'information objective des citoyens suffisant pour se construire un jugement rationnel sur les sujets de société complexes tels que l'énergie et l'écologie, ce qui permet de réduire le risque de contradiction entre déclarations générales d'intention et décisions spécifiques engagées par des représentants élus.

Pour les citoyens-électeurs qui souhaiteraient se familiariser davantage avec ce domaine de l'énergie, en complétant peut-être leurs connaissances, nous proposons ici une sorte de roman historique, parcourant l'histoire avec les lunettes de l'énergie, comme d'autres romans historiques le parcourent avec les lunettes des grandes découvertes, ou des mouvements révolutionnaires, ou des routes de la soie.

Connaître suffisamment l'histoire des relations entre l'homme et l'énergie est indispensable pour mieux comprendre l'accélération des progrès en même temps que des problèmes et des risques qui nous ont été légués par les trois dernières transitions énergétiques des deux derniers siècles. C'est ce que nous essaierons de faire ici en suivant notre besoin croissant d'énergie, les lents progrès sur des millénaires et l'envolée des deux derniers siècles, les impacts sur la société et sur notre environnement et notre santé, l'entrée en scène du souci écologique, ainsi que les fausses routes possibles dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Dans cette note, nous avons pris le parti de présenter les sources fondamentales d'énergie dans leur classification de la physique moderne. Ce choix chasse le sentiment de totale diversité des sources d'énergie possibles que pouvait laisser croire la liste "à la Prévert" du début de cette introduction, en ramenant cette diversité aux trois familles fondamentales d'énergie (gravitationnelle, électrique, nucléaire) et en montrant la parenté de structure puisqu'elles apparaissent toutes trois comme des dérangements des divers niveaux de composants de la matière (atomes, protons, neutrons, électrons); ce mode de présentation élargit l'angle de vue, de l'histoire des hommes à l'histoire de l'univers et permet notamment de démystifier l'énergie nucléaire qui pose problème à certains.

A son début connu ($t = 10^{-43}$ seconde) **l'univers et l'énergie étaient confondus dans le Big Bang**. Cet univers de rayonnement électromagnétique est entré immédiatement en expansion et refroidissement qui a affaibli ce rayonnement et l'a transformé en matière dont l'univers est actuellement essentiellement constitué. **Au cours de son premier milliard d'années, l'énergie portée initialement par le rayonnement du Big Bang se déporta sur la matière nouvellement créée, où elle se cache aujourd'hui sous la forme de liaison entre les constituants de cette matière, et d'où nous avons appris peu à peu à en extraire une partie en modifiant ces liaisons.**

L'essentiel de l'énergie utilisée et utilisable par l'homme est donc maintenant cachée dans la matière, sous la forme de 3 interactions fondamentales (aussi nommées liaisons ou forces) reliant entre eux les constituants de cette matière, et issues des âges successifs de formation de celle-ci :

1. La **liaison gravitationnelle**, ou "attraction universelle", attirant tous les corps entre eux, de l'atome aux astres en fonction de leur masse et de leur distance, nous est familière depuis nos premières chutes de l'enfance, la seule perçue par nos sens et la seule connue à l'époque de Newton. Elle gouverne l'énergie que l'on peut extraire du déplacement des masses, par exemple les énergies hydraulique et éolienne qui prélèvent une part de l'énergie mise en œuvre dans les mouvements renouvelés des masses d'eau et d'air sous les ensoleillements et climats du présent (solaire et éolien) ou du passé récent (hydraulique).
2. La **liaison électrique** entre composants électriquement chargés de l'atome (+ ou-), gouverne toute la chimie, qui décrit le réarrangement électriques des composants chargés (noyau, protons, électrons) des atomes pour en former d'autres. Cette liaison très puissante gouverne donc toutes les énergies thermiques de combustion, puisant dans le stock de carburants fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) pour assurer les usages (chauffage, transports, motorisations diverses production d'électricité...) qui ont permis le développement industriel depuis le 19^{ème} siècle et porté progressivement au niveau mondial le problème du réchauffement climatique par le déchet inévitable de la combustion : le CO₂.
3. La **liaison "forte"** entre composants du noyau de l'atome (neutrons et protons) est encore plus puissante. Elle gouverne toutes les énergies nucléaires : celles du passé où les réacteurs nucléaires naturels d'Oklo (Gabon) n'ont produit que de la chaleur, ceux du présent produisant de l'électricité par fission d'atomes lourds fissiles, puis fertiles, peut-être complétée au siècle prochain par la fusion d'atomes légers.

Au-delà de cette énergie-matière issue du Bigbang et de l'expansio-refroidissement qui suivit, le petit reste d'énergie frappant la Terre vient de l'utilisation non différée du rayonnement du soleil autour duquel elle gravite.

La version complète comporte en Annexe 1 une page de rappel des connaissances scolaires sur l'énergie que peuvent sauter les lecteurs qui n'en ont pas besoin.

PAGINATION

INTRODUCTION PAGES 1 A 3

PARTIE 1 DANS L'HISTOIRE DE L'UNIVERS, L'ENERGIE S'EST FAITE MATIERE PAGES 5 A 9

PARTIE 2 L'HISTOIRE HUMAINE A ETE GUIDEE PAR LE BESOIN D'ENERGIE PAGES 10 A 19

PARTIE 3 CHOIX DES SOURCES D'ENERGIE PAGES 20 A 38

ANNEXE 1	Rappels des grandeurs physiques essentielles	Page 39
ANNEXE 2	Chronique des accidents de Tchernobyl et Fukushima	Pages 40 à 42
ANNEXE 3	incidence sur la santé humaine des différentes sources	Pages 43 à 48
ANNEXE 4	La radioactivité, sa nature, ses risques, ses mesures.	Pages 49 à 54
ANNEXE 5	Les déchets radioactifs, leur gestion	Pages 55 à 59
ANNEXE 6	L'hydrogène peut-il permettre un mix 100 % renouvelable ?	Pages 60 à 75
ANNEXE 7	Sites de captage et séquestration de CO2 opérationnels	Pages 76à 79
	Description et difficultés du captage-stockage du CO2	Pages 79à 82

PARTIE 1

DANS L'HISTOIRE DE L'UNIVERS, L'ENERGIE S'EST FAITE MATIERE

Il est piquant de remarquer qu'après des siècles de contemplation de cet univers immense par les astronomes pour essayer d'y comprendre quelque chose, ce sont les physiciens du tout - petit, de l'atome, qui les ont aidés au cours u vingtième siècle en reconstituant l'histoire du tout-grand, en remontant beaucoup plus loin que l'histoire des hommes, quand il n'y avait pas encore d'hommes.

Ayant observé que l'univers était en expansion et se refroidissait en perdant de la densité d'énergie, ces physiciens ont regardé dans le rétroviseur du temps en envoyant des impulsions d'énergie de plus en plus fortes dans le vide, espérant recréer ainsi des particules de la matière qui existait à ces époques où l'énergie était plus dense ($\epsilon = mc^2$), et reconstruire ainsi l'histoire de la matière.

Cette méthode originale de recherche historique a remarquablement fonctionné, et c'est ainsi que la physique a écrit un grand livre d'histoire où elle se permet de penser maintenant que notre univers est âgé de 13,7 milliards d'années, non pas à partir d'un moment $t = \text{zéro}$, mais $t = 10^{-43}$ seconde. A 10^{-43} seconde l'univers existe et occupe déjà de l'espace, mais si peu : 10^{-24} micron, et sa température est de l'ordre de 10^{32} degrés. La super-hyper-gigantesque **énergie** injectée dans cette création se transforme en quelque chose qu'on appelle la matière ou la masse, selon la loi d'Einstein $E = mc^2$. Le temps vient d'être inventé en même temps que l'espace, et la température inouïe de cet univers initial baisse à toute

allure avec le temps t qui passe, en $1/\sqrt{t}$, pendant que son volume augmente follement en t^2 . Cela ressemble tellement à une explosion que les physiciens ont donné à ce premier moment de l'univers le nom de Big Bang.

La plupart des lois actuelles de la physique n'étaient pas encore applicables à ces températures diaboliques parce que les formes structurées sous lesquelles on perçoit actuellement la matière, ses atomes et leurs interactions n'existaient pas encore ; l'existant était une espèce de soupe de cette espèce de "matière" récemment créée et faite de quarks, qui sont les constituants de base de la matière actuelle, et d'antiquarks, qui sont symétriquement les constituants de l'antimatière que l'on sait maintenant fabriquer dans les grands laboratoires comme celui du CERN à Genève en injectant de l'énergie dans le vide, car toujours selon $E = m.c^2$, toute injection d'énergie E crée de la masse m , sous la forme de matière et d'antimatière en quantités égales afin de respecter la conservation de ce qu'on appelle les charges, électriques ou autres. On trouve aussi dans cette soupe des électrons, et donc des antiélectrons, des neutrinos, des antineutrinos et des photons, qui sont leur propre antiparticule. Les particules et antiparticules se réassocient en s'annihilant, restituant leur énergie qui recrée d'autres particules et antiparticules dans une ronde effrénée. Cette soupe originelle brûlante était régie par ce qu'on pense avoir été une loi unique, dite "superforce", qui a sévi pendant cette "ère de grande unification", jusque vers 10^{-38} seconde, puis, au cours de l'expansion et du refroidissement qui l'accompagne, cette superforce cèdera la place aux forces qui constituent notre physique actuelle et apparaissent progressivement dès que la baisse de température le permet:

La force de gravité sort de l'ombre vers 10^{-33} seconde, puis vers 10^{-32} seconde la force "forte", cette espèce de colle qui assure la cohésion des noyaux atomiques, et à peu près en même temps une force "électrofaible" provisoire, ces deux dernières forces étant moins palpables dans la vie quotidienne que la gravité. Vers 10^{-12} seconde, la température a chuté en dessous de 10^{15} degrés, et cette dernière force électrofaible se différenciera elle-même en force "faible" et en force électromagnétique (voir annexe 0 sur le concept de force en fin de partie 1).

Le volume de cet univers nouveau-né double tous les 10^{-34} seconde, c'est la phase inflationnaire, où l'univers grandit soudainement de plusieurs milliards de fois ; la vitesse d'expansion de ce super-BIG-BANG dépasse la vitesse de la lumière, ce qui n'est pas concevable avec les lois actuelle de la physique selon Einstein; on pense que lorsque l'univers mesurait un centimètre, la lumière n'avait pu parcourir depuis le temps zéro qu'environ 10^{-30} centimètre, il a donc pu se former pendant cette courte période d'inflation supra-luminale d'autres sous-univers ne pouvant plus jamais communiquer entre eux par la suite, dont le nôtre ne serait que l'un d'eux. Du pain béni pour la science-fiction ! Notre univers occupe bientôt une sphère de l'ordre de quelques millions de kilomètres ; Au cours du refroidissement très rapide qui accompagne cette inflation brutale, la soupe épaisse des quarks et antiquarks qui constituait essentiellement l'univers s'est épicée de particules plus légères appelées leptons, qui sont les électrons bien connus et les neutrinos et muons qui le sont moins, ainsi que leurs antiparticules correspondantes.

Entre un millionième et un dix millième de seconde la température baisse de 10^{13} à 10^{12} degrés et ne peut plus interdire l'action de la force "forte" qui agglutine alors trois par trois les quarks d'une part, et les antiquarks d'autre part pour former des particules lourdes que l'on appelle des hadrons, incluant nos protons et neutrons actuels, ainsi que leurs frères ennemis les antiprotons et les antineutrons, mais très vite la température devient trop basse pour continuer à créer de telles particules lourdes.

La température continue à décroître de 10^{12} à 10^{10} degrés et ne dispense plus assez d'énergie pour créer des particules lourdes constituant les noyaux, mais reste assez haute pour continuer à créer des particules légères comme les leptons jusqu'à environ 1 seconde où un massacre entre leptons et anti-leptons de 1 à 13 secondes va encore émettre

beaucoup d'énergie lumineuse et ne laisser subsister qu'un faible nombre d'entre eux vers 3 milliards de degrés, qui vont commencer à flirter avec les protons et neutrons nés juste avant eux pour constituer progressivement les futurs atomes. Ce seront d'abord les protons et neutrons qui pourront s'accoupler de manière stable dès que la température sera descendue à un million de degrés vers 3 minutes d'âge de l'univers pour former plus tard les premiers noyaux légers comme ceux de l'hydrogène et de l'hélium qui ne nécessitent que 1 à 4 protons et neutrons. Cette formation des noyaux atomiques les plus légers ne dure que de 3 à 30 minutes d'âge car ensuite la température est trop basse pour permettre la fusion nucléaire ; tout le stock des composants de la matière de l'univers est alors constitué et sa masse est définie.

Avec toute cette énergie lumineuse libérée, l'univers rayonne : « Que la lumière soit », et la lumière continue d'ailleurs à se créer par les combats d'arrière-garde entre les derniers leptons et anti-leptons, mais la température baissant, les photons ont de moins en moins d'énergie et ne peuvent plus traverser le plasma de protons et d'électrons qui les absorbe, le monde devient alors opaque.

On change d'échelle, au bout d'un temps de l'ordre de 500.000 à un million d'années, la température est tombée vers 3000 degrés et les photons du rayonnement n'ont plus assez d'énergie pour empêcher le mariage des leptons et des hadrons après un très long flirt : c'est la naissance des atomes les plus simples d'hydrogène et d'hélium, électriquement neutres puisqu'ils associent 1 proton positif à 1 électron négatif pour l'hydrogène, ou 2 protons à 2 électrons pour l'hélium. Ces deux corps élémentaires constituent encore aujourd'hui environ 98 % de la matière de l'univers.

Ces atomes stables nouvellement nés ont un comportement totalement différent de celui de leurs composants vis à vis de la lumière : alors que les protons et électrons dans leur état libre que permettait une température plus élevée, étaient de grands absorbeurs de photons et avaient rendu l'univers opaque, leur mariage sous forme d'atomes leur a fait perdre cette agressivité et l'univers redevient transparent. A nouveau « fiat lux ».

Ce gigantesque rayonnement de lumière à 3000 degrés s'est propagé dans tout l'univers au fur et à mesure de son expansion et de son refroidissement en allongeant sa longueur d'onde ; ce rayonnement fossile subsiste de nos jours et a pu être identifié en 1965 par Penzias et Wilson qui en ont été récompensés en 1978 par le prix Nobel. Sa température actuelle n'est plus que de 2,7 degrés K. Sur 1000 photons qui parcourent le ciel aujourd'hui, 999 voyagent depuis cette explosion de lumière, soit plus de 400 photons par centimètre cube d'espace, mais ils sont très affaiblis, leur énergie individuelle n'étant plus que de un millième de celle des photons solaires. Cette explosion de lumière marqua la fin de l'ère radiative de l'univers à un peu moins d'un million d'années.

L'énergie lumineuse qui dominait le cosmos va céder progressivement la place à l'énergie concentrée sous forme de matière, car l'expansion n'affecte pas le contenu énergétique mc^2 de la matière, alors qu'elle affaiblit celui des photons dont la longueur d'onde s'allonge avec l'expansion.

Aujourd'hui encore, le nombre de photons de lumière est trois milliards de fois supérieur au nombre de nucléons de matière, mais leur énergie est très faible: il y a dix mille fois plus d'énergie dans la matière de l'univers que dans tout le rayonnement fossile.

On peut dire que l'énergie, qui a toujours dominé le monde depuis $t = 10^{-43}$ seconde, le domine alors sous la forme de matière ; la matière domine maintenant le monde.

Un milliard d'années passent, la force électromagnétique ne se fait plus guère sentir car les atomes nouvellement formés sont électriquement neutres, les forces forte et faible passent également inaperçues parce que leur portée est bien trop courte et ne concerne que le noyau des atomes ; la force qui prend le pas sur toutes les autres pour sculpter l'univers est maintenant la gravitation : la matière attire la matière.

La température moyenne de l'univers tombe vers 100K, de légères disparités de densité apparaissent, comme des grumeaux dans la purée, amplifiant ici ou là les forces de gravitation et concentrant peu à peu davantage de matière dans ces zones, formant des milliards de super-amas représentant chacun une masse de 10 millions de milliards de fois celle de notre soleil, d'où émergeront peu à peu par agglutination gravitationnelle les galaxies et les étoiles.

Cette compression gravitationnelle va porter le cœur des étoiles nouvellement formées à des températures supérieures à 10 millions de degrés, permettant la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium, et amorçant ainsi une réaction nucléaire entretenue qui fait que les étoiles brillent, mais pas éternellement puisqu'elles consomment de l'hydrogène comme combustible. Pour les plus grosses étoiles qui prédominent à ce stade, la température est encore plus élevée, autorisant d'autres réactions nucléaires plus violentes ; ces étoiles vont en quelques millions d'années consommer leurs noyaux d'hydrogène, puis amorcer un effondrement gravitationnel qui va faire monter la température vers 200 millions de degrés, permettant la fusion des noyaux d'hélium en noyaux de carbone. Ces étoiles gonflent alors en géantes rouges, puis 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, et ces grosses étoiles effondrées explosent alors en supernovae aussi brillantes que 100 millions de soleils pendant plusieurs semaines, dispersant dans l'espace interstellaire les noyaux d'éléments lourds qu'elles avaient cuits dans leur sein, dont certains forment les rayons cosmiques qui traversent notre haute atmosphère, mais dont la plupart vont s'associer à des électrons pour former des atomes errant en nuages de poussière. Ces poussières se rassemblent par gravitation et se réchauffent à nouveau par

compression gravitationnelle, reformant d'autres étoiles plus jeunes, entourées elles-mêmes d'anneaux de poussière qui s'agglutinent en formant des planètes.

C'est ainsi qu'est né notre soleil il y a 4,57 milliards d'années et qu'il s'est entouré de ses neuf planètes où sont rassemblés les éléments plus lourds et plus riches dont les multiples combinaisons ont conduit sur notre Terre à des molécules de plus en plus complexes jusqu'à ce qu'un jour certaines parviennent à se diviser en se reproduisant à l'identique, et la vie est apparue, d'abord sous forme d'organismes monocellulaires pendant quelques milliards d'années, se complexifiant ensuite en organismes pluricellulaires, en végétaux et animaux pour conduire jusqu'à nous.

Dans la limite de nos connaissances, on peut résumer ainsi cette petite histoire de l'énergie-univers :

L'énergie E, sous forme de rayonnement électromagnétique constitue l'univers lors du premier temps connaissable (10^{-43} seconde). Cette forme initiale de rayonnement s'est affaiblie en se transformant en matière de masse m ($E = m.c^2$) par expansion et refroidissement.

Dans cette matière qui est la forme principale actuelle de l'univers, l'énergie investie pour sa création est présente sous forme de l'énergie de liaison des divers composants des atomes constituant cette matière (force forte entre nucléons et entre quarks, force électrique entre électrons et entre noyau et électrons, force gravitationnelle entre atomes)

L'histoire des hommes ne commence que beaucoup plus tard, mais là encore, l'énergie est un des maîtres-mots qui aident à en suivre l'évolution, à travers des transitions énergétiques qui marquent chacune un progrès dans la restitution d'une partie de l'énergie investie en matière, par une exploitation de plus en plus efficace de chacune de ces forces de liaison.

LE FUYANT CONCEPT DE FORCE

Ces familles de force étant celles qui gèrent encore notre univers actuel, méritent une parenthèse de quelques instants pour mieux cerner cette notion de force qui est la clé de celle d'énergie qui domine aussi bien l'histoire de l'univers que celle des hommes, et mieux comprendre ce classement en famille en partant de la seule connue à l'époque de Newton, la force de gravité.

Une force, c'est quoi ? Ceux qui se souviennent de leurs années de potaches et de Newton répondent : $F = m \cdot a$, où a est une accélération, donc la force, c'est ce qui modifie la vitesse d'un corps de masse m.

*Oui, mais cette loi ne décrit que l'effet d'une force sur une masse, pas l'origine de la force. Une masse ne fait pas que subir l'effet d'une force, elle crée elle-même une force de gravitation par la loi de l'attraction universelle $F = m \cdot m' / d^2$, m et m' étant les masses de deux corps distants de d. **La masse attire la masse en créant une force d'attraction à laquelle son mouvement se soumet.** C'est ainsi que la masse de notre planète Terre attira la masse de la pomme qui rompit sa queue et tomba en accélérant sur la tête de Newton.*

Ces formules mathématiques sont-elles des lois ou des définitions de ce qu'est une force ? Descartes avait chassé la notion de force, et Newton l'a réintroduite.

À l'époque de Newton, on n'appréhendait qu'une seule origine des forces : la gravité qui faisait tomber les pommes et se balancer les pendules ; mais quand la pomme est tombée par terre, elle ne bouge plus, cela veut dire qu'elle n'est plus soumise à aucune force, pourtant la force de gravité s'exerce toujours sur elle ; oui, mais il y a le sol sur lequel elle repose, donc cela veut dire que le sol exerce sur la pomme une force égale et opposée à celle de la gravité.

C'est une seconde loi de Newton : lorsqu'un corps est au repos, la réaction est égale et opposée à l'action, la réaction du sol est égale et opposée à l'action de la gravité sur la pomme, de même qu'avant de tomber, la réaction de la tige qui suspendait la pomme avant de casser était égale et opposée à l'action de la gravité.

Pour Newton, une force est une force, qu'elle soit d'action ou de réaction, mais a-t-il jamais soupçonné qu'elles pouvaient être de nature physique totalement différentes, que la force de réaction du sol et de la tige de pomme étaient des forces de la famille électrique, qu'il ne connaissait pas à l'époque ? S'il l'avait su, cela lui aurait ouvert des horizons sur l'énormité de la force électrique par rapport à la force de gravité puisqu'il suffit de l'attraction électrique des atomes des quelques millimètres carrés de section de queue de pomme pour retenir cette pomme contre la force d'attraction de tout notre globe terrestre sur lequel est planté le pommier.

Pour comparer quelques propriétés de chacune de ces familles, utilisons la vision rustique de l'atome à travers les protons, neutrons et électrons, en considérant deux protons très proches l'un de l'autre, puisque c'est une particule sensible à chacune des quatre forces.

- ◆ *Prenons comme unité la plus grande de ces forces, la force forte qui assure la cohésion du noyau de l'atome en attirant l'un contre l'autre les nucléons (protons et neutrons). C'est une force intra-nucléaire dont le rayon d'action ne dépasse pas le noyau.*

Il faut une énergie énorme pour vaincre cette cohésion nucléaire. On exprime généralement cette énergie en électron-volt (e.V)¹. On peut aussi l'exprimer en température, qui est une image de la vitesse moyenne des particules et donc de leur énergie cinétique : $E = k.T$. Un électronvolt correspond à 10.000 degrés, c'est l'énergie cinétique qu'acquiert une particule portée à 10.000 degrés.

Il faut des énergies de plusieurs millions d'électronvolts, ce qui correspond à 10 milliards de degrés, pour vaincre cette force de cohésion du noyau, alors qu'il suffit d'une dizaine d'électronvolts pour extraire un électron d'un atome d'hydrogène. C'est seulement dans les atomes très lourds, au-delà de l'uranium avec ses 92 protons que cette force forte ne parvient plus à contrecarrer la force électrique de répulsion exercée sur un proton par la centaine de ses voisins encombrés aussi de neutrons, et ne maîtrise plus aussi bien la cohésion du noyau qui laisse échapper spontanément, ou sous le choc d'un neutron, quelques-uns de ses composants, cela s'appelle la fission nucléaire et la radioactivité.

- ◆ *La force électrique est plus de 100 fois plus faible. Attractive entre particules de signe contraire +-, répulsive entre celles de même signe, elle assure la cohésion de l'atome en s'exerçant entre la charge + du noyau et la charge - de l'anneau d'électrons gravitant autour. C'est une force intra-atomique car son rayon d'action ne dépasse pas l'atome neutre.*
- ◆ *La force faible (dont il est inutile de parler ici) est d'environ un cent millième.*
- ◆ *Il n'existe qu'une seule autre force qui soit encore plus faible que la force faible, c'est la force de gravitation, qui se situe vers 10^{-40} fois en dessous de la force forte.*

La gravité est pourtant la seule force dont notre corps ressent les effets car 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 plus intra-atomique.

Ce qui est aussi important que les ordres de grandeur relatifs de ces quatre forces est leurs portées respectives. Seules les forces gravitationnelles et électriques ont une portée infinie, mais avec une intensité qui décroît comme le carré de la distance. La force électrique pourrait donc être aussi une force macro puisque son rayon d'action est infini, et comme elle est beaucoup plus intense que la gravitation, elle pourrait prétendre à dominer le monde ; La seule raison pour laquelle les forces électriques ne dominent pas l'univers est que presque partout les charges électriques positives et négatives sont en équilibre, donc sauf pendant les orages où cet équilibre est momentanément rompu, la force électrique n'a pas de pouvoir global sur le monde macroscopique qui est pratiquement neutre, mais elle a sa domination secrète sur la cohésion de la matière et sur toute la chimie.

Les forces forte et faible ont au contraire des rayons d'action très courts, respectivement 10^{-13} et 10^{-16} cm, avec des lois complexes de variation en fonction de la distance. La force forte manifeste la loi la plus bizarre : pour des distances extrêmement courtes, elle est très faible, permettant aux quarks qu'elle relie à l'intérieur du noyau de jouir d'une apparente liberté de mouvement tant qu'ils restent très proches, mais s'ils s'éloignent l'un de l'autre tout en restant à l'intérieur du nucléon, la force de rappel devient vite énorme ; ce comportement de la force forte, comparable à celui d'un élastique, qui exerce une force de rappel de plus en plus forte lorsqu'on l'étire, est exactement le contraire de celui de la force électrique qui s'amollit avec l'éloignement .

Cette forme de loi étrange confère aux quarks cette liberté dite "asymptotique" qu'ils manifestent à l'intérieur des nucléons où ils tournoient à des vitesses prodigieuses, mais si on tente de séparer des quarks, l'énergie nécessaire pour accroître la distance entre eux augmente si rapidement que bien avant que les quarks puissent être séparés, l'apport d'énergie provoque la création d'une nouvelle paire quark-antiquark.

Si on prend en compte ces rayons d'action, on constate qu'à l'extérieur d'un atome, il n'y a plus de force forte parce que sa portée est trop courte, 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 quatre forces, la gravitation, sur laquelle il a bâti toute sa gloire il y a seulement 300 ans.

Mais le coup de génie de Newton est que quelle que soit la nature de la force, la loi d'action sur les masses $f = m.a$ reste la même. Il ne l'a pas fait exprès puisqu'il ignorait qu'il y en avait plus d'une, mais on sait maintenant que la force électrique qui s'exerce sur un électron de masse m l'accélère suivant la même loi.

¹ Un Electron-Volt est l'énergie cinétique d'un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt

Ce concept globalisant de force évite d'avoir à se préoccuper du mécanisme intime de la création de ces forces, c'est un peu semblable aux grandeurs de synthèse de la thermodynamique comme la pression ou la température d'un fluide, qui rendent compte globalement du comportement agité des molécules, sans que l'on ait à se soucier de calculer le comportement de chacune d'elle, ce qu'on ne saurait pas faire. Et Newton n'a pas eu besoin de se préoccuper du graviton pour énoncer sa fameuse loi de l'attraction universelle $f = g.m.m'/d^2$, qui lui a permis d'expliquer pourquoi les pommes tombaient et les planètes tournaient.

Le terme de force présente donc bien le caractère d'un modèle mathématique puisqu'il correspond à des réalités physiques multiples : l'une agit sur toute la matière qui existe, c'est la gravité, l'autre uniquement sur la matière électrisée, c'est la force électrique ; seules ces deux là étaient connues avant 1930, puis une autre est venue s'ajouter, qui agit seulement sur les trucs du genre proton, neutron et quarks, c'est la force forte.

Pour aller au-delà dans la profondeur du concept, on doit entrer dans la physique quantique et la notion de particules virtuelles, qui n'ont pas leur place dans un papier de vulgarisation ne visant qu'à éclairer les choix actuels relatifs à l'énergie.

PARTIE 2

L'HISTOIRE HUMAINE A ETE GUIDEE PAR LE BESOIN D'ENERGIE,

Dès son entrée en scène il y a 4 à 5 millions d'années, l'homme a fait connaissance avec l'énergie : il en dépensait pour fuir ou tuer les carnivores qui le menaçaient, pour chasser, pêcher, cueillir pour se nourrir, pour se chauffer et s'éclairer dans les grottes où il se réfugiait. Toute cette pratique de l'énergie lui était familière sans qu'il eût à se préoccuper d'en appréhender le concept. Il sentait bien qu'il est plus fatigant de grimper aux arbres que d'en descendre, sans avoir besoin de savoir que ce ressenti était l'expression de la liaison gravitationnelle. En toute ignorance, il avait même fait usage d'une autre liaison fondamentale beaucoup plus puissante, la liaison électrique, en domestiquant le feu.

En notre 21^{ème} siècle actuel, l'homme s'est beaucoup développé 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. 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...

L'improbable fil conducteur entre l'homme des cavernes survivant dans une nature hostile, et son lointain descendant actuel au volant de sa voiture n'est-il pas simplement l'instinct de survie, devenu esprit d'entreprise, qui l'a constamment conduit à améliorer sa qualité de vie, et en a trouvé les moyens en captant à son service de plus en plus d'énergie, et qui va peut-être devoir revenir au 21^{ème} siècle à un plus strict instinct de survie pour réduire certains risques sur le climat, la surpopulation et la pollution, induits par un développement mal contrôlé?

Ce développement s'est réalisé par étapes, que l'on a nommées en 2018 TRANSITIONS ENERGETIQUES. Les deux premières de ces transitions sont très anciennes et avaient été très lentes, s'étalant sur des millénaires, et ne faisant que domestiquer pour l'usage de l'homme des phénomènes naturels observables dans la nature comme l'interaction gravitationnelle, le rayonnement solaire, la vie végétale et animale. La réflexion des nombreuses générations qui ont suivi lui a ensuite permis d'imaginer et de construire des outils de plus en plus performants pour parvenir à cette appropriation d'énergie et à son meilleur usage, ce fut l'évolution de la technologie. Cette technologie lui a permis au 20^{ème} siècle d'analyser les plus subtils composants de la matière et de commencer à mieux comprendre cet univers, et même d'en reconstituer l'histoire qui vient d'être contée dans la partie 1, et d'identifier l'origine de la puissance des trois dernières transitions des deux derniers siècles, qui ont grandement accéléré le rythme du développement.

PREMIERE TRANSITION

Le premier scoop humain en matière d'énergie fut la maîtrise du feu. Peut-on parler d'invention du feu pour ces êtres primitifs qui avaient sous leurs yeux les feux de forêts déclenchés par la foudre ? Il suffisait de ramasser quelques braises lors d'incendies de forêts et d'entretenir ce feu, mais on peut aussi penser qu'il était préférable de savoir allumer soi-même du feu lorsqu'on voulait l'utiliser, sans avoir à attendre le prochain orage ; il s'agissait alors bien d'une invention. Par des bricolages multiples, en cognant deux silex pour en tirer des étincelles, en frottant deux branches sèches pour en tirer de la chaleur, il a fini par domestiquer le feu. L'instinct de survie y était plus nécessaire qu'une pensée profonde, c'est pourquoi cette domestication du feu est située vers - 450.000 alors que l'homo n'a été qualifié de sapiens que vers -200.000.

Le feu ne leur apporta pas d'énergie dans son sens étymologique de travail (erg, werk, work). Il faudra attendre quelques centaines de milliers d'années pour que vers 1820 de notre ère, les Carnot et Watt comprennent comment faire travailler le feu. Ce fut donc plutôt une innovation écologique qui améliora leur environnement en leur apportant plus de confort et de sécurité par une température plus clémente, la cuisson de leurs aliments, un peu d'éclairage de leurs cavernes pour en éloigner les animaux sauvages, et de durcir leurs pointes de flèches pour mieux se défendre et chasser.

L'expérience de cette vie difficile leur enseigna 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.

DEUXIEME TRANSITION

10.000 à 8000 ans avant notre ère, un début d'agriculture amorça un immense changement dans la vie des hommes et leurs structures sociales, et permit de passer d'une civilisation de chasseurs-cueilleurs à des civilisations sédentaires où des villes ont pu se développer sur la base de surplus agricoles, dégageant du temps pour d'autres activités comme la métallurgie, les arts, et de construire des empires. Une telle transformation dépasse le cadre de l'énergie. On pourrait certes considérer avec humour que ce fut la première forme de maîtrise de l'énergie solaire sous le prétexte que tout ce qui pousse sur Terre le doit au soleil, mais l'énergie y contribua aussi de façon plus matérielle, car sous l'angle strict de l'énergie-travail, les hommes trouvèrent la 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 appelés à l'aide, le cheval, domestiqué vers -3500, 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.

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 partageaient 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. L'intimité de la relation entre l'homme et le cheval fut telle, surtout dans les guerres, que le cheval a participé à la gloire des hommes célèbres à travers leur statue équestre, l'un rehaussant le prestige de l'autre. A Bombay, la monumentale porte de l'Inde ouvre sur la statue équestre du dernier empereur anglais des Indes Edouard 8, soulignant la grandeur du colonisateur.

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. 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, peuples amérindiens qui ignoraient l'existence de cet animal chevauché par des hommes étranges qui leur inspira une terreur sacrée paralysant leur défense.

Il restait encore des traces de ce long règne du cheval dans le domaine de la force 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 où les catalogues indiquent la puissance des voitures en chevaux, héritier fiscal sous forme de cheval-vapeur, bien qu'elles n'utilisent ni cheval ni vapeur. La reconnaissance 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.

En parallèle avec ce rôle central du cheval, certains hommes ingénieux eurent aussi 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, bien entendu en toute ignorance de la liaison gravitationnelle qui est à leur origine commune. La roue étant déjà inventée, ils lui accrochèrent des godets ou des pales. La force de ces moulins était 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 grave, la production de farine ou d'huile pouvant se stocker, contrairement à l'électricité actuellement délivrée par ces moulins devenus éoliennes, dont l'intermittence est le défaut majeur, et dont aucun Alfonse Daudet n'a encore décrit le charme.

Là où il y avait des rivières, le moulin à eau était plus efficace, et entre le 11^{ème} et le 13^{ème} 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, aidé par la salaison, leur conservation d'une saison à l'autre.

L'ECOLOGIE SANS LE SAVOIR : 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.

Dans cette vie de village, chaque famille élevait des lapins, des poules pour les œufs, une oie pour Noël, un cochon à tuer et saler pour l'hiver, une ou quelques vaches pour le lait et les fromages, un jardin pour les légumes, fraises et framboises, engrais à l'engrais des animaux domestiques et des W.C au fond du jardin, un ou quelques pommiers, poiriers, cerisiers, pruniers, châtaignier, l'eau puisée au seau dans le puits, la lessive dans une lessiveuse et au lavoir municipal. Le chauffage par la cheminée et les poêles, où le feu brûle le bois coupé l'hiver précédent par le chef de famille dans la forêt voisine où des parts sont attribuées aux habitants du village. Le soir, on allume la bougie sur la table et la lampe à pétrole au plafond. On utilisait la force du cheval ou du bœuf pour les gros travaux de labour et de transport, et en même temps le feu pour se chauffer, s'éclairer, cuire les aliments, fondre les métaux, mais on ignorait que la chaleur et le travail étaient deux formes d'une même entité : l'énergie.

Une discontinuité survint au 19^{ème} siècle. Après ces millénaires d'une civilisation agricole relativement écologique et stable, limitée dans son développement par la modeste disponibilité des énergies mécaniques renouvelables des chevaux et les moulins, apparut la transition majeure : la métamorphose de la chaleur en travail.

TROISIEME TRANSITION : COMMENT FAIRE TRAVAILLER LA CHALEUR ?

Il est assez facile de créer une source de chaleur, il suffit de brûler quelque chose ; c'est beaucoup moins facile de créer une source de travail. Denis Papin effleura le sujet vers 1670 en observant que la vapeur émise par l'eau qui bouillait dans sa casserole en soulevait le couvercle. Tiens, se dit-il, y aurait-il une relation entre la chaleur et la mécanique ? Il n'alla pas 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 Sadi 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 des températures différentes, l'une chaude et l'autre 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 $T_c=973$), 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, 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 assez 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 PREMIERES 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, 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, attelées à un alternateur transformant cette énergie mécanique en énergie électrique encore plus précieuse. Dans cet objectif réussi de disposer d'énergie mécanique, puis bientôt 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 CH_4), émettant tous en brûlant du dioxyde de carbone CO_2 dont l'accumulation dans l'atmosphère se révèle, hélas, être l'agent principal du réchauffement climatique.

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 de multiplier l'accès à l'énergie, en ajoutant aux seules énergies renouvelables utilisées jusqu'alors, des énergies beaucoup plus abondantes issues de la chaleur de combustion, 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 réduisant la mortalité infantile, sa durée 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 frôle 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, 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 et la population mondiale a doublé.

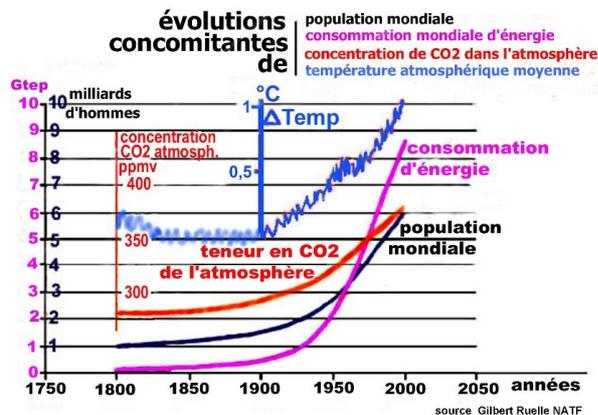


Figure 1 (extraite des travaux de l'Académie des technologies CECC 2008).

l'oscillation 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, similitude qui s'accroît dans la seconde.

Cette remarquable transition a permis le développement économique des 19^e et 20^e siècles par un saut dans l'ordre de grandeur de l'énergie mécanique disponible.

Il faut bien comprendre que ce saut d'ordre de grandeur n'est pas le fruit de la métamorphose de la chaleur en travail, dont on a vu qu'elle s'effectue avec un rendement très inférieur à 1 ; il est dû au choix du procédé de chauffage de l'eau de la chaudière, qui était d'ailleurs le plus simple: la combustion d'un produit carboné, abondant et bon marché sous forme de bois et charbon.

La combustion est une réaction chimique, impliquant donc des échanges d'électrons entre un corps et un autre (ici l'oxygène de l'air et le corps carboné). Les liaisons modifiées par ces échanges sont des forces électriques, dont on a vu au chapitre 1 qu'elles sont d'un ordre de grandeur démesuré par rapport à la force gravitationnelle qui gouvernait l'énergie renouvelable des moulins.

La ruée vers tous les combustibles disponibles sur Terre permet ce développement, mais en ce début de 21^{ème} siècle la prise de 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 est la conséquence de l'utilisation du phénomène physique de combustion pour générer la chaleur, principale mère des autres formes d'énergie (mécanique, électrique).

Rêvons un instant, s'il y avait eu sur Terre autant d'hydrogène libre que de carbone, le produit de combustion eut été H₂O au lieu de CO₂. Malheureusement, il est dans les soleils, pas sur notre planète où il n'est pas libre, tellement réactif qu'il est déjà associé à d'autres corps d'où il est bien trop coûteux, en euros et en rendement, pour qu'il soit judicieux de l'en extraire.

QUATRIEME TRANSITION : 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. 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 Oersted 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 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, comprendre la notion de champ et la perturbation qu'y apporte le fer par sa perméabilité magnétique en le transformant en champ d'induction, imaginer qu'avec du courant électrique autour d'un noyau de fer maximisant le rapport induction/champ, on pouvait créer des électro-aimants beaucoup plus puissants que les aimants naturels.

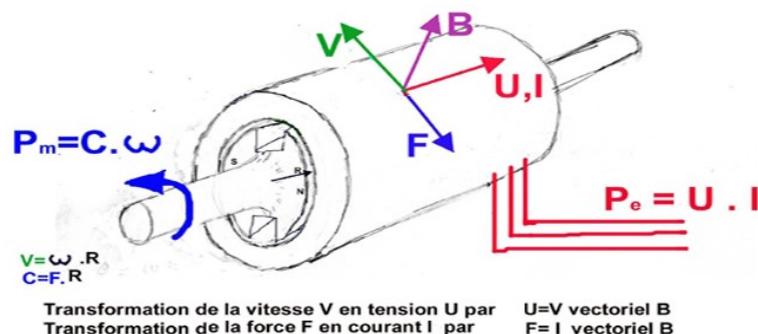
Il a fallu comprendre avec Maxwell la nature intime des ondes électromagnétiques, leur propagation, leur parenté avec la lumière et leur potentiel incroyable de support d'information et communication.

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 grande 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 obéissant aux deux relations vectorielles:

Vitesse périphérique $V (\Omega.R)$ en tension U : $\vec{U} = \vec{V} \wedge \vec{B}$ et Force tangentielle ($F = C/R$) en courant I : $\vec{F} = \vec{I} \wedge \vec{B}$

Figure 2 : 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 l'intuition du champ d'applications beaucoup plus vaste que pourrait couvrir le courant alternatif qui permet le transport de l'énergie électrique U.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 "westinghoused" pour signifier "exécuté par électrocution" en discréditant en même temps sa compagnie concurrente Westinghouse où œuvrait maintenant son adversaire Nicolas Tesla, il surnomma le courant alternatif "the death current" le courant de la mort, et 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'effolement 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 continu⁴ 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.

RECAPITULONS LES APPORTS ESSENTIELS DE CES DEUX TRANSITIONS ENERGETIQUES MAJEURES

1. L'obtention d'énergie mécanique à partir de la chaleur fut une découverte énorme parce qu'elle donna accès à de nouvelles et abondantes ressources de cette précieuse énergie mécanique que l'homme ne trouvait jusqu'alors qu'en quantités modestes dans la force des chevaux et dans la force gravitationnelle par les moulins à eau et à vent.

Cette gigantesque extension de la ressource en énergie-travail a été rendue possible en accédant, par l'intermédiaire du vecteur chaleur, à l'énergie de la combustion qui fait appel à la très puissante liaison électrique générant cette chaleur, dont Carnot nous a appris à extraire une partie en travail. La médiocrité du rendement de ce passage de la chaleur au travail (0,3 à 0,6) affaiblit un peu cet énorme avantage sans changer l'ordre de grandeur de cette gigantesque extension de ressources. Quelques centaines de milliers d'années après la domestication du feu pour chauffer, éclairer, cuire les aliments, c'est l'extension de cette domestication en faisant maintenant travailler le feu.

2. L'électricité n'est pas une source d'énergie, mais un vecteur ; C'est une mise en forme astucieuse d'énergie. Contrairement à la transition précédente, elle n'augmente pas la ressource en énergie puisqu'elle utilise la même force/interaction fondamentale que la combustion, mais lui confère une flexibilité sans égale en la mettant sous la forme électrique transportable et fractionnable, ce qui a augmenté considérablement sa consommation et pousser la transition précédente (chaleur>énergie mécanique) vers les grandes puissances et la formation de ce groupe inséparable turbine-alternateur qui génère l'électricité dans nos centrales électriques.

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 est basée sur la combustion, et a donc provoqué une ruée sur tous les combustibles disponibles sur Terre, bois, charbon, pétrole, gaz. Cette ruée sur tout ce qui brûle a apporté deux risques : un risque d'épuisement des ressources, réel mais vite surpassé par le risque climatique qui va s'imposer avant.

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 son effet de serre créant un réchauffement cumulatif du climat promettant des conséquences catastrophiques.

⁴ Le courant continu réapparaîtra un petit siècle plus tard pour quelques transports à très longue distance sous très haute tension (~1 MV), ou souterrains.

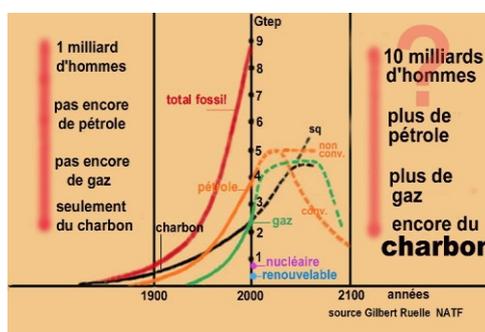


Figure 3

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 une priorité mondiale à la limitation à +2°C le réchauffement climatique en 2100 par rapport à 1990, en faisant un point annuel sur l'avancement des actions dans une COP (Conférence Of the Parties). Mais le succès de la conversion de la chaleur en travail depuis le 19^{ème} siècle a été tel que 80% de l'énergie mondiale provient encore aujourd'hui de la combustion, alimentant le réchauffement climatique.

En France, la majeure partie des émissions de CO₂ provient des transports et du chauffage des bâtiments (pétrole et gaz). Une politique de protection du climat doit donc prioritairement 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.

Cette peur existentielle d'un réchauffement climatique incontrôlé, à laquelle s'ajoute une crainte confuse des diverses pollutions accompagnant la production et la consommation d'énergie, a contribué à l'arrivée sur scène d'un mouvement scientifique aussi bien que politique : l'ÉCOLOGIE.

CINQUIEME TRANSITION ENERGETIQUE : DOMESTICATION DE L'ENERGIE NUCLEAIRE

Au 20^{ème} siècle, la liaison nucléaire fut identifiée et exploitée dans le domaine médical et dans celui de l'énergie. Puisant son énergie dans la plus forte des liaisons, encore 100 fois plus forte que la liaison électrique géant les réactions chimiques de combustion, elle permet de produire massivement de l'énergie électrique avec le minimum "d'entrants" la fission d'un gramme d'uranium produisant autant d'énergie électrique que la combustion de deux tonnes de charbon.

Cette si forte concentration d'énergie s'exprime par le phénomène de radioactivité, résultant de l'opposition, dans certaines circonstances, des deux plus fortes liaisons de la nature, la liaison nucléaire et la liaison électrique

- La liaison nucléaire, qui est la force d'attraction extrêmement puissante (10^{40} fois plus que la gravité) entre les nucléons (protons et neutrons composant le noyau de l'atome), 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 une sorte de colle qui les associe entre eux et assure la stabilité de la matière.
- La liaison électrique, qui est la force de répulsion des protons (++) qui se repoussent entre eux, mais restent normalement collés par la force nucléaire qui est plus forte, ce qui maintient la stabilité de la matière habituelle, non radioactive. Cette force répulsive augmente avec le nombre de protons alors que la force attractive créée par l'interaction forte dépend peu du nombre de nucléons. Lorsque la proportion de protons augmente la stabilité des noyaux diminue, au point qu'ils peuvent devenir instables.

La radioactivité désigne les divers processus par lesquels un noyau instable émet des particules (radioactivité alpha, beta, gamma) ou fissionne pour atteindre des états plus stables. Pour réduire 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 injecte de l'énergie dans le noyau, généralement sous forme de capture d'un neutron, c'est la fission induite.

Par leur répulsion électrique (++), les fragments de fission acquièrent une forte énergie cinétique qui se transmet sous forme de **chaleur sans émission de CO2** au milieu proche, chauffant l'eau de la chaudière nucléaire, ce qui est la meilleure arme pour freiner le réchauffement climatique. Au cours de la fission quelques neutrons sont aussi émis, qui peuvent être, à leur tour, absorbés par des noyaux d'Uranium et provoquer leur fission. **C'est la réaction en chaîne. L'art de la domestication du nucléaire 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. A titre d'exemple, lorsque EDF remplace annuellement 1/3 de l'uranium d'un de ses réacteurs nucléaires de 1000 Mégawatts, ce tiers usagé qui a travaillé 3 ans en fournissant 7 TWh d'électricité (7 milliards de kilowatts-heures) a perdu 3 kg de sa masse.

Les attraits essentiels de l'énergie nucléaire en découlent :

1. Extrayant son énergie de la plus forte des liaisons physiques, 100 fois plus forte que la liaison électrique gérant les réactions chimiques de combustion, elle **produit massivement de l'énergie électrique avec le minimum "d'entrants"** (on ne peut plus dire combustible), ce qui explique la puissance mystérieuse de cette source.

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'euros d'uranium pour sa production électrique contre environ cinquante milliards pour le pétrole des transports. Cet avantage d'indépendance 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 directe sur place de l'énergie de fission dans les barreaux du combustible nucléaire sous forme de chaleur 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.

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

6. **Potentiel de l'énergie nucléaire** : Nous n'avons évoqué que l'énergie de fission des atomes lourds, en service dans plus de 90% des réacteurs actuels avec l'uranium 235, qui ne représente que 0,7% de l'uranium naturel. Si une action très puissante contre le réchauffement climatique est menée à partir d'un large usage de l'énergie nucléaire afin de décarboner les secteurs transport et habitat par un large usage d'une électricité décarbonée, il sera nécessaire d'utiliser des atomes de départ plus disponibles en abondance, l'uranium 238 (99,3% de l'uranium naturel) ou le thorium très abondant, qui sont fertiles et pourraient être rendus fissiles dans des réacteurs à neutrons rapides (**RNR**), étudiés depuis une vingtaine d'années au sein du Forum International génération 4. Il existe aussi dans les centres de recherche internationaux une diversité de projets d'autres familles de réacteurs en étude, depuis les petits réacteurs modulaires (SMR) inspirés des réacteurs de sous-marins, jusqu'aux projets plus lointains de fusion d'atomes légers dans des réacteurs Tokamaks dont un prototype a été testé à Cadarache.

7. **Que d'avantages ! On doit même en ajouter un** : le nucléaire bénéficie maintenant d'un demi-siècle d'expérience, donc de statistiques d'exploitation sur des réacteurs nucléaires de diverses familles technologiques, établies par les organismes internationaux (ONU, OCDE, UNION EUROPEENNE...), qui démontrent que, contrairement à une opinion assez générale, 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 en Annexe 3. Donc, sauf à renoncer à l'usage de la logique, ce n'est donc 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.**

REFLEXION SUR LA PUISSANCE ET L'ORIGINALITE DES TROIS DERNIERES TRANSITIONS

Les trois dernières transitions ont été rapides et puissantes, et ont bouleversé les modes de vie des hommes en un seul siècle pour chacune d'elles. Elles permettent 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 sait pas faire, à partir de la connaissance récemment acquise des autres interactions/forces fondamentales (interactions électrique et nucléaire).

CES 3 PUISSANTES TRANSITIONS SONT DE VRAIES CREATIONS 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 le développement industriel et humain des 19^{ème} et 20^{ème} siècles.

- **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. C'est une accumulation d'observations qui fit émerger de vastes domaines amplifiant la révolution industrielle. Le courant alternatif de **Tesla** dans le domaine de l'énergie, **Maxwell** dans celui des télécommunications. Sans apporter de ressource énergétique nouvelle, l'électricité offrit une souplesse d'usage et de transport de l'énergie irremplaçable qui en a multiplié les applications.

- **La radioactivité**, autre phénomène naturel, émanant 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, a 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 précieuse 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.**

Ces trois transitions majeures marquent le passage de l'Holocène à l'Anthropocène, en permettant une telle commodité d'usage de l'énergie que nous avons atteint un stade où l'homme dispose d'assez d'énergie et de connaissances pour modifier son environnement proche et lointain.

Cette nouvelle situation oblige l'humanité à la plus grande rationalité des choix stratégiques dans toutes décisions impliquant des biens communs, des questions communes, ou des risques communs, comme le climat, la surpopulation et la paix.

RESUME DE LA PARTIE 2

LES CINQ GRANDES TRANSITIONS HISTORIQUES EN ÉNERGIE / ÉCOLOGIE :

T1. La première transition fut la domestication du feu vers -450.000 qui fut surtout écologique en apportant chaleur et lumière, mais pas d'énergie sous forme de travail, car l'homme était encore très loin de comprendre que chaleur et travail étaient cousins dans le concept global de l'énergie.

T2. À partir du néolithique (vers -8500), le développement de l'agriculture apportant des surplus d'alimentation marqua la fin de l'ère des chasseurs cueilleurs et la naissance de nouvelles structures sociales sédentaires où apparaissent les villes et les États. Ce développement de l'agriculture demanda de plus en plus d'énergie et l'homme dû faire appel à d'autres forces que les siennes propres, emprunta ces forces là où il les voyait à l'œuvre autour de lui, chez les grands animaux et dans les flux de la nature (vent et cours d'eau); **il domestiqua certains de ces animaux**, (dont le cheval vers -3500) et plus tard construisit des moulins qui constellèrent nos campagnes au moyen âge. Le niveau de force du cheval et sa docilité le satisfirent si bien qu'une société du cheval s'installa pendant cinq millénaires, où **le niveau de force, de travail, d'énergie, de puissance du cheval sculptèrent durablement une société relativement écologique.**

T3. Puis, vers 1820, **Carnot comprit que chaleur et travail étaient parents et comment on pouvait faire travailler la chaleur. Ce fut un saut gigantesque dans l'ordre de grandeur du travail mécanique au service de l'homme car il y avait tant de choses à brûler sur Terre, bois, charbon, pétrole, gaz naturel**, que malgré la médiocrité du rendement énergétique chaleur>travail (généralement inférieur à 0,5), cette découverte lança la révolution industrielle. **Mais cette nouvelle énergie issue essentiellement de la combustion de produits carbonés majoritairement fossiles épuise ce stock non renouvelable, et surtout émet du CO2** dans l'atmosphère, dont l'accumulation crée un effet de serre amorçant un réchauffement climatique chargé de menaces à partir du 21^{ème} siècle. **Cette énorme transition fut donc fortement énergétique, mais pas écologique à long terme.**

T4. En fin du 19^{ème} siècle, **la domestication de l'électricité** compléta brillamment la transition précédente en mettant l'énergie sous forme électrique U.I facilement transportable à distance et fractionnable à volonté pour tous usages et tous territoires. **Cette mise sous forme électrique de l'énergie n'a pas accru sa ressource globale possible comme l'avait fait la transition 3**, mais a largement accru sa consommation, par l'inégalable flexibilité de ses usages, accélérant ainsi le réchauffement climatique, et ceci d'autant plus que la majorité des sources primaires d'énergie électrique provenait de la transition 3.

Ce réchauffement climatique accéléré appelle, au début du 21^{ème} siècle, une nouvelle transition, écologique celle-ci, dont l'objectif essentiel est le ralentissement le plus rapide possible du réchauffement climatique et sa limitation à un niveau tolérable.

T5. Au milieu du 20^{ème} siècle, **la domestication de l'énergie nucléaire** apporte une nouvelle filière de production d'énergie munie de beaucoup d'avantages, dont celui de permettre une **production massive d'électricité sans émettre de CO2, solution la plus efficace dans la lutte contre le réchauffement climatique**, en remplaçant la chaleur de combustion émettrice de CO2 des centrales à combustible fossile par la chaleur de fission contrôlée de matière radioactive des centrales nucléaires. Deux accidents en URSS et au Japon dans des circonstances tout à fait exceptionnelles ont freiné temporairement le développement de cette filière, et favorisé celui de mini-centrales dispersées utilisant les **énergies renouvelables du vent et du soleil**, plus rassurantes et également non émettrices de CO2 mais dont le développement est gêné par leur intermittence incontrôlable. Malgré la prise en compte de ces deux accidents, et contrairement à une croyance populaire encore assez tenace, la filière nucléaire s'est révélée être celle ayant eu le moindre impact sur la santé publique au cours d'un demi siècle d'exploitation mondiale. **C'est une transition essentiellement écologique.**

PARTIE 3

CHOIX DES POLITIQUES ENERGETIQUES

La dotation naturelle de chaque pays en sources d'énergie est inégale ; en charbon, pétrole, gaz naturel, fleuves, vent, soleil... Les chanceux ont tout (Etats-unis, Russie), l'Allemagne a beaucoup de charbon, la France n'a plus ni charbon ni gaz, seulement quelques fleuves et des montagnes pour les faire chuter, certains ont du soleil et du pétrole, quelques-uns n'ont que le soleil.

Chaque pays a commencé à construire son parc de production électrique à partir des ressources de son territoire, le profil de ces parcs reflète donc encore celui des ressources naturelles de chacun, et beaucoup affichent encore une majorité de sources fossiles (~80% au niveau mondial). L'évolution nécessaire des systèmes énergétiques dans l'objectif mondial d'une forte et rapide réduction des émissions de gaz à effet de serre doit guider la transformation de ces parcs. L'ordre de mérite des filières les plus efficaces pour tenir cet objectif est à peu près le suivant :

-
1. D'abord l'hydroélectrique, car c'est la plus performante des énergies renouvelables, la mieux pilotable, à exploiter au maximum des ressources de chaque pays.
 2. Le nucléaire, car c'est la filière la plus efficace pour réduire le risque climatique et le risque santé publique, à exploiter à partir d'un certain niveau de consommation et de formation du public.
 3. Le gaz naturel, en étape provisoire, permettant d'accélérer la réduction des émissions de CO₂ par conversion des centrales à charbon, en attente d'une évolution ultérieure à moindre émission. *(Dans les pays où l'énergie électrique est encore très carbonée, le recours aux centrales à gaz a le mérite de demander des investissements relativement faibles et des temps de construction rapide (18 mois). Les TAC et les CCG offrent de surcroît la très grande souplesse de leur production. Elles peuvent donc se justifier pour remplacer, à court terme, charbon, lignite et fuel oil dont les émissions liées à la production électrique sont deux fois supérieures à celle des centrales à gaz). En revanche, du point de vue climatique, le gaz ne se justifie pas pour remplacer le nucléaire allemand 40 fois moins carboné*
 4. Les EnRI : L'éolien, s'il peut se présenter sur le marché local sans subvention, ou raisonnablement subventionné dans les îles, mais intermittent non pilotable, exigeant un appui sur pilotable. Le solaire photovoltaïque dont les progrès sont rapides, avec les mêmes remarques et mêmes problèmes d'intermittence.
La biomasse dans la mesure des disponibilités, en prolongement de centrales à charbon existantes
 5. Le charbon, dont l'usage intensif est condamné à court terme par ses émissions de CO₂ et ses polluants divers, assisté éventuellement de biomasse en fin d'exploitation.
-

Les modifications récentes et en cours des parcs vont-elles dans le bon sens ?

- 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 présidence Trump a donc poursuivi avec pragmatisme l'exploitation des énergies fossiles du territoire, sous le couvert d'un climato-scepticisme de circonstance, tout en allongeant à 60 et 80 ans la durée d'exploitation de ses centrales nucléaires et en finançant comme la Russie le développement de nouvelles filières nucléaires de génération 4, avec le renfort récent de Bill Gates, et celui des écolo-modernistes animés par Michaël Schellenberger, favorable au nucléaire.

- Pour les grands pays d'Asie (Chine, Inde), sensibilisés au changement climatique qui se superpose à la forte pollution de leurs mégapoles, le discours tenu en partie 2 leur convient et ils préparent l'avenir en conséquence, jugeant le nucléaire nécessaire et dont le risque est raisonnable. La Chine a un ambitieux programme nucléaire et a mis en service les 2 premiers réacteurs EPR avec la collaboration française.

- Au Japon provisoirement depuis Fukushima, et en Corée du sud, pays déjà nucléarisés et à forte densité de population, où le risque d'une éventuelle évacuation locale temporaire de population prend une acuité particulière, un attentisme prudent est de mise.

- Par contre, la Russie qui a pourtant connu le plus grave accident nucléaire de l'histoire à Tchernobyl poursuit activement son équipement nucléaire et ses recherches sur ses filières novatrices, dans un parallélisme pragmatique avec les fossiles, inondant l'Europe de gaz russe.

- En Allemagne depuis Fukushima, le gouvernement Merkel a décidé sous l'influence des Verts, de renoncer au nucléaire, de se replier sur ses réserves de lignite et de développer largement les énergies renouvelables intermittentes.

- La plupart des autres pays n'ont pas fait un choix aussi drastique et leur politique énergétique est plus pragmatique que dogmatique, poursuivant l'exploitation des sources fossiles dont ils sont dotés, avec une inflexion vers le gaz naturel moins émetteur que le charbon, mais prolongeant et développant simultanément le nucléaire et les énergies renouvelables intermittentes (USA, Russie, Chine, UK, Pologne Inde...).

- La France est un point d'interrogation ? Consciente des limites de ses ressources énergétiques en charbon et en hydrauliques, elle avait entrepris dans les années 70 une forte transition énergétique vers le nucléaire qui assure aujourd'hui 75% de sa production électrique, et place la France en tête des pays les moins émetteurs de CO2.

Mais depuis la présidence de François Hollande, une perméabilité à l'écologie politique a introduit une nouvelle attitude, plus que réservée à l'égard de l'énergie nucléaire, conduisant en 2015 à la promulgation d'une loi dite de transition écologique et solidaire programmant le remplacement d'un tiers du parc nucléaire par des sources d'énergies renouvelables intermittentes (éoliennes et photovoltaïque), orientation réaffirmée par la présidence actuelle d'Emmanuel Macron, juxtaposant des déclarations écologiques à des décisions antinucléaires sans préciser sa stratégie sur le long terme, tentant sur le court terme de sauver l'Union européenne par des accommodements intermédiaires entre les paysages énergétiques actuellement si différents de l'Allemagne et de la France.

Les milieux scientifiques français (académies nationales et associations scientifiques) aimeraient comprendre cette politique en contradiction avec les déclarations solennelles française de la COP de Paris sur la lutte contre le réchauffement climatique. Ils se refusent à penser que des orientations aussi stratégiques puissent être influencées par des calculs électoraux, ou une sorte de suivisme européen d'un pays affaibli par sa dette, ou une exagération des risques globaux de la filière nucléaire, en contradiction avec les statistiques mondiales d'exploitation d'un demi-siècle de 450 réacteurs. (annexe 3). Pourquoi cette persistance à négliger les avis de experts de ces domaines?

Une telle stratégie de remplacement du nucléaire français par des énergies renouvelables intermittentes n'est d'ailleurs pas durable car elle ne contribue pas suffisamment à la limitation du réchauffement climatique, et fragilise le réseau électrique, malgré un investissement considérable en éolien et photovoltaïque.

En Europe, la détermination de l'Allemagne à sortir du nucléaire, alors que cette filière reste quand même majoritaire en France nuit à la santé de l'Union européenne.

D'où ces questions :

POUR QUI LE DISCOURS RATIONNEL DE CETTE NOTE PEUT-IL NE PAS ETRE AUDIBLE ?

OU DOIT-ON CHERCHER, EN FRANCE, L'ORIGINE DE CE DESIR DE CHANGER DE FILIERES ENERGETIQUES ?

Une fraction de la population développe un besoin sécuritaire croissant, anxieuse pour l'avenir de ses enfants, craignant une détérioration de leurs conditions de vie, dont ils pensent percevoir les prémises à travers un taux de chômage restant élevé en France, des troubles sociaux et des migrations économiques incontrôlables liés à l'inégalité entre croissance de la population mondiale et de l'économie, une pollution de l'atmosphère des grandes métropoles et un réchauffement climatique confirmé, quelques accidents nucléaires (Fukushima) et chimiques (Rouen, Beyrouth) de grand retentissement médiatique, un envahissement des déchets qui polluent la terre et la mer, une baisse de la biodiversité, ainsi qu'à l'emprise de certaines religions. Certains attribuent toutes ces dégradations de l'environnement à une croissance trop rapide et mal gérée et certains, organisés en partis politiques, réfléchissent à des schémas de décroissance acceptables.

Une autre fraction du public ressent assez peu d'anxiété à l'égard du changement climatique, dont les conséquences dramatiques sont encore lointaines alors que les étés très chauds actuels sont plutôt sympathiques pendant les vacances. A plus court terme, ce public regrette de voir sa vie professionnelle l'éloigner de la nature; sa vie quotidienne le met plutôt face aux embouteillages des transports publics, des pollutions et risques d'accidents, dont la perception émotionnelle invite une population de plus en plus citadine à une nostalgie d'époques révolues, un peu oublieuse des avantages et confort de la vie actuelle.

La globalisation de ces perceptions diverses trouve son expression politique dans les mouvements écologistes qui se développent dans le monde entier et cherchent leur voie dans ce sujet complexe, essayant de résoudre les contradictions créées par une globalisation confondant maladie et remèdes, certaines de ces perceptions conduisant séparément à reconnaître que la production d'électricité nucléaire est le moyen le plus performant de lutter contre le réchauffement climatique, alors que d'autres récusent toujours cette source d'énergie parce qu'elle leur fait peur⁵.

⁵ Cette contradiction est en partie levée aux USA par le mouvement écologiste des écomodernistes animé par Michaël Schellenberger, ancien opposant au nucléaire, qui en est maintenant un écologiste défenseur.

On peut donc penser que ces idées de modification de notre parc énergétique sont dans la logique de la démocratie, par l'expression électorale de ces perceptions qui forment **une doxa populaire un peu confuse, mélange de sympathie un peu bucolique dans les nouvelles énergies renouvelables et de méfiance, voire de rejet de l'énergie nucléaire dont les risques sont jugés hors de commune mesure avec ceux des autres sources d'énergie, et imprévisibles dans leur diversité, conduisant certains à douter que l'on puisse les recenser tous, ce qui fait du nucléaire un sujet passionnel et tabou où l'émotionnel rend souvent le discours rationnel inaudible**

Entre les deux orientations opposées (certains disent complémentaires), du nucléaire ou des ENR, il y a consentement provisoire à utiliser les énergies fossiles faute d'avoir trouvé un moyen de capture et stockage du CO2 qui soit à l'échelle du problème, sujet sur lequel travaillent pourtant tous les pays charbonniers et gaziers depuis plus de 30 ans avec un succès trop limité par une pénalisation économique insuffisante du CO2.

LE DEBAT "ENERGIES RENOUVELABLES OU/ET NUCLEAIRE" ?

Les ENR partent favorites.

Premier ressenti du public : Les énergies renouvelables sont sympathiques,

Elles sont **naturelles** et **sans mystère** car leurs sources nous sont **familières dans la nature qui nous entoure**: soleil, vent, fleuves, biomasse. Elles sont **éternelles** puisque **leurs sources se renouvellent** naturellement, soleil, vent, eau des fleuves sont des sources d'énergie renouvelables tant que le soleil, à l'origine de toutes, brillera. Soleil et vent étant des ressources assez bien distribuées, elles offrent partout une certaine **assurance d'approvisionnement**. De faible densité énergétique, elles sont de taille plus modeste que les grandes énergies thermique ou nucléaire, plus **à échelle humaine**, et flattent l'idée populaire d'énergie **décentralisée**, chacun pouvant **produire l'énergie qu'il consomme** ou la trouver à proximité **sans nécessiter de grands réseaux** de transport. 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 ?**

Bel exemple de discours convaincant pour celui qui souhaite être convaincu. Le meilleur vendeur des énergies renouvelables a en effet été le vocabulaire, par l'usage généralisé de l'abréviation EnR, où le R de Renouvelable a été souvent compris comme illimité, inépuisable, induisant même l'idée fausse de gratuité, répétée à l'envi par Ségolène Royal, alors que la Cour des comptes a évalué à 120 milliards d'euros le coût sur la durée des engagements déjà acquis de subventions ayant permis leur introduction sur le marché français de l'électricité.

*L'idée que l'énergie du vent et celle du soleil sont gratuites est quelquefois ancrée dans l'opinion car il n'y apparemment pas de combustible à payer. Raisonement simpliste, car tout comme le vent et le soleil, le charbon, le pétrole et le gaz "naturel" sont aussi des dons gratuits de la nature. C'est l'accès à la ressource qui exige des investissements qui pèsent sur le prix du kWh final. Il en est de même de toutes les formes d'énergie, mais **l'accès aux énergies renouvelables coûte plus cher que celui à des sources plus concentrées parce que ce sont des énergies très diluées, et les lois de la physique imposent qu'extraire une énergie diluée est plus coûteux en investissements (volume de matériaux, complexité, emprise au sol)**. Renouvelable signifie seulement que les phénomènes naturels du vent, du rayonnement solaire, de la croissance des plantes, devraient se renouveler tant que le soleil sera là, donc environ 5 milliards d'années selon nos astronomes. 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, réduit du rendement des convertisseurs d'énergie utilisés pour leur exploitation.*

*Une abréviation déjà plus précise mais moins attractive aurait pu être EnF, où le **F de Flux** exprime qu'il d'agit de capter des flux naturels de matière (eau, air) ou de rayonnement (solaire), ce qui évitait déjà la confusion entre renouvelable et illimité car ces flux naturels de liquides, de gaz ou de rayonnement se renouvellent certes avec le vent et l'ensoleillement, mais l'énergie portée par chaque flux est sévèrement limitée par les lois de la physique, la puissance délivrée par une éolienne variant comme la densité du fluide qui la traverse et le cube de la vitesse du vent, pénalisant cruellement sa variabilité. L'abréviation la plus fidèle à la réalité physique serait ENFI pour Énergie Renouvelable de Flux Incontrôlable.*

*Dans EnF, le F de Flux aurait pu aussi être le **F de Faible**, car comme on l'a vu dans les parties 1 et 2 les éoliennes tirent leur énergie de la plus faible des interactions fondamentales de la nature, la gravitation. Toutes ces EnF puisent leur énergie dans des sources très diluées exigeant de consacrer de grandes surfaces au sol et de grandes dimensions de machines, transformant les paysages. S'acharner à vouloir turbiner de l'air mille fois moins dense que l'eau des turbines hydrauliques oblige pour des puissances et des vitesses de fluide du même ordre à des diamètres de turbines 30 fois plus grands que ceux des turbines hydrauliques, pour en extraire des énergie dont l'ordre de grandeur n'est que la dizaine de mégawatt, ce qui renchérit la collecte de cette énergie dispersée sur le territoire si on veut l'amener sur les grands réseaux de transport à très haute tension .*

Ces EnR éoliennes et solaire incontrôlables sont plus que fortement variables, elles sont même intermittentes, leur production pouvant être nulle, la nuit pour le solaire, en période météorologique de hautes pressions pour les

éoliennes, ce qui a conduit à ajouter tardivement⁶ le *i* de Intermittentes à ces EnRi, et leur enlève une grande partie de leur valeur, les rendant incapables d'alimenter seules un grand réseau électrique avec le même degré de sécurité. Ces énergies "naturelles" ont leurs intermittences imposées par la nature; le vent et le soleil ne sont pas pilotables, ce qui était de peu d'importance pour les moulins à vent écrasant un stock de grain ou d'olives devient lourd handicap pour des éoliennes devant réguler un flux de courant électrique alternatif 50 Hz au centième de seconde près, ce qui introduit une fragilité dans les réseaux où ces énergies prennent une part importante. La productibilité de ces ENRI en est affectée par cette forte variabilité: dimensionnée pour le vent le plus fort qu'elle puisse supporter, une **éolienne terrestre ne délivre sur l'année qu'environ 20% de l'énergie qu'elle produirait si ce vent était constant. Ce facteur de charge peut atteindre 30 à 40% en mer. Le solaire photovoltaïque présente des facteurs de charge encore plus bas sous nos latitudes, de l'ordre de 10%.**

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. L'intermittence de l'éolien est beaucoup plus préoccupante, car particulièrement élevée et mal prévisible. La raison en est que sa puissance variant comme le cube de la vitesse du vent amplifie très fortement cette variabilité.

L'appel à d'autres sources pilotables en stand-by, généralement thermiques pour remplacer l'éolien en cas de vent faible, augmente le coût et les émissions de CO₂. En cas de vent puissant, le réseau étant dimensionné pour la puissance éolienne moyenne, le suréquipement en puissance installée par rapport à cette puissance moyenne (de 3 à 5, inverse du coefficient de charge), génère une surproduction que le réseau a des difficultés à évacuer, pouvant conduire à des prix de gros négatifs sur les marchés spot. Les pays qui utilisent le plus largement des énergies renouvelables intermittentes sont les pays charbonniers (Allemagne, Espagne...) qui trouvent dans la souplesse de leur forte production thermique un moyen économique de compenser partiellement ces intermittences, tout en profitant de la réduction des émissions de CO₂ que leur procure ce choix, en leur permettant de continuer à utiliser longtemps leurs ressources fossiles. En ce qui concerne l'Allemagne s'y ajoute l'option politique de sortie du nucléaire. **En France, cet appui à l'éolien est assuré par le parc nucléaire dont EDF doit moduler la production afin de respecter l'obligation qui lui est faite d'accorder la priorité attribuée aux EnRi, sans gain ni perte sur les émissions de CO₂, mais en réduisant la rentabilité du parc nucléaire.**

Un réseau électrique doit être capable de fournir de l'électricité à tous ses clients, dont la demande n'est prévisible que statistiquement et approximativement par la compilation des consommations antérieurement observées dans les circonstances analogues de saison, date, d'horaire, et de météorologie. Pour retrouver l'intérêt des moulins à vent travaillant sur un stock de grain ou d'olives, il faudrait pouvoir faire travailler les éoliennes sur un stock d'électrons, mais l'électricité ne se stocke directement qu'en très petite quantité dans les condensateurs, d'où le développement de ces **multiples études de stockages indirects** (gravitaires, chimiques par batteries, électrolytique pour l'hydrogène...) dont le gravitaire hydraulique (STEP) est déjà saturé; pour les autres, l'empilement des rendements et des coûts intermédiaires n'a pas permis jusqu'à présent d'entrevoir le succès dans un futur acceptable.

- **Le plus connu, le plus puissant et le plus économique en rendement est le stockage gravitaire 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. **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 à ion-lithium** sont un moyen de stockage chimique de l'électricité qui a 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 du 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.

⁶ Pourtant déjà souligné au congrès de la Société Française de Physique de juillet 2011: Intermittence des énergies éoliennes et solaires, quelles solutions? par G. Ruelle

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 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 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. Une étude approfondie réalisée au niveau de l'ensemble des 34 pays européens interconnectés (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).

Est-il alors possible d'accepter des niveaux élevés d'intermittence? Le problème de l'intermittence accompagnant les nouvelles énergies renouvelables avait 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. Investir dans un **super réseau européen?, voire euro-africain?** Dans l'espoir d'une mutualisation immédiate des défaillances et des surcapacités, mais les coûts paraissent gigantesques et un foisonnement suffisant des vents et ensoleillements est incertain car contredit par les statistiques météorologiques.

Le coût et les difficultés sociétales rencontrées pour implanter de nouvelles lignes haute tension n'augurent pas favorablement d'un projet de super-réseau plusieurs fois plus puissant que celui qui existe. L'investissement évoqué serait de 500 milliards €. S'il faut enterrer certaines lignes, l'investissement fait un bond.

D'autres idées que le stockage indirect d'électricité coexistent : **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'ensemble des propriétés de ces EnRi si séduisantes à première vue n'a pas permis leur introduction spontanée dans les pays déjà munis d'un parc de production électrique peu émetteur de CO2 et compétitif.

Dans la volonté politique de les développer, les EnRi sont donc subventionnées dans l'espoir que leur développement industriel puisse entraîner une baisse de leurs coûts qui leur permette de se rapprocher de la compétitivité. Le problème de pertinence et de durée de ces aides se pose : on pourrait souhaiter que les filières déjà matures, se déclarant elles mêmes compétitives dans leur publicité, et bénéficiant d'un très large marché déjà aidé par l'obligation d'achat prioritaire à un prix anormalement élevé par EDF, comme l'éolien, n'aient plus besoin de ces aides.

Avec un objectif de neutralité carbone, les EnRI n'ont d'avenir que si leur développement est accompagné de lourds investissements :

- en économies d'énergie,
- en adaptation des réseaux à leurs puissances de pointe,
- en construction de moyens de production supplétifs (de stockage et déstockage massif d'énergie convertible en électricité, tels les STEP, l'H2 obtenu par électrolyse de l'eau et brûlé dans des piles à combustibles etc...),
- en constitution de smart grids, autour des compteurs numériques, tel Linky en France,
- en augmentation des mesures d'effacement de consommation.

C'est le prix à payer pour s'offrir le luxe de rester fidèle à une option antinucléaire prise sans s'être donné le temps d'une analyse scientifique suffisante.

Au secours Jules Verne⁷

- **Un autre moyen de stockage, l'hydrogène**, soulève 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 un espoir bien lointain par rapport à l'emprise rapide du réchauffement climatique. 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 CAES⁸. 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 chiffrées avec réalisme. Jules Verne n'était ni chimiste, ni énergéticien. Un chimiste peut encore s'enthousiasmer de la variété des combinaisons chimiques auxquelles peut se prêter l'hydrogène, et espérer trouver le graal des combinaisons capables de stocker et restituer au mieux l'énergie initialement prélevée. Un énergéticien rappellera que l'hydrogène ne sera jamais une source d'énergie comme l'espérait Jules Verne, mais seulement un vecteur d'énergie. Il notera donc avec réalisme l'énergie perdue à chaque étape du parcours de ce vecteur avant d'atteindre ce graal, ce qui lui reste d'énergie restituée et à quel prix.

& : Dans le titre de cette note : HISTOIRES D'ENERGIE & D'ECOLOGIE, pourquoi "&" et non pas "et" ?

Le "et" commercial "&" a été préféré pour **souligner le caractère commercial et affairiste qui imprègne maintenant l'écologie** depuis qu'elle est devenue un parti politique antinucléaire obsédé par sa volonté de remplacer le parc nucléaire français par un gigantesque parc éolo-solaire. Découlant de cette option politique, des décisions et réglementations **imposent les énergies renouvelables à travers toutes les formes plus ou moins déguisées de subventions aux ENRI**, que ce soit par obligation d'achat prioritaire hors marché par EDF à un tarif très avantageux pour le constructeur et l'installateur, des prises en charge externes du raccordement au réseau de transport HT, des aides régionales, ou autres faveurs.

De son côté, **l'Union Européenne met en place des mécanismes de plus en plus sophistiqués pour faire oublier l'intermittence des EnRi** en permettant aux compagnies de vendre aux clients qui le souhaitent de l'électricité "verte" (donc prétendue issue à 100% des EnRi, et à l'exclusion du nucléaire!?!), par la magie des certificats d'origine (négociables pendant un an). Le client d'un tel contrat "vert" peut consommer quand il veut, même en l'absence de vent et de soleil. L'électricité consommée est bien sûr celle du mix énergétique local du moment, donc principalement fossile ou nucléaire ou hydraulique selon les pays, mais étiquetée "renouvelable" car des capacités renouvelables auront produit au moins autant d'électricité, quelque part en Europe, au moment où elles le peuvent dans la même année courante.

Ce mécanisme des contrats verts négociables est en avance sur la fameuse trieuse d'électrons qui ne sera sur le marché qu'au premier avril; il permet par exemple au vendeur d'un contrat vert de garantir à son client français ou allemand qu'il ne court pas le risque de manque d'électricité pendant l'hiver prochain par une nuit sans vent quand les éoliennes et les panneaux photovoltaïques ne produisent pas, car sa compagnie a acheté à une compagnie grecque un certificat d'origine attestant qu'une quantité équivalente d'électricité renouvelable a été produite par des panneaux photovoltaïques en Grèce une journée du mois d'août précédent ;Ce mécanisme trompeur donne la fausse impression que l'intermittence éolienne et solaire n'est pas un problème.

L'effet positif de ce mécanisme sur le climat n'est pas évident à comprendre car cette acrobatie commerciale semble déguiser une subvention indirecte à l'hydrogène et à l'éolien. La Commission européenne a présenté en juillet 2020 [sa feuille de route stratégique pour le déploiement de l'hydrogène, dont elle attend](#) un rôle important dans la lutte contre le changement climatique en remplaçant les combustibles fossiles dans des applications difficilement électrifiables dans l'industrie ou la mobilité lourde. L'hydrogène peut également justifier une large extension des parcs éoliens et solaires qui deviendraient producteurs de cet hydrogène, car pour ces applications "climatiques" espérées de l'hydrogène, on ne peut utiliser l'hydrogène commercial actuellement obtenu principalement par reformage de molécules carbonées (vapo-reformage de méthane), opération bon marché mais qui émet beaucoup de CO₂. La promotion de l'hydrogène pour toutes applications climatiques devra donc n'utiliser que de l'hydrogène électrolytique intrinsèquement plus coûteux, issu de l'électrolyse de l'eau par une électricité bas-carbone la moins coûteuse possible. La Commission européenne est encore plus restrictive puisqu'elle ne parle que d'électricité renouvelable, ce qui exclut le nucléaire.

Voilà un gisement d'applications de ces contrats verts! Explication : La production d'énergie éolienne est la plus violemment et rapidement fluctuante; son facteur de charge annuel moyen de l'ordre de 0,25 à 0,4 fois la puissance

⁷ «je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable et d'une intensité que la houillenne saurait avoir».
Jules Verne "L'île Mystérieuse 1874"

⁸ CAES (Compressed Air Energy Storage) : Stockage d'énergie par air comprimé dans des cavités souterraines.

LES FAITS : Les activités nucléaires civiles, depuis le milieu du 20^{ème} siècle, ont causé une dizaine d'accidents mortels dans des laboratoires de recherche, et **trois accidents majeurs** de centrales électriques (avec fusion plus ou moins importante du cœur du réacteur):

- **Three Mile Island** aux USA en 1979, réacteur du type PWR, donc avec enceinte de confinement qui n'a pas laissé échapper de produits radioactifs significatifs et, n'a fait aucune victime,
- **Tchernobyl** en 1986, (réacteur russe RBMK) dont le bilan humain est rappelé en annexe 2, bas de page 40, fut la conjonction de trois causes: Des défauts de sûreté dans la conception du réacteur (absence d'enceinte de confinement, système d'arrêt d'urgence trop lent pour un réacteur à coefficient de température positif), et de l'incroyable légèreté d'avoir procédé pendant un arrêt de week-end à un essai hors réseau explorant la zone d'instabilité du réacteur, après avoir neutralisé la protection l'interdisant.
- **Fukushima Daiichi** (réacteur BWR), détruite en mars 2011 par un tsunami qui a tué environ 20.000 personnes, dont aucune par la radioactivité. L'accident de Fukushima a réactivé cette exigence de sûreté en faisant découvrir au public que dans toutes les circonstances imaginables de catastrophe externe à la centrale (tremblement de terre, tsunami, inondation, attentat...), il n'est pas simple de contrôler un réacteur nucléaire si on ne dispose pas de moyens de refroidissement puissants et redondants, y compris après arrêt du fonctionnement du réacteur, et qu'il faut prévoir des redondances multiples des alimentations électriques externes et des systèmes de refroidissement.

Le renouvellement d'accidents majeurs comme ceux de Tchernobyl et Fukushima, ayant un impact important sur la population par mortalité rapide ou différée, par le traumatisme d'une évacuation temporaire ou définitive, par la pollution radioactive des sols et des habitations, constitue le risque le plus craint par la population.

C'est donc ce risque d'accident majeur qui doit être **analysé avec le plus grand soin afin d'évaluer sa probabilité de survenue et de gravité, pour les peser en face des avantages considérables de cette source d'énergie.**

L'annexe 2 retrace la chronique des deux plus graves accidents historiques de Tchernobyl et Fukushima, pour permettre au lecteur d'objectiver son jugement sur la probabilité de survenue d'accidents de ce type dans d'autres pays, et situer objectivement leur gravité parmi d'autres accidents industriels.

LIRE LES CHRONIQUES DE CHACUN DE CES DEUX ACCIDENTS SUR ANNEXE 2, EN PAGE 40

Le lecteur est alors en mesure :

- 1. De constater l'extrême improbabilité, en France, de la cascade de causes de chaque accident,**
- 2. De constater que malgré des circonstances impensables en France, leurs conséquences furent limitées.**
- 3. De comparer ces conséquences à celles des accidents industriels cités au paragraphe suivant**
- 4. De se demander si ces trois constats laissent une place au refus du nucléaire malgré ses avantages ?**

UN REGARD SUR LES RISQUES DE QUELQUES AUTRES ACTIVITÉS LIÉES À L'ÉNERGIE,

La Commission européenne, dans son analyse "Extern'E" tient à jour une évaluation des externalités - conséquences externes négatives des diverses sources d'énergie. On y lit que le charbon est de loin la source d'énergie porteuse du risque le plus élevé pour la santé publique, le pétrole venant en second, puis le gaz, et le nucléaire en dernier.

L'AIE (agence internationale de l'énergie) aboutit au même classement.

- **Le charbon:** Selon l'OCDE, de 1970 à 2000, 41 000 personnes sont décédées dans les mines de charbon dans le monde.
- Cependant, la mortalité la plus importante n'est pas celle due à ces accidents, mais celles due aux maladies liées à l'usage du charbon; à l'échelle mondiale, cette mortalité est de l'ordre de 500 000 décès prématurés chaque année⁹, principalement causés par la silicose. La mortalité due à la pollution atmosphérique par les industries utilisatrices de charbon, en particulier les centrales électriques, reste importante : Les estimations pour l'Europe des 27 ont été d'environ 30 000 morts par an.

Hors santé publique, l'extraction du charbon provoque de graves atteintes à l'environnement quand les exploitations se font à ciel ouvert. Les surfaces concernées sont considérables, notamment en Allemagne. Plus de 100.000 personnes ont été déplacées.

- Nous ne résumons ici que le charbon parmi les énergies fossiles, mais chacun a présent à l'esprit les **marées noires du pétrole et les explosions du gaz.**

⁹ "Les dangers du charbon" par Bernard Durand novembre 2011 www.sauvonsleclimat.org

Ces très nombreuses victimes des énergies fossiles ne les ont pas empêchées de se maintenir au plus haut niveau de notre consommation d'énergie dont elles assurent 80%.

- Les énergies renouvelables ne sont pas en reste,

En 1975, la **rupture du barrage de Bianqiao en Chine a tué 30 000 personnes**; 140 000 autres sont ensuite décédées d'épidémie consécutive, 11 millions de personnes ont perdu leur maison.

En 2009, la **rupture d'une turbine dans la plus grande centrale hydro-électrique russe de Saïano-Chuchenskaya sur l'Ienisseï a noyé la centrale et fait environ 70 morts et une forte pollution de l'Ienisseï.**

Ces deux accidents majeurs parmi beaucoup d'autres n'ont pas arrêté le développement des centrales hydro-électriques, et la construction récente du plus grand barrage du monde aux "Trois Gorges" en Chine vient de montrer le choix fait entre les risques connus dans le passé d'inondations dévastatrices et les dégâts socio-environnementaux d'un déplacement de population de 1,4 million de personnes.

- Dans l'industrie hors production d'énergie électrique, on peut établir un constat analogue:

En 1984, la catastrophe chimique de **Bhopal en Inde**, avec ses milliers de morts n'a pas condamné l'industrie chimique, pas plus qu'en 2020, la destruction d'une grande partie de la capitale du Liban, Beyrouth, par l'explosion d'un stock de nitrate d'ammonium ne condamnera l'usage des engrais chimiques dans l'agriculture.

Des avions tombent de temps en temps, cela n'a pas condamné l'industrie aéronautique qui ne s'est jamais développée aussi fortement (sauf intermède du COVID 19), mais chaque accident est soigneusement analysé pour accroître la fiabilité des nouveaux avions et diminuer le nombre d'accidents dus à des erreurs humaines.

Oublions les milliers de morts annuels de la circulation routière en France. Les particules fines respirées, les oxydes d'azote, l'ozone photochimique des combustions seraient responsables en Europe de 250.000 morts prématurées par an ; 1,6 million de morts prématurées par an dans le monde seraient dues à la cuisson des aliments à partir de biomasse dans les pays en développement.

On n'arrête pas les voitures ni les centrales électriques, ni la cuisine au gaz ! et on voit bien que le risque nucléaire s'inscrit dans la liste des risques du développement industriel sans y afficher l'ampleur exceptionnellement dramatique que les médias se complaisent à lui attribuer en effaçant dans la mémoire populaire le tsunami de Fukushima et ses 20.000 morts, qui n'est plus dans la mémoire du public que l'accident nucléaire de Fukushima.

Poursuivons l'analyse de cette crainte confuse qui entoure l'énergie nucléaire,

- o **Les conséquences immédiates de tels accidents : les évacuations de populations**, temporaires ou définitives sur un accident nucléaire pèsent très lourd dans l'appréhension de ces accidents. L'énergie nucléaire 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, celui de Tchernobyl ayant été particulièrement dramatique avec plus de 200.000 personnes évacuées, la plus grande part de la morbidité a été due à ce traumatisme social causé par les déplacements urgents, la plupart définitivement.

A Fukushima, une évacuation préventive a été correctement conduite, et a protégé la population du risque de contamination importante, mais ces évacuations restent douloureusement vécues et constituent le reproche principal aux yeux du public.

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 type à eau pressurisée (PWR) à enceinte de confinement, 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 populations¹⁰. 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 et humain d'une évacuation 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. conséquences immédiates d'un accident

1. **Une autre conséquence immédiate de tels accidents la contamination radioactive des sols, des eaux et des habitations condamnant des villages et des surfaces agricoles pendant des années.** qui 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.

¹⁰ Faut-il revoir les conditions d'évacuation à la suite d'un accident nucléaire ? Hervé Nifenecker, site Internet SLC 20 mai 2011.

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 césium¹¹ 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 radioactives¹².

A Fukushima, environ 22 millions de mètres cube de terre contaminés par la radioactivité ont été retirés de la surface des sols. Le CEA, Orano et Veolia ont expérimenté au Japon entre le 13 et le 17 novembre 2017 un procédé de décontamination de terres radioactives. Ces essais ont été réalisés au Japon sur plusieurs centaines de kilogrammes de terre de la région de Fukushima.

Les réacteurs du par Français ont réduit ce risque par 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).

2. **Les effets retardés possibles de la radioactivité sur la santé publique , évocateurs de conséquences décalées dans le temps telles que cancers, voire modifications génétiques sont anxiogènes.** 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". Ces conséquences lointaines possibles conditionnent le périmètre d'évacuation éventuelle de la population locale en cas d'accident impliquant une fuite de radioactivité; il est donc important de connaître les seuils de radioactivité à ne pas franchir. Ces limites ne sont pas connues avec la précision intangible de la physique, mais à travers les statistiques biologiques accumulées par l'expérience, se précisant d'année en année car elles font l'objet de débats d'experts sur la validité de la loi linéaire sans seuil¹³ et l'hormésis¹⁴. Il arrive que des doutes rôdent dans l'esprit du public 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.

L'annexe 4 résume les informations nécessaires sur la radioactivité, sa nature, ses risques et ses mesures (becquerel, gray, curie, sievert, degrés de risque associé aux degrés d'irradiation exprimés en Sievert)

3. Le **mystère** de cette remarquable densité énergétique qui permet d'éviter la combustion de deux tonnes de ce charbon assassin du climat en remplaçant cette combustion émettrice de CO₂ par la fission nucléaire (cassure des noyaux des atomes) de 1 gramme d'uranium. **C'est pour éclairer cette difficulté que nous avons pris le parti dans l'exposé qui précède, de situer les trois classes d'énergies issues de la matière dans le classement de la physique moderne. Cette présentation montre la similitude de structure de ces trois interactions, où cette interaction nucléaire se place au sommet, plus de 100 fois plus forte que l'interaction électrique qui gouverne les réactions chimiques¹⁵ de combustion.**

Comme exposé en partie 2, la liaison nucléaire est une des 3 liaisons physique de la nature,

- Aussi naturelle que l'attraction gravitationnelle que tout le monde connaît bien, qui s'exerce entre masses, masses d'atome à atome (et de groupement d'atomes à groupement d'atomes, et varie comme l'inverse du carré de leur distance) et produit ou consomme de l'énergie selon le sens de leur dérangement : si ces masses se rapprochent (comme la masse d'eau qui chute d'un barrage se rapproche de la Terre qui l'attire), la gravitation fournit de l'énergie; si on veut écarter ces masses l'une de l'autre (comme une grue qui soulève une charge l'écarte de la Terre), on doit consommer de l'énergie. .

- Aussi Naturelle que l'attraction ou répulsion entre corps chargés d'électricité opposée (+-) ou identique (++) ou (-), qui varie, comme la précédente, selon l'inverse du carré de la distance, mais ce n'est plus la masse qui porte la force de liaison, mais la polarité électrique + ou - ; cette force de liaison a donc 2 sens, attraction et répulsion, et une intensité énorme, environ 10³⁸ fois plus forte que la gravitation. C'est cette force électrique qui agit au niveau de l'atome par des

¹¹ 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.

¹² Césium : le Japon avance dans le traitement des sols et des eaux contaminées <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/69209.htm>

¹³ 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 les dégâts de l'explosion chimique du port de Beyrouth d'août 2020 et ceux de l'explosion nucléaire sur Hiroshima de 1945.

¹³ Loi simplificatrice admise 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.

¹⁴ L'hormésis est une sorte de vaccin, 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.

¹⁵ Une comparaison indécente des effets possibles des deux plus fortes interactions électrique (chimique et nucléaire) est de mettre côte à côte les dégâts de l'explosion chimique du port de Beyrouth d'août 2020 et ceux de l'explosion nucléaire sur Hiroshima de 1945.

attractions entre noyau et électrons périphériques, et à des répulsions entre les électrons (- -), et aussi répulsion entre les noyaux (+ +).

Ces attractions-répulsions sont les cartes à jouer d'un grand jeu qui s'appelle la chimie, où noyaux et électrons de deux ou plusieurs corps s'entremêlent pour en former d'autres, tout en fournissant ou demandant de l'énergie. Ainsi un corps contenant des atomes de carbone C (bois, charbon pétrole, gaz naturel) réagit avec les molécules d'oxygène O² de l'air en formant du dioxyde de carbone CO² qui est ici un déchet empoisonnant l'atmosphère et détériorant le climat, et produisant une précieuse énergie thermique qui est ici le produit recherché dans cette combustion, et qui, convertie en travail, est à l'origine de la révolution industrielle de ces deux derniers siècles, du confort technologique dont jouit une population plus nombreuse vivant plus longtemps.

Il y a quelques centaines de milliers d'années, l'homme primitif **domestiqua le feu** pour en tirer chaleur et lumière. Il ne soupçonna pas qu'il venait de manipuler de **l'énergie atomique sous sa forme chimique**, car il ignorait notre vocabulaire actuel (atome, chimie, électrique, énergie..) et son contenu. Il n'entrevit pas non plus le gigantesque saut de plusieurs ordres de grandeur qu'il venait de franchir dans l'énergie utilisable car il ne savait pas encore l'utiliser en la convertissant en travail qui est la seule forme permettant autant d'usages de l'énergie que l'homme a pu en imaginer pour améliorer constamment ses conditions de vie, ce qui ne surviendra qu'au 19^{ème} siècle avec les Carnot et Watt.

Se serait-il fait peur s'il avait pu entrevoir ce potentiel énergétique fantastique du feu, qui dépasse d'une trentaine d'ordres de grandeur les énergies d'origine gravitationnelle, seules énergies qu'il connaissait déjà un peu ?

Il aurait eu raison d'avoir peur s'il avait entrevu que dans les conflits des hommes, les arcs et flèches allaient être remplacés par des fusils, pistolets et balles, puis canons, obus et bombes lancées de machines volantes faisant au cours des siècles des millions de victimes par cette découverte du feu et tout ce qu'on en a fait ensuite, et aussi des accidents involontaires comme celui qui fit récemment exploser une partie de la ville de Beyrouth.

Il aurait eu aussi raison de maîtriser cette peur, s'il avait entrevu l'incroyable développement qu'a permis ce plus large accès à, et une utilisation raisonnée de, **l'énergie**, développement pas seulement matériel de confort et de commodités de vie, mais aussi développement humain dans les connaissances scientifiques, les arts et les organisations sociales d'où émerge peu à peu un système un peu moins mauvais que d'autres la démocratie.

- Aussi naturelle que les deux précédentes cette interaction entre les composants du noyau de l'atome, donc dite nucléaire, découverte au 20^{ème} siècle, encore plus forte que la précédente de deux ordres de grandeur, et qui apporte en plus l'avantage écologique remarquable de corriger son grave défaut qui est de détériorer notre climat.

Pourquoi nous priverions nous d'exploiter cette interaction et refuserions-nous cette énergie qui s'est révélée avoir eu l'impact le plus faible sur la santé publique dès son premier demi-siècle d'exploitation? Pourquoi refuserions-nous d'entrevoir l'avenir proche des réacteurs à neutrons rapides qui vont multiplier par cent la ressource énergétique en permettant d'utiliser l'isotope 238 qui est actuellement un déchet alors qu'il représente 99,3% de l'uranium naturel, et que le seul que l'on utilise actuellement est l'isotope 235 qui n'en représente que 0,7%.

Ayant éclairé ce mystère de la remarquable densité d'énergie propre (sans CO₂) que l'on sait extraire du noyau de certains atomes, que pèse ce prétexte de la peur devant une telle puissance munie de tels avantages, alors que l'analyse détaillée des deux célèbres accidents qui vient d'être présentée montre les conditions extravagantes qui ont du être réunies pour leur survenue sur ces deux centrales dont le degré de sécurité n'avait rien de commun avec celui des réacteurs PWR exploités en France, surveillés par l'ASN et constamment tenus à jour, et que le plus épouvantable de ces deux accidents a fait entre cent et mille fois moins de victimes que le cumul des victimes des centrales à charbon, et que l'autre (Fukushima)n'en a fait aucune d'origine nucléaire face aux 20.000 d'origine Tsunami.

4. Les risques liés au traitement des déchets

C'est le dernier argument massue d'un antinucléaire sincère se sentant ébranlé par ce qui précède. Il clôt la discussion par "de toute manière, il reste le problème des déchets dont on ne sait pas quoi faire".

La production électrique d'origine nucléaire 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 Déchets 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. 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 à la décennie 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.

Parmi les éléments contenus dans les combustibles usés, il y a du plutonium, car dans les filières nucléaires actuelles, 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 militaire¹⁶. 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.

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 stratégie pour le futur.

L'annexe 3 présente plus en détails l'ensemble des questions relatives aux déchets radioactifs

Après cet examen des diverses craintes confuses qui hantent le nucléaire, revoyons la solidité de ses avantages

ARGUMENTS FAVORABLES :

1. L'énergie nucléaire du parc français actuel assurant 75% de la production électrique est l'énergie électrique **la moins coûteuse**, ce que confirment les analyses répétées de la Cour des comptes de la nation début 2012, ratissant tous les investissements antérieurs de développement de la filière, ainsi que les provisions affectées aux dépenses prévisibles dans le futur pour le traitement final des déchets et le démantèlement des centrales en fin de vie. Ce coût, situé entre 40 et 60 €/mWh¹⁷ selon les hypothèses financières, est inférieur à celui de toutes les autres sources d'énergie électrique, à l'exception de l'hydraulique. On peut espérer que cette étude de la Cour des comptes dont l'objectivité est difficilement contestable mettra un terme aux contestations répétées évoquant les "coûts masqués".
Pour lever la contestation permanente sur ce coût compétitif par les opposants au nucléaire, qui utilisent volontiers le coût élevé du prototype EPR de Flamanville 3 pour jeter le doute, une preuve simple de cette compétitivité est l'attitude des concurrents d'EDF ne possédant pas de centrale nucléaire, qui ont demandé et obtenu, sur l'insistance de l'Union Européenne au titre de l'ouverture des marchés à la concurrence, que le gouvernement français contraigne EDF, dont il est l'actionnaire majoritaire, à accepter de céder à ses concurrents une partie de sa production nucléaire à prix régulé fixé à 42 €/mWh (loi ARENTH de 2012), énergie sans émission de CO2 (verte) que ces concurrents revendent depuis 2012 sans la différencier de leur propre production.
2. Elle **n'émet pas de CO2** au cours de sa production. Seules les émissions occasionnées par la construction de la centrale et du combustible (infimes rapportées au nombre de kWh produits pendant la durée de vie d'une centrale) peuvent lui être attribuées (6 g/MWh). **C'est actuellement l'arme la plus puissante pour freiner le dérèglement climatique, loin devant les énergies renouvelables.**
Malgré ces faits incontestables, plusieurs enquêtes publiques sur l'origine de la dérive climatique (note de bas de page n°7) montrent qu'une majorité de français, donc d'électeurs, croient encore que le nucléaire est un des facteurs du réchauffement climatique. Ce constat désespérant est une mesure de la perte de culture scientifique du public et de son degré d'imprégnation antinucléaire par la désinformation médiatique et politique.
3. Elle **contribue à assurer une quasi-indépendance¹⁸ énergétique** pour la production d'électricité qui est une composante clé de la sécurité de la nation. Rappelons que ce fut la motivation principale du lancement du programme nucléaire français dans les années 70. Rappelons aussi que la dépense annuelle pour l'importation d'uranium nous alimentant en électricité est environ 1/100 de notre importation annuelle de pétrole (~0,5 milliards € contre ~ 50).
4. Les statistiques officielles publiées par les grandes organisations mondiales, regroupées dans le rapport de la Commission énergie de l'Académie des technologies présenté en **annexe 3 rappellent que cette énergie est celle qui a causé le moins d'effets négatifs sur la santé publique.**
Ces statistiques portent pourtant sur l'ensemble des divers modèles de réacteurs qui ont été en service depuis les débuts de l'énergie nucléaire, y compris ceux de Tchernobyl et Fukushima qui n'ont plus cours dans cet état; elles seraient bien sûr encore meilleures si on ne prenait en compte que les réacteurs actuels. Pourquoi ces statistiques sont-elles si peu connues du public? Que ceux qui doutent vérifient dans l'annexe 1 la rigueur avec laquelle l'Académie des technologies a traité cette comparaison en complétant les données Tchernobyl par les plus pessimistes imaginées par la "loi" linéaire sans seuil.
5. C'est une énergie concentrée, **consommant très peu de terrain pour une puissance donnée**, contrairement à l'éolien et au solaire (et un peu à l'hydraulique). Son emprise au sol est la plus faible parmi toutes les sources d'énergie. A noter

¹⁶ 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.

¹⁷ Le coût du kWh produit par l'EPR prototype de Flamanville serait, selon la Cour des Comptes, entre 7 et 9 c/kWh; pour un EPR de série, on peut estimer qu'il tournerait autour de 6 c/kWh. Il est intéressant de noter qu'un prix du CO2 de 50 €/tonne entraînerait une hausse du kWh « charbon » de 5 c€/kWh.

¹⁸ L'uranium naturel contribuant très peu au coût du kWh, il est aisé de disposer d'un stock stratégique de plusieurs années, ce qui met à l'abri de surprises désagréables (pour le pétrole, c'est 3 mois et pour le gaz quelques semaines).

aussi que, par sa nature concentrée, elle n'a pratiquement pas de conséquence sur l'écosystème (biodiversité). Cette précieuse propriété est la conséquence directe de l'origine de chacune de ces énergies, situées aux deux extrémités du classement des interactions fondamentales dont elles sont issues, l'énergie nucléaire étant issue de l'interaction forte, qui est la plus forte, alors que l'énergie éolienne est par nature une énergie diluée puisqu'elle est issue de l'interaction gravitationnelle qui est la plus faible des trois interactions utilisées pour la production d'énergie électrique, avec ce handicap supplémentaire pour l'éolien d'utiliser l'air comme fluide intermédiaire, 1000 fois moins dense que l'eau qui permet à l'énergie hydraulique de trouver sa place bien qu'utilisant la même interaction gravitationnelle.

Jointe à l'absence d'émission de CO₂, cette propriété fait de l'énergie nucléaire l'énergie la plus écologique, ce qu'ont compris les écomodernistes américains.

6. Elle fournit une **électricité ne dépendant pas des circonstances climatiques courantes, indépendante du vent, de la pluviosité et de l'ensoleillement**¹⁹, elle échappe aux phénomènes d'intermittence des énergies renouvelables²⁰, et constitue de ce fait une excellente énergie électrique de base pilotable²¹, facilitant la gestion des réseaux.
7. Parmi toutes les sources d'énergie, c'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.

Pourquoi ces constats semblent-ils ignorés des médias et des décideurs politiques actuels qui ne les citent jamais? Cette sourdine sur les excellents résultats du nucléaire sur les 50 dernières années signifie que l'on s'interdit de les considérer comme une mesure a posteriori du niveau de risque accepté par les décideurs de l'époque, et de s'en inspirer en transposant ces bons résultats en probabilité d'aussi belle réussite sur les programmes nucléaires à venir.

Cette sourdine signifie que la philosophie retenue est de ne plus utiliser la notion de risque pour les événements que l'on juge extrêmement graves, mais de considérer que même si leur probabilité est extrêmement faible, un tel événement se produira fatalement un jour, et que pour une totale tranquillité d'esprit, voire de confort électoral pour le décideur politique, il est plus sage de renoncer à cette technologie dont la gravité des conséquences imaginables est ressentie comme inacceptable, sans référence aux milliers de vies qui auraient pu être sauvées par ce choix, ni à l'arme inégalable dont on se prive dans la lutte contre la dérive climatique. .

Nous ne sommes là plus très loin de considérer que le retentissement médiatique d'un événement doit être un critère essentiel de toute décision politique, comme il est déjà le principal critère du monde médiatique où les milliers de morts annuels sur les routes font moins de bruit durable dans les médias que Fukushima qui n'a fait aucun mort "nucléaire" parmi les 20.000 morts d'un tsunami presque oublié. Ne dépassons nous pas les limites de la rationalité?

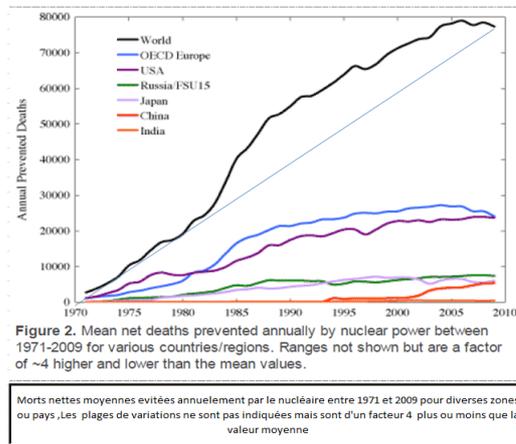
On peut certes admettre que la rationalité pure n'autorise pas à utiliser cette statistique satisfaisante sur le passé comme une probabilité rassurante sur le comportement d'un parc nucléaire de l'avenir, car Monsieur Toulemonde dira avec raison qu'on ne peut jamais prévoir l'avenir, que l'on peut toujours imaginer que des circonstances inimaginables surviennent. Pour autant, est-il rationnel de jeter toutes ces statistiques sur le passé à la corbeille ? Restons alors dans le seul domaine du passé, et comparons des statistiques à des statistiques, portant sur les mêmes périodes, en s'interrogeant sur la rationalité de l'étude de Hansen et Kharecha de 2013, citée dans le rapport de l'Académie des technologies en annexe 1.

De cette étude intitulée (mortalité et émission de gaz à effet de serre évités historiquement et dans le futur grâce au nucléaire) suivi de (le charbon et le gaz sont beaucoup plus dangereux que le nucléaire), on peut extraire les données regroupées dans la figure jointe qui montrent que dans les pays européens de l'OCDE le nucléaire a évité 400.000 décès entre 1971 et 2009, par rapport à une hypothèse où l'énergie électrique correspondante aurait été produite à partir de charbon. Le chiffre est similaire pour les États-Unis, et pour le monde entier ce chiffre serait d'environ 1.200.000 décès. Ces chiffres sont bien évidemment basés sur des modèles médicaux, référencés dans le rapport.

¹⁹ Mises à part les réductions de puissance nécessaires pendant les périodes de canicule et de sécheresse, communes à toutes les centrales thermiques, fossiles ou nucléaires.

²⁰ Remplacer les 60 GW de nucléaire par des ENR nécessiterait d'en installer environ 180 GW, et de multiplier par 2 ou 3 le réseau THT.

²¹ C'est en production de base que le kWh nucléaire est naturellement le plus compétitif, mais le nucléaire a aussi des possibilités peu connues du public de suivi de charge pour les évolutions de charge pas trop rapides (arrêt de week end, baisse quotidienne de nuit)



Ces données factuelles sont-elles suffisamment rationnelles pour éviter de renoncer à la technologie nucléaire sous le prétexte d'une excessive gravité des conséquences imaginables de son usage ?

Malgré ces analyses et comparaisons, beaucoup d'esprits restent imprégnées d'un tabou concernant le nucléaire, hésitant à y appliquer leur pensée rationnelle par crainte de connaissances insuffisantes, et se réfugient dans un émotionnel facile, conforté par une lecture superficielle de certaines études économiques affichant des évaluations de coût pharaoniques d'un hypothétique accident nucléaire. A titre d'exemple, un chercheur en économie a produit une étude²², dans l'hypothèse gratuite d'un accident survenant en France sur un site d'un 900 MW PWR de la classe Fessenheim avec fusion du cœur, en deux degrés de gravité, l'un (grave) avec relâchement radioactif limité (type Fukushima), l'autre (majeur) avec relâchement important, prolongé et non contrôlé (type Tchernobyl), dans 100 conditions météo différentes.

- Le coût annoncé dans le premier cas est de l'ordre de: 120 milliards d'euros, dont l'essentiel (75%) imputable à la perte d'énergie et aux coûts d'image (boycott des productions agricoles locales, baisse des revenus du tourisme, etc.). 3.500 personnes évacuées des territoires contaminés par les rejets radioactifs.
- Le second cas annonce un coût de l'ordre de 430 milliards d'euros, (20% du PIB). dont 53 Md€ pour les conséquences radiologiques (coûts sanitaires, sociaux et agricoles), 110 Md€ pour la gestion des zones d'exclusion, 166 Md€ pour les coûts d'image. Environ 100 000 personnes serait évacuées.

Si on échappe un instant au choc émotionnel provoqué par ces chiffres, on peut noter qu'une probabilité d'accident majeur de 10^{-5} par an et par réacteur génère un coût de 4 millions par réacteur et par an, soit 0,5 €/MWh produit. On peut aussi calculer qu'un accident à 200 G€ tous les 20 ans représente 5 euros du MWh ramené au parc en place, soit moins que la CSPE.²³

Mais il est certainement inacceptable de ne pas prendre en compte l'émotionnel, et intéressons-nous plutôt à la variabilité de ces estimations, en notant que tous ces coûts sont très fortement liés aux normes d'évacuation retenues. Dans le rapport Monal, la norme d'évacuation conduisant à évacuer 100.000 personnes 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 retient 40 mSv/an comme norme, au lieu de 20 et si l'on conserve la loi très pessimiste d'une relation linéaire sans seuil entre irradiation et effet sanitaire, une décision de ne pas évacuer ces 100 000 personnes conduirait à une probabilité de perte de durée de vie par habitant de moins de 1 an, et à un coût économique 50 à 100 fois plus faible, plutôt de l'ordre de 10 G€ que de 400²⁴.

Les messages relatifs aux coûts possibles des accidents sont donc brouillés par le contraste saisissant entre des évaluations largement dépendantes des choix de mode de gestion des évacuations. Ce qu'on paierait n'est-il pas plutôt le prix de la paranoïa nucléaire? Ces 400 milliards, pour leur plus grande part liés à l'évacuation et à "l'image" sont "psychologiques", car dues à une insuffisante information sur le risque réel et au refus de gérer ce risque, qui d'ailleurs disparaît avec l'arrivée du réacteur EPR où l'accident le plus grave de la fusion du cœur est prévu dans la conception du réacteur pour être sans conséquence pour toute personne située à l'extérieur du réacteur.

Notons enfin que 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

²² Conférence de Patrick Monal (IRSN) à l'IHEST : Coût d'un accident nucléaire 21 février 2013

²³ Jean-Marc Jancovici Agora SLC 24 février 2013

²⁴ Hervé Nifenecker Agora SLC 10 février 2013

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, soit 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 ouvert²⁵.

Mais n'est-il pas exagéré d'espérer que toutes les décisions des décideurs soient rationnelles en toutes circonstances? Elles peuvent être altérées :

- temporairement par des réactions émotionnelles dans les pays ayant subi sur leur sol un accident où le nucléaire a été mis en cause, même sans victimes "nucléaires" comme à Fukushima,
- plus durablement par des évolutions culturelles telles que la baisse du niveau de culture scientifique du public, des médias, voire des élus, dans le cadre des processus de décision des démocraties.

Dans une société démocratique comme celle de la France, le discours présenté ici est peu connu de l'électeur moyen qui ne dispose pas dans sa vie active du temps nécessaire pour prendre une connaissance suffisante de tous les sujets importants qui seront l'objet de débats au cours d'une législature. Il a voté aux élections présidentielles pour le candidat dont le profil lui semblait correspondre au mieux à ses propres tendances politiques (libéralisme, socialisme, dirigisme, nationalisme, européanisme,...) dans lesquelles un sujet aussi spécifique que l'avenir du parc énergétique n'apparaît qu'à travers quelques préoccupations plus globales (écologie, développement économique, prises de risques ...), d'ailleurs souvent biaisées dans leur présentation.

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". Les médias lui associent des risques souvent exagérés ou infondés générateurs d'une peur fédératrice qui consolide une conviction autour d'une peur devenue, elle aussi, 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 possible dans un siècle, mais pas dans les 10 ans...n'est pas chose aisée.

Une doxa populaire a pu ainsi se développer, qui est ce mélange de foi assez naïve dans les énergies renouvelables, de laisser-aller sur l'utilisation tant qu'il sera possible des énergies fossiles malgré leur influence néfaste encore lointaine 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 a rendu le discours rationnel inaudible.

L'adhésion ou non au discours présenté dans cette note n'est donc pas spécifiquement exprimée par un vote dédié à ce sujet, mais assujettie à l'arithmétique du vote global aux élections présidentielles, par un électorat partagé entre une majorité relativement passive sur ce domaine, car insuffisamment compétente sur ces problèmes complexes d'énergie, donc sensibles à l'imprégnation sociétale diffusée par les médias, majorité accompagnée de 2 minorités,

- Celle très active des ONG écologiques généralement antinucléaires,
- Celle des milieux scientifiques, associations scientifiques, Académies nationales des Sciences, des Technologies et de médecine, porteuse de ce discours de vérité, moins présente dans les médias.

Les sondages²⁶ d'opinion indiquent que la majorité "passive" est plutôt "réservée" vis-à-vis du nucléaire, imbibée par tous les commentaires négatifs dont elle a été abreuvée par les médias et même l'école publique²⁷. Une telle imprégnation permet de comprendre qu'une majorité plutôt passive puisse par son vote, sans être en mesure d'émettre des objections rationnelles à ce discours, conduire au pouvoir des décideurs qui prendront démocratiquement des décisions non rationnelles issues de l'arithmétique électorale.

Ce défaut de la démocratie face aux problèmes complexes est accentué par la régression de la culture scientifique, aussi bien chez les électeurs que chez les élus qui sont plutôt munis d'une culture littéraire, historique, juridique, ce qui rend leur approche des choix énergétiques par exemple, difficile et sensible à l'influence de groupes d'intérêts. Cette insuffisance de connaissances scientifiques conduit en France à une situation surprenante, où c'est l'État lui-même qui,

²⁵ Bertrand Barré Agora SLC 24 février 2013

²⁶ comme celui de J.M. Jancovici où ~70% des interrogés pensent que le nucléaire est une des causes du responsables au regard de l'avenir climatique ne sauraient rester si longtemps dans une telle obscurité réchauffement climatique.

²⁷ Le TDC785, document sur le nucléaire que l'on trouve dans tous les CDI et bibliothèques scolaires depuis 1999. Comme le souligne M. Salanave, professeur à l'École Centrale, ce document a "contaminé" toute une génération en faisant de nos enfants (et de leurs enseignants) des antinucléaires. On y lit, en vrac : « le nucléaire, énergie en débat » (titre de la couverture), « le sentiment le plus répandu reste l'inquiétude face aux dangers connus et inconnus du nucléaire ». Dans l'édito, les illustrations sont empruntées à l'association "Sortir du Nucléaire" (comme l'effrayant dessin d'une poubelle avec le « trèfle » et un couvercle d'où s'échappe une fumée avec sur le couvercle un village qui bascule, et l'inscription « protégeons l'avenir » Par contre, on n'y lit pas que l'énergie nucléaire assure 75% de notre électricité, à bas coût, avec l'impact le plus faible sur la santé humaine parmi toutes les sources d'énergie, et, sans émission de gaz à effet de serre, et constitue l'arme la plus efficace contre la dérive climatique.

par ses décisions des dernières années, paraît vouloir ignorer la logique de ce discours ou le juger non crédible, entraînant par son comportement une partie des citoyens à calquer son jugement sur celui de son gouvernement démocratiquement élu.

Le Président de la République qui, à la COP 21, avait présenté la France en leader de la réduction des émissions de CO₂, a ensuite annoncé dans un autre discours que la programmation pluriannuelle de l'énergie inclura la fermeture des dernières centrales à charbon françaises, et en même temps celle de la centrale nucléaire de Fessenheim et de 14 autres réacteurs avant 2035. Une telle contradiction, annoncée sans justification comme si cela allait de soi et n'appelait pas de commentaire, jointe à ce silence persistant sur les données factuelles santé publique rappelées ci-dessus fut reçue comme l'aveu que le souci d'une stratégie nationale qui devrait fonder les décisions sur un tel sujet avait fait place à la recherche d'un compromis électoral. Y aurait-il une trop subtile rationalité d'une telle politique énergétique? Il est difficilement imaginable qu'elle ne soit un simple tâtonnement dans l'obscurité du maquis d'un électorat imbibé par un écologisme sentimental dont les bases scientifiques sont inexistantes ou fausses.

Cette politique étonnante vise donc à réduire les émissions de CO₂ d'une production électrique déjà décarbonée à 90% en supprimant d'abord un tiers des centrales nucléaires qui n'en émettent pas, sont encore en bon état de marche²⁸ et stabilisent le réseau, pour les remplacer à grands frais par des centrales éoliennes et solaires qui n'en émettent pas non plus directement, mais dont les intermittences doivent être corrigées par le maintien d'un parc suffisant de centrales thermiques (fossiles d'Allemagne avec émission de CO₂, ou nucléaires de France sans CO₂), qui apportent l'énergie défaillante pendant les intermittences, ainsi que leur indispensable inertie mécanique permettant de passer sans encombre les régimes transitoires.

Le cap annoncé reste cependant, en France comme dans tous les pays qui ont signé l'accord de Paris, la lutte contre le réchauffement climatique qui est le plus grand risque qui se présente pour la fin de ce siècle, comme l'a rappelé le Président de la République dans son discours d'inauguration de la Conférence environnementale le 15 septembre 2012. Mais la discordance entre les déclarations et les actes donne à penser que l'objectif ne sera pas atteint, car le rêve des écologistes français de l'atteindre avec 100% d'EnRI est une utopie qui tient de la pensée magique en voulant négliger les lois de la physique. C'est dommage pour nos enfants

POUR NE PAS DESESPERER

Doit-on se résigner à penser que le niveau de culture scientifique du public français s'est affaibli depuis les années 70 où le programme nucléaire a été lancé dans un consensus général autour de grands serviteurs de l'état éclairés et éclairants ? Doit-on se résigner à une telle influence du vocabulaire devenu symbolique sur les opinions, et à neutraliser le vocabulaire scientifique comme on l'a fait dans le domaine médical en ne parlant plus de **rayons X** ni de **résonance magnétique nucléaire**, mais d'**imagerie médicale** ou **scanner** ? On pourrait renommer "**centrales nucléaires**" "**centrales thermiques bas carbone**", les distinguant des "**centrales thermiques moyen carbone**" regroupant les centrales thermiques à gaz et les centrales thermiques à cycle combiné, et bien les distinguer des simples "**centrales thermiques à charbon**" sans les stigmatiser par le terme **haut carbone** ?

PEUT-ON IMAGINER D'AUTRES MOYENS DE SAUVETAGE que les méga-stockages indirects de l'énergie électrique, capables d'effacer dans des conditions économiques tolérables la trop forte variabilité et les intermittences de l'éolien et du solaire sur des durées correspondant aux événements météorologiques statistiquement observés.

L' HYDROGENE a longtemps porté cet espoir, mais il s'avère ne pas être à l'échelle d'un réseau électrique (étude de l'Académie des technologies en **annexe 4**).

Si on se souvient qu'un des ressentis du public est qu'il ne sera pas facile de se passer des énergies fossiles qui constituent encore 80% de notre consommation globale d'énergie primaire, et que les problèmes économique d'après COVID 19 font passer la préoccupation climatique derrière celles de l'emploi et de l'équilibre économique, on est tenté de poser à nouveau une question déjà posée depuis une trentaine d'années :

POURRAIT-T-ON "VERDIR" UN PEU PLUS LES ENERGIES FOSSILES ?

Le besoin de les "verdier" pour les rendre plus acceptables n'est pas flagrant au plan économique, tant que la pénalisation des émissions de CO₂ reste faible. Jusqu'à maintenant, ce "verdissement" est recherché **par trois voies principales** :

- Une augmentation du rendement des nouvelles centrales par des **températures et pressions de vapeur plus élevées**, dont le rendement du cycle de Carnot est ainsi accru, permettant d'extraire plus d'énergie électrique de la même quantité d'énergie thermique, avec moins d'émission de CO₂ par kWh électrique.
- **Le remplacement du charbon par le gaz**, moins émetteur, dans les réhabilitations de centrales à charbon.
- **L'utilisation des cycles combinés à gaz pour les nouvelles centrales, faisant un saut de rendement de la plage 40/45% à la plage 55/60%.**

Que penser aujourd'hui d'un "verdissement" consistant à capter et séquestrer le CO₂ des sources fossiles?

²⁸ Aux USA, les centrales du même modèle sont prolongées à 60 ou 80 ans

CAPTAGE ET SEQUESTRATION GEOLOGIQUE DU CO2

Ce sujet avait déjà été exploré à partir de 1990 avec une première réalisation engagée dès 1996 : Sleipner, sur un gisement de gaz naturel riche en CO2 en mer de Norvège), suivi par un nombre croissant d'autres projets internationaux, soutenus par les groupes pétroliers dont l'intérêt premier n'était pas d'abord d'ordre climatique, mais soit l'exploitation de poches de gaz naturel pollué par un taux de CO2 trop élevé pour être vendable (~10%) qu'il fallait capter et stocker pour abaisser ce taux à 2%, soit extraire les derniers gallons d'un puits de pétrole par injection de CO2 sous pression.

Une réduction des émissions de CO2 significative pour le climat ne pourrait être obtenue que si on réussissait à généraliser au plus vite la capture et le stockage du CO2 (CSC en français, CCS en anglais), permettant de conserver le charbon et le gaz comme sources essentielles d'énergie pour produire principalement de l'électricité, mais peut-être aussi du carburant liquide par CTL (coal to liquid) ou de l'hydrogène. Cette perspective sur la durée encore longue de notre dépendance vis-à-vis de ces sources fossiles conduit à une obligation de réussite de la CSC

Les grands pays charbonniers ont intérêt à développer le CSC pour continuer à exploiter leur ressource. Un objectif affiché était de parvenir à un déploiement industriel vers 2020. D'après le Global CCS Institute, créé en 2009 par l'Australie et groupant 20 gouvernements et 80 grandes compagnies, 238 projets plus ou moins avancés de CSC existaient dans le monde en 2010, dont 80 à grande échelle (> 1 Mt CO2/an pour le charbon, > 0,5 Mt CO2/an pour le gaz). L'Agence Internationale de l'Energie a publié en 2010 une "road map" du CSC mondial évoquant la nécessité de 3000 installations d'ici 2050, impliquant un niveau d'investissements de l'ordre de 2 500 à 3 000 milliards de dollars de 2010 à 2050.

Depuis, l'intérêt pour le CSC semble avoir un peu fléchi, la pénalisation des émissions de CO2 étant insuffisante, par un trop faible prix du CO2 sur le marché européen ETS, et peut-être découragé par l'écart gigantesque entre les ordres de grandeurs des plus grands projets (quelques millions de tonnes de CO2 par an) et les émissions mondiales annuelles (quelques dizaines de milliards de tonnes de CO2 par an). Si l'intérêt porté à l'hydrogène se maintient, le captage-séquestration du CO2 émis par l'opération de reformage de méthane ne serait-il pas un moyen concurrent de l'électrolyse de l'eau pour produire un hydrogène vert?

L'annexe 7 donne une liste des principales réalisations mondiales de CSC, et décrit les difficultés, coûts et risques du CSC.

Les experts, les écologistes et les ONG sont divisés sur le CSC. Greenpeace s'y oppose, reprochant essentiellement à cette solution de consommer elle-même de l'énergie (plus 10 à 40 %) une fraction de la production de la centrale devant être détournée pour séparer, traiter et compresser puis enfouir le CO2, réduisant l'efficacité énergétique du procédé.

Les partisans rappellent qu'il n'existe pas, selon l'Agence internationale de l'énergie de scénario crédible permettant une baisse des émissions de CO2 suffisante pour stabiliser le climat uniquement à base de renouvelable et d'économies d'énergie, que la séquestration n'est pas une solution miracle, mais peut s'inscrire dans une action plus générale incluant aussi les économies d'énergie, les renouvelables, la reforestation et, sujet plus polémique, le développement du nucléaire.

Un avis de l'Ademe en 2013 cite **d'autres points de vigilance**, notamment sur la « concertation avec les populations nécessaire, face aux oppositions fortes; quelques pays sont allés jusqu'à interdire cette technique.

Conclusion : La séquestration du CO2 intéresse un nombre croissant de chercheurs et de décideurs, mais n'est pas une solution disponible à court terme ni opérationnelle à grande échelle à moyen terme. Les projets d'envergure industrielle réalisés depuis 20 ans, chacune de l'ordre du million de tonne de CO2 par an, resteront insignifiants par rapport aux émissions mondiales de l'ordre de plusieurs dizaines de milliards de tonnes annuelles. Pour séquestrer seulement 10 % de ces émissions, il faudrait environ 1 000 projets de grande envergure, et plusieurs centaines de sites sécurisés, ainsi que des milliers de kilomètres de pipe-line ou des milliers de navires spéciaux pour transporter le CO2 liquéfié. Une diminution des émissions à la source (facteur 4 ou 5) et la protection et restauration des puits naturels de carbone semblent donc rester une priorité, encore à mettre en œuvre.

Le CSC apportera tardivement sa contribution mais il ne semble donc pas être une bouée de sauvetage des énergies fossiles permettant de faire face au risque climatique dans un délai suffisamment proche.

FAUT-IL UNE CONCLUSION GENERALE?

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.

Dans une démocratie plus que dans d'autres systèmes, un responsable exécutif national est amené à tenir le plus grand compte de cette doxa populaire, et pèsera avec soin les options qui s'offrent à lui :

- Soit, comme l'y invite la doxa d'une fraction de l'électorat, céder à l'idée que les risques de la technologie nucléaire soient perçus comme non comparables avec tout autre risque, et que ces risques ne soient plus évalués à l'échelle de leur très faible probabilité, mais admis comme certains dans leur survenue et exagérés dans leurs conséquences. La décision la plus simple est alors d'abandonner toute technologie nucléaire, quels que soient ses avantages, en commençant progressivement par réduire sa part à 50%, ce qui donnera un sentiment d'équilibre.
- Soit constater que les conséquences des deux seuls accidents majeurs survenus dans le monde en 70 ans d'exploitation de cette technologie n'ont rien eu d'incomparable aux autres grands accidents industriels, et que la comparaison des statistiques de leur impact sur la santé publique est au contraire clairement à leur avantage, ceci en notant que Tchernobyl fut plutôt un accident du système soviétique de l'époque que du nucléaire civil, et qu'à Fukushima, malgré un événement tout à fait exceptionnel (tremblement de terre et tsunami historiques) et diverses circonstances aggravantes (centrale totalement noyée par mur anti-tsunami trop bas, perte de tout auxiliaire de secours, réacteur ancien sur lequel les sécurités post-TMI n'étaient pas implantées) l'accident n'a causé aucun décès par radioactivité dans un tsunami qui en a tué 20.000.

Pour que les mécanismes démocratiques permettent d'effectuer des choix 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. C'est cette rationalité partagée qui nous a servi ici de guide.

Pour un progrès raisonné, choisi et partagé²⁹, 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.

²⁹ Devise de l'Académie des technologies

Une autre approche par le pari de Pascal ?

Après un acte aussi chargé de sens que la fermeture délibérée de la centrale nucléaire de Fessenheim en bon état de marche, et l'engagement par la loi à supprimer une douzaine d'autres réacteurs avant 2035, il est illusoire de penser que le gouvernement français actuel puisse, malgré quelques déclarations verbales contradictoires de ci de là, se convertir aux avis des milieux scientifiques dont les analyses convergentes recommandent une toute autre politique de l'énergie.

La consolidation et l'expansion du nucléaire dans le monde s'établiront pourtant, parce que c'est l'arme la plus puissante à notre portée dans les délais nécessaires pour résoudre notre plus grand problème : le réchauffement climatique, tout en assurant nos ressources en énergie électrique sans émission de CO2 pendant plusieurs siècles.

C'est donc du dynamisme de la Chine dans son programme de décarbonation, de la solidité de la Russie, des USA, de l'Inde, du Royaume Uni, de la Finlande, de la Suède, de la Hollande, de la république Tchèque, de la Pologne et des ex-républiques soviétiques d'Europe de l'est, et la Corée du sud, du Japon et de quelques autres pays appuyés sur la Russie ou les USA comme la Turquie, les Emirats arabes ou l'Egypte que soufflera le vent nucléaire. Dommage pour la France qui aura perdu du temps et sa place dans la défense du climat par ce coup de frein contagieux venu d'Allemagne.

En France, l'apparente absence de conviction scientifique de la tête politique du pays ne permettra donc pas d'établir dans l'unité nationale une stratégie de l'énergie cohérente avec la défense du climat. Dont acte.

Avant d'aller voler entre éoliennes et panneaux solaires dans cet hypothétique paradis verdoyant, allégés du poids de ce risque obsédant de l'accident nucléaire par la perspective réconfortante de sa disparition, notre Président se demande s'il ne serait pas toutefois prudent, sur un tel sujet que d'autres prétendent existentiel, d'en pratiquer une approche inspirée du célèbre "Pari de Pascal" dont il a apprécié la lecture dans sa jeunesse, sur l'existence ou la non-existence de Dieu.

Les deux croyances mises en pari dans ce nouveau "Pari de Pascal 2021" sur le futur énergétique seraient :

Hypothèse A : "Les écologistes avaient raison, le nucléaire, c'est la catastrophe annoncée, seules les ENR nous sauveront"

Hypothèse B : " Les scientifiques avaient raison, seul le nucléaire possède la totalité des qualités nécessaires"

Ce pari serait lancé en 2021 pour un face à face avec la réalité en 2050, date suffisamment distante pour permettre de constater l'effet des politiques engagées en 2020, et toutefois suffisamment proche pour permettre de modifier une politique climatique se révélant décevante avant la date plus cruciale de 2100.

En 2021, la France est gouvernée par un Chef d'Etat familier du dédoublement de personnalité qu'il utilise pour prendre des décisions sur les sujets qu'il connaît peu, et en percevoir ainsi toutes les facettes sans préjugé, ce qui lui permet de conduire plusieurs politiques en même temps. À défaut de conviction sur ces hypothèses A et B, il se résout donc au dédoublement; Un peu magicien, il fait parier mentalement en même temps ses deux doubles,

- Son double écologiste le plus croyant parie sur A. Il a l'intention de poursuivre sans faillir le programme de réduction du nucléaire, dans la perspective de sa disparition, et de noyer la France sous un océan d'éoliennes et de panneaux solaires.

- Son double seulement vaguement croyant, parie sur B. On ne sait jamais! Il aura la prudence de lancer dès 2021 un modeste programme de 6 réacteurs EPR permettant de redémarrer l'industrie correspondante en sommeil depuis 20 ans.

Comme il est un peu magicien, ce Chef d'Etat sait qu'il peut aussi entrevoir un aperçu fugace de l'avenir pas trop lointain en 2050 sans avoir à passer par l'étape désagréable de la mort comme dans le vrai pari de Pascal historique.

En se concentrant, yeux clos, il entrevoit le paysage énergétique mondial de 2050 :

"Il ne semble pas s'être produit d'accident nucléaire majeur entre 2020 et 2050, ou alors ils n'étaient pas majeurs et le public s'est habitué à les traiter avec la même objectivité que les autres accidents industriels car les médias en parlent moins que dans la décennie 2010-2020; il est vrai aussi qu'entre temps les écologistes ont évolué en se ralliant au nucléaire.

Son double centriste le félicite d'avoir eu la sagesse de lancer quelques EPR dès 2021, car il est devenu difficile en 2050 de continuer à distiller dans l'esprit du public l'idée du caractère exceptionnellement dangereux du nucléaire après un siècle de pratique et d'excellents résultats. La France ne sera pas au "paradis", mais pourra reprendre son rang un peu dégradé dans un monde où la situation climatique à cette date nous dira s'il faut accroître la chasse au CO₂; le monde en aura alors les moyens puisqu'on ne s'interdirait plus l'usage du plus puissant de ces moyens pour limiter les émissions de CO₂

Son double écolo-extrémiste regrette le rêve qu'il croyait vert, constate l'isolement et un déclassement de la France et de l'Europe qui sera leur purgatoire face aux autres pays ayant continué à se développer économiquement et écologiquement par l'énergie nucléaire sous diverses formes (REP, EPR, SMR, RNR). La lutte pour la préservation du climat se poursuivra sans l'Europe qui se sera rangée sous la bannière ENRI du nucléaire honteux..

Il avait cru imaginable que de multiples accidents nucléaires surviendraient entre 2020 et 2050, et se révéleraient d'une gravité capable de faire abandonner au monde entier l'usage civil d'une énergie présentant autant d'avantages après un siècle d'existence, alors qu'en 2020, après déjà 70 ans, le nucléaire se classait déjà au premier rang, tous critères pris en compte"

Toute ressemblance avec l'authentique "Pari de Pascal" ne saurait concerner que la complexité de l'esprit humain.

ANNEXE 1

RAFRAÎCHISSEMENT sur les grandeurs physiques essentielles, seulement pour ceux qui n'auraient conservé de leurs années scolaires que des « connotations ». A sauter pour les autres.

Force, travail, énergie, puissance, chaleur, des notions qui ont jalonné le long chemin de la science et de la technologie. Le grand public, et parfois certains journalistes, peuvent ne pas avoir gardé en mémoire les définitions de ces grandeurs qu'ils ne manipulent pas tous les jours, et il n'est peut-être pas inutile de les rappeler d'abord de manière plus simple que par la réflexion philosophique sur le concept de force de l'annexe 1 qui suivra, en les reliant aux grandeurs de base que sont l'espace, imagé par la longueur L , la matière, imagée par sa masse M , et le temps T , et en présentant au lecteur averti des excuses pour des rappels aussi élémentaires d'analyse dimensionnelle.

- Chacun sait depuis l'école primaire que la surface d'un rectangle est le produit de ses deux côtés, 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 $L \cdot T^{-1}$.

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

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

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 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 $E = M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$.

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

La force est 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), Méga M (10^6), Giga G (10^9), Téra T (10^{12}). Les unités anciennes "historiques" se relient à ces unités par :

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, donc 1 kW = 1,36 CV.

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

ANNEXE 2

CHRONIQUE DES DEUX ACCIDENTS DE TCHERNOBYL ET FUKUSHIMA

Tchernobyl 26 avril 1986 Explosion du réacteur RBMK n°4 de la centrale nucléaire Lénine, accident classé au plus haut niveau de gravité (7/7), avec fusion du cœur, incendie du graphite modérateur de réaction pendant une semaine, et large dispersion de produits radioactifs, des retombées étant observées sur toute l'Europe.

Cascade des causalités de cet accident majeur :

- La cause immédiate de cet accident est une **augmentation incontrôlée de la puissance du réacteur**, conduisant à la fusion du cœur, qui a entraîné l'explosion, l'incendie du graphite et la libération d'importantes quantités d'éléments radioactifs dans l'atmosphère.
- Cet emballement de la radioactivité du réacteur ne s'est pas produit en service normal. C'est une **faute humaine**, l'imprudence d'opérateurs spécialisés connaissant bien ce modèle RBMK, profitant d'un arrêt programmé de ce réacteur n°4 pour conduire un **essai spécial** explorant les limites de stabilité séparé du réseau, le système contrôle étant alimenté par l'alternateur en ralentissement, en **désactivant volontairement certaines protections de sécurité**, alors que le réacteur se trouvait dans une configuration connue comme particulièrement instable.
- Enfin **plusieurs défauts de conception du RBMK**, datant des années 1950: **1. un coefficient de température très positif**, ce qui signifie qu'une augmentation de réactivité, donc de puissance dès que la température augmente, provoque un emballement de puissance en boucle si le système de contrôle n'est pas assez rapide, ou est neutralisé; **2. un système d'arrêt d'urgence trop lent**, et surtout; **3. l'absence d'enceinte de confinement**³⁰ et le choix du graphite comme, modérateur de réaction, qui ont aggravé l'accident en dispersant dans l'atmosphère pendant une semaine d'incendie du graphite une quantité de produits radioactifs.

Plus de 200 000 personnes ont été définitivement évacuées. Après des évaluations largement exagérées par les médias des dégâts humains de cette catastrophe, évoquant des centaines de milliers de morts, les enquêtes successives de l'ONU à travers l'UNSCEAR³¹ régulièrement mises à jour³², avaient ramené les évaluations fantaisistes initiales à moins de 100 morts³³, et à une possibilité de décès prématurés attribuables à l'accident pouvant atteindre 4000³⁴. D'autres éditions annoncent **entre 60 et 4000 décès** selon les rapports des agences onusiennes publiés dans les revues scientifiques à comité de lecture, ou, beaucoup plus, selon les diverses analyses d'agences ou d'ONG publiées dans les revues non scientifiques.

L'intensité et l'envergure de la dispersion de produits radioactifs avaient clairement été expliquées par la conception du réacteur RBMK ne possédant pas d'enceinte de confinement, contrairement aux prescriptions occidentales de l'époque, et par l'incendie du graphite servant de modérateur. Aucune des causes de l'accident ne se retrouvaient dans la conception et les règles rigoureuses d'exploitation des réacteurs occidentaux. C'était assez rassurant.

Une partie des réacteurs RBMK en service dans d'autres centrales ont été arrêtés définitivement. Une autre partie (une dizaine) ne l'ont été que provisoirement, et ont été modifiés en concertation avec des experts de l'Union Européenne, des améliorations de sécurité touchant notamment le nombre et la distribution des barres de contrôle du cœur du réacteur et le système d'arrêt d'urgence. Ils ont été remis en service pour terminer normalement leur carrière après une

³⁰ Les réacteurs RBMK sont "ouvrable" pendant leur fonctionnement, permettant de prélever en début de réaction du plutonium 239 qui se forme le premier et est le seul isotope "militaire" utilisable dans une bombe atomique.

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 militaire³⁰. Les isotopes impairs du plutonium sont d'excellents combustibles fissiles.

³¹ United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiations.

³² Voir *Fukushima : quels risques sanitaires* par Roland Masse dans *Risques* n° 86 de juin 2011

³³ Parmi les 237 premiers intervenants ayant subi des doses d'irradiation massive, classées ARS (acute radiation syndrome) supérieures à 1 Sv, 28 sont morts dans les premières semaines, ayant reçu des doses de 4 à 16 Sv entraînant des brûlures radiologiques. 19 autres sont morts au cours de l'année 1986, dont 6 avait développé un cancer. En outre environ 7000 cancers de la thyroïde se sont développés entre 1986 et 2011 chez des enfants, essentiellement par absorption de lait contaminé, ayant reçu des doses à la thyroïde de 500 mSv, ont conduit à environ 15 décès recensés (guérison de plus de 99% des cas) et ne devrait pas dépasser, à l'avenir, 5 à 10 % des cas opérés.

³⁴ Les 530000 "liquidateurs" ont reçu une dose moyenne de 117 mSv au cours du nettoyage du site. L'application de la relation linéaire sans seuil entre dose et effet, qui est la règle la plus pessimiste, conduit à envisager un surplus de cancers futurs de l'ordre de 4000 supplémentaires au-delà des 100 000 cancers statistiquement attendus sur la même population de 530 000 personnes non irradiées, soit + 4%. A noter que dans sa dernière édition 2011, le rapport de l'UNSCEAR se refuse à utiliser cette loi linéaire sans seuil, témoignant ainsi des doutes croissants de la communauté scientifique sur l'usage de cette loi simpliste pour prédire un nombre de victimes probables chez les irradiés par faibles doses. A ce jour, selon ce rapport UNSCEAR 2011, ni chez les liquidateurs, ni chez les 640 000 habitants des zones contaminées à plus de 37 000 Bq/m² déposés sur le sol, on ne distingue d'augmentation avérée du nombre des cancers (à l'exception des cancers thyroïdiens chez les enfants). En revanche, le rapport UNSCEAR 2011 insiste sur les conséquences sociales de l'accident : crise économique, pauvreté, détresse des évacués, carences alimentaires, perte de confiance dans l'avenir, etc.

quarantaine d'années de fonctionnement. A la centrale de Léninegrad 2, le réacteur RBMK 2.2 mis en service en 1976 vient d'être arrêté après 44 ans de service pour être remplacé par un réacteur VVER en 2021.

Rien de grave ne s'est passé dans le monde des centrales nucléaires sur les 25 ans qui ont suivi.

Et voilà que le 11 mars 2011 survient un nouvel accident nucléaire à la centrale de Fukushima Daiichi, dans un pays réputé pour sa technologie, son ordre et sa discipline. Mais cette fois, la cause est un tremblement de terre d'un niveau 9 jamais encore observé au Japon.

La centrale (4 réacteurs BWR en service depuis 40 ans pour G1, 33 et 37 ans pour les trois autres) a convenablement résisté au séisme, avec arrêt automatique des réacteurs en service; les diesels de secours ont correctement démarré pour alimenter les pompes de refroidissement du cœur, **puis le tsunami est arrivé à la côte une heure plus tard, submergeant largement le mur anti-tsunami de 6,5 mètres qui n'était pas prévu pour une vague d'une hauteur de l'ordre de 14 mètres, noyant tous les équipements auxiliaires de la centrale, moteurs des pompes, appareillage d'alimentation, diesels de secours, privant les réacteurs et les piscines de stockage des combustibles usés de tout moyen de refroidissement. Le réseau électrique ayant été par ailleurs détruit par le tremblement de terre la centrale s'est trouvée sans aucune source d'électricité pour alimenter quelque moyen de secours que ce soit.**

La conséquence de la perte durable des moyens de refroidissement fut l'échauffement du combustible, une montée en température et en pression des cuves des trois réacteurs en service ainsi que l'échauffement des piscines. Certes l'interruption de la réaction nucléaire par l'insertion des barres de contrôle dès la survenue du tremblement de terre a fortement réduit la production de chaleur du réacteur, mais la radioactivité résiduelle des produits de fission en maintient une fraction d'environ 7% après la chute des barres, décroissant en quelques semaines avec la décroissance naturelle de ces PF.

Cet apport de chaleur qui reste substantiel oblige à mettre en œuvre des moyens externes de refroidissement peu efficaces (arrosage par les pompiers), puis à injecter de l'eau de mer dans les réacteurs. L'échauffement du combustible conduit à une destruction partielle des gaines en zirconium, oxydé par la vapeur d'eau et dégageant de grandes quantités d'hydrogène. L'augmentation de la pression dans les cuves des réacteurs, puis dans les enceintes de confinement a alors contraint l'exploitant à décompresser les enceintes, relâchant alors un mélange de vapeur, de produits radioactifs volatils (essentiellement iode 131 et césium 137), et d'hydrogène occasionnant plusieurs explosions destructrices des structures légères du toit, et l'envoi dans l'atmosphère de plusieurs bouffées de produits radioactifs.

Auparavant, les autorités avaient fait évacuer les populations dans un rayon de 10 km, puis 20 km (~80000 personnes), et confiné jusqu'à 30 km. L'arrosage à l'eau de mer par les pompiers et l'envoi d'eau de mer dans les cuves ont provoqué l'entraînement de radioactivité par ruissellement de cette eau contaminée dans les parties basses de la centrale, et des fuites d'eau contaminée vers l'océan voisin.

L'évolution d'un accident post-cause initiale est mal prévisible, vu l'extrême diversité des situations pouvant se greffer sur cette cause initiale, dont une large part est liée à la difficulté du refroidissement qui évite la réactivation de réactions nucléaires locales. A Fukushima, le cumul de circonstances aggravantes fut exemplaire : tremblement de terre exceptionnel > abattant le réseau électrique de la région, et > déclenchant un tsunami d' hauteur exceptionnelle < dépassant le mur anti tsunami > inondant la centrale > et les diesels de secours > privant la centrale de tout source d'électricité et d'eau pour refroidir réacteur et piscine. La seule circonstance favorable fut le sens du vent qui emmena les émanations radioactives vers l'océan.

Pour la plupart des médias, la catastrophe de la centrale nucléaire efface le cataclysme du tsunami et ses 20 000 morts, le public est anesthésié, sa réaction est émotionnelle: *Ne nous parlez plus de réchauffement planétaire vers la fin du siècle, le nucléaire, voilà un problème actuel, il y a eu Tchernobyl, il y a maintenant Fukushima, il y en aura fatalement d'autres, car Messieurs les ingénieurs, vous ne pourrez jamais tout prévoir. Avec ces produits radioactifs qui vont tourner autour de la planète et retomber un peu partout, occasionnant cancers et leucémies, ces terres stérilisées. Déjà il y avait cette question des déchets radioactifs à longue durée de vie dont il faudra se débarrasser on ne sait trop comment, non, trop c'est trop, le plus simple est de sortir du nucléaire.*

Voilà pour la réaction émotionnelle... Examinons la suite des événements:

Quelques jours après l'accident, la restauration d'une ligne électrique détruite par le tremblement de terre permet la reprise progressive de la connaissance des températures et pressions par l'alimentation des capteurs, mais beaucoup de ces capteurs sont défectueux; l'eau radioactive accumulée dans les points bas gêne les travaux et doit être évacuée. Après évaluation, décision est prise de l'évacuer dans le pacifique (l'iode 131 le plus radioactif de la contamination ayant une demi-vie d'une semaine, il n'en reste que 1/1000 au bout de 10 semaines, et l'océan étant très profond à courte distance de la côte, la dispersion, jointe à la décroissance naturelle, permet d'estimer qu'une personne qui ne mangerait que du poisson local et des algues pendant l'année qui vient recevrait une surdose de 0,6 mSv, s'ajoutant aux 2,5 mSv qu'il reçoit annuellement dans les conditions environnementales normales du Japon.

La situation se stabilise progressivement, notamment par la baisse naturelle de la puissance thermique résiduelle des cœurs, un remplissage d'azote de l'enceinte de confinement évite de nouvelles explosions d'hydrogène, des fuites sont progressivement identifiées et colmatées, limitant de plus en plus les rejets radioactifs. Il reste encore beaucoup d'inconnues sur l'état réel des cuves, des enceintes et des piscines, mais la reprise en main semble assurée, avec une période encore longue de refroidissement (~6 à 9 mois?) jusqu'à un état ne nécessitant plus de refroidissement forcé, ce délai étant imposé par la limitation du temps de travail en zone irradiée pour l'évacuation des 60 000 tonnes d'eau fortement radioactive avant la remise en service du refroidissement en boucle fermée.

Les destructions importantes condamnent cette centrale pour laquelle des plans de démantèlement avec "retour au gazon" en plusieurs décennies font l'objet d'évaluations.

Les émissions de radioactivité de l'accident Fukushima sont estimées avoir été de l'ordre du dixième de celles de Tchernobyl (iode 130 TBq contre 1500, césium 10 PBq contre 137), car seuls les éléments gazeux, les tellures, l'iode et le césium ont contaminé l'environnement sur une bande de 450 km² vers le nord-ouest, les éléments lourds n'ayant pas été relâchés. Une carte dressée par l'IRSN le 08-04-2011 montre l'estimation des doses reçues par les habitants qui viendraient se réinstaller dans les zones irradiées; compte tenu de la disparition en 2 mois de l'iode 131, il ne subsistera que le césium 137 (demi-vie 30 ans). De plus, il s'agit d'un aérosol qui se dépose sur les terres ou les toitures et est lessivé par les pluies vers les ruisseaux et la mer. Son infiltration dans le sol est très lente. Il n'est pas repris par les systèmes racinaires des plantes à l'exception des champignons.

Mars 2012, un an après l'accident³⁵,

L'état froid" des cœurs (température < 100°C avec le circuit normal de refroidissement) a été obtenu comme prévu vers la fin 2011. Les fuites radioactives résiduelles sont sous contrôle, beaucoup de stress social par l'évacuation de la population du voisinage de la centrale sur une vingtaine de kilomètres, mais nous devons saluer l'organisation et le courage des équipes de Tepco et des populations environnantes, et le résultat : **aucun décès attribuable à la radioactivité**. Parmi les intervenants, une vingtaine ont reçu des doses comprises entre 100 et 250 mSv (250 était la valeur limite fixée pour les « liquidateurs » de TEPCO, et une dizaine ont reçu des doses internes entre 250 et 500 mSv par suite de masque mal ajusté, alors que, grâce aux mesures d'évacuation, de confinement et de restrictions de consommation de produits contaminés, la population n'a reçu que de très faibles doses. L'état physique des réacteurs accidentés est mieux connu³⁶, en partie par simulations à cause du manque d'accès direct des zones centrales trop radioactives:

- Réacteur 1: cœur fondu, cuve percée, plancher béton de 1,9 mètre d'épaisseur attaqué sur 80 cm, posé sur radier d'épaisseur 8 mètres, intact.
- Réacteurs 2 et 3 fusion partielle du cœur, percement cuve encore incertain, par contre perte d'étanchéité de l'enceinte de confinement du réacteur 2, ce qui peut entraîner quelques rejets diffus de radioactivité. L'état froid stable est une assurance contre une remise en fusion du corium et de nouvelles émissions de vapeur radioactive.
- Le combustible entreposé dans la piscine du réacteur 4 est intact, la piscine a été renforcée. Dans les parties de la zone d'exclusion de rayon 20 km³⁷, où la radioactivité est en dessous de 20 mSv/an, le gouvernement japonais entreprend les réparations des dommages causés par le séisme et le tsunami, pour y autoriser le retour de la population.

Fukushima vient d'établir un constat : un événement naturel imprévisible dans son ampleur, hors du répertoire connu des catastrophes naturelles à cet endroit de la planète, a causé environ 20.000 morts et détruit entre autres une centrale nucléaire³⁸, avec certes le stress social d'une évacuation temporaire de la population sur un rayon de 20 à 30 km, mais n'a conduit à aucun décès à ce jour attribuable à la radioactivité.

On se doit d'ajouter que la totale destruction de cette centrale nucléaire ancienne et non mise à jour aurait été évitée, et les dégâts limités si l'une des trois précautions suivantes avaient été prises par l'exploitant : Un mur anti-tsunami plus haut pour éviter la submersion de la centrale

1. **Une implantation plus haute des diesels de secours pour éviter leur noyade**
2. **Une meilleure prise en compte des enseignements de TMI, notamment en ce qui concerne le risque hydrogène (recombineurs notamment qui auraient évité les explosions d'hydrogène), et l'installation de filtres à sable (comme il a été fait sur tous les réacteurs européens) captant la très grande majorité des émissions radioactives, ce qui aurait permis de réduire considérablement la surface touchée par les retombées radioactives et rétablir beaucoup plus rapidement le retour des populations**
Le rapport de synthèse de l'OMS de février 2013 confirme, malgré la relative vétusté et le manque de mises à jour de ce réacteur, les effets restreints de cette catastrophe nucléaire sur la santé publique.

Fin de la chronique des deux accidents de Tchernobyl et Fukushima

³⁵ Un suivi quotidien de tous les événements, observations et décisions concernant tous les aspects des conséquences de l'accident est accessible sur Internet à www.informations-japon.com suivi quotidien de la catastrophe de Fukushima.

³⁶ Voir "L'accident de Fukushima et ses conséquences" synthèse de la SFEN au 6 mars 2012. Ce document explicite les mesures de réhabilitations des territoires contaminés, dans l'état des informations en mars 2012. Le gouvernement japonais vint d'autoriser le retour de la population dans la plus grande partie de la zone contaminée.

³⁷ Ceci concerne aussi des zones plus éloignées (jusqu'à 50 km), contaminées en taches de léopard.

³⁸ Dont on doit rappeler qu'il s'agissait d'un des plus anciens types de réacteurs (BWR mark 1), intrinsèquement moins fiable que les PWR, ayant plus de 40 ans de service, qui ne bénéficiait pas de toutes les sécurités supplémentaires apportées sur tous les réacteurs français (et probablement la plupart des réacteurs mondiaux) en retour d'expérience de l'incident de Three Mile Island : capteurs-recombineurs d'hydrogène évitant les explosions, filtres à sable captant 90% de la radioactivité lors des dépressurisations volontaires. Dans ces circonstances exceptionnelles, ces vieux réacteurs ont démontré la robustesse des systèmes nucléaires par les conséquences sanitaires extérieures limitées.

Annexe 3

L'incidence sur la santé humaine des différentes sources de production d'énergie électrique: évaluation sur les cinquante dernières années

(Rapport de la Commission Energie de l'Académie des Technologies,
Approuvé par le Conseil Académique)

Introduction

Il suffit d'avoir subi une panne un peu longue d'électricité pour se rendre compte à quel point l'énergie électrique est devenue indispensable. Le droit à l'électricité est devenu un droit presque aussi important que le droit à l'eau potable.

La production de l'énergie électrique dans un pays développé doit répondre à un certain nombre de critères : indépendance énergétique, sécurité, accès équitable pour tous, faible coût pour l'utilisateur, sûreté et disponibilité des moyens de production, impact minimum sur la santé humaine.

Les sources de production d'énergie électrique sont très variées: les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), les installations hydroélectriques, l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables comme l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. Tous présentent des risques, dont la perception par les citoyens est très différente selon le type de moyen de production.

Comme indiqué dans le rapport de l'Académie des technologies sur la perception des risques publié en 2016 (1), la perception globale des risques par une population ne reflète pas une réalité « objective » ciblée sur certains effets mais elle intègre de nombreux éléments, liés à l'histoire de cette population, à la situation propre de chacun, à ses valeurs, à la façon dont elle est informée par les médias, en particulier sur l'image des accidents et de leurs impacts, les problèmes de pollution et d'environnement, les inégalités et la corruption, les questions de progrès et de développement durable, les menaces liées aux conflits armés et au terrorisme. La sensibilité pour le grand public est toujours plus importante quand il s'agit d'un événement brutal que pour un événement diffus et continu dans le temps. Par exemple, dans le domaine des transports, les crashes aériens frappent beaucoup plus les imaginations que les accidents routiers, alors que ces derniers sont à l'origine d'un nombre de morts et de blessés beaucoup plus important.

Chaque source d'énergie modifie l'environnement et a des conséquences différentes sur la santé humaine:

- Les risques liés à l'extraction du charbon, comme les coups de grisou ou la silicose, ne créent plus d'inquiétude particulière ; les mines françaises sont fermées depuis longtemps, et la catastrophe de Courrière est sortie des esprits. En revanche, l'incidence des centrales à charbon sur la pollution et l'incidence de la pollution sur la santé, les conséquences graves du réchauffement climatique auxquelles participent fortement les centrales à charbon et autres sources fossiles, et la répercussion de ces modifications profondes de l'environnement sur la santé humaine sont en perçues comme un réel enjeu pour le futur. Cela est d'autant plus vrai que les effets toxiques observés sont continus et cumulatifs. Les risques liés à l'énergie d'origine hydraulique, essentiellement les catastrophes liées à la rupture d'un barrage, n'entraînent pas d'inquiétude particulière pour ceux qui ne vivent pas en aval d'un barrage et, lorsqu'une catastrophe se produit, elle est vécue collectivement comme un phénomène ponctuel c'est-à-dire plutôt comme une catastrophe du type d'un tremblement de terre (catastrophe de Malpasset, qui n'était d'ailleurs pas un barrage hydroélectrique) ;
- Les risques liés à l'énergie nucléaire, libération de radioactivité en cas d'accident et problèmes liés au traitement des déchets radioactifs, sont vécus très différemment car les accidents sont très rares mais spectaculaires, et le danger très difficile à cerner. Un nuage radioactif est vécu comme une agression d'autant plus inquiétante qu'elle est sournoise et difficile à objectiver, avec des effets potentiels nocifs pouvant continuer à se manifester longtemps après l'accident.

Quant aux énergies renouvelables, l'évaluation de leur incidence sur l'environnement ne fait que commencer, et seules les populations proches y sont apparemment sensibles.

Les débats sur les avantages et les inconvénients de chaque source de production d'électricité sont très vifs, le plus souvent passionnels, alimentés par des lobbys favorables ou défavorables à chaque source d'énergie ; ces lobbys diffusent parfois des informations partielles, voire partiales, de nature à alimenter les craintes des citoyens, par ailleurs légitimes, et à influencer sur les choix politiques. Il a donc paru important à l'Académie des Technologies de mettre à la disposition des citoyens des données objectives permettant à chacun de se faire une opinion basée sur les faits, par le recensement et la mesure des effets qui se sont révélés au long des 50 dernières années pour la production d'énergie, et tout spécialement d'électricité. La force d'une telle analyse tient à ce que les chiffres correspondent à une histoire réelle et vécue.

Méthodologie

Chaque source d'énergie électrique ayant des conséquences différentes sur la santé humaine, il est particulièrement difficile de les comparer. Il faut trouver un indicateur applicable à l'ensemble des sources. Celui qui nous paraît le plus pertinent est le nombre de morts immédiate ou différée par unité d'énergie produite (exprimée en Térawatt.heure, noté TWh). Ces morts peuvent être causées par des phénomènes très différents allant de l'accident minier à l'irradiation radioactive, mais une vie humaine perdue est toujours une vie humaine perdue de trop, et l'évaluation du risque en termes de mortalité paraît une donnée objective particulièrement concrète.

Il faut aussi souligner qu'il existe des risques sociaux-économiques induisant des impacts sur la santé, par exemple des suicides à la suite d'un déplacement de la population: pour exploiter des mines, pour construire un barrage et sa retenue d'eau, ou en cas de catastrophe nucléaire. Ces impacts ne sont pas pris en compte dans les études listées ci-après.

Nous nous sommes basés sur 4 rapports de référence, et d'une étude (voir en annexe les fondements du choix de ces rapports): Le rapport ExternE (2) de l'Union Européenne, le rapport de l'OCDE (3), le rapport de l'UNSCEAR (4) le rapport du CIRC (5), et l'étude de Hansen et Kharecha (6 et 7).

Résultats

Rapport ExternE

L'Union européenne a lancé en 1991 un projet, qui a duré plus de 15 ans, visant à estimer les coûts environnementaux externes (externalités) des différentes sources d'énergie (charbon & lignite, pétrole et gaz, nucléaire, éolien et hydraulique), dont les répercussions sur la santé. Publiés de 1990 à 2005, les rapports de ce projet comportent plus de 3500 pages.

ExternE est une approche quantifiée dans laquelle chaque source d'énergie est évaluée individuellement, et son empreinte écologique et sociale analysée. Cette approche est caractérisée par le « chemin d'impact » (impact pathway), dans lequel les émissions d'une source sont tracées avec leur dispersion dans l'environnement, et l'effet des polluants dispersés est évalué (Il faut noter que l'impact potentiel du réchauffement climatique résultant de l'émission de gaz à effets de serre sur la santé en Europe n'est pas compris dans ces études.)

De ces rapports, il ressort que, en tenant compte des connaissances des impacts liés à la pollution sur la période d'étude du projet ExternE, par unité d'énergie produite (TWh), le nombre de décès, moyenné, en Europe, par accident et par maladie est repris dans le tableau 1 ci-dessous.

Les chiffres cités dans le tableau 1 sont les chiffres médians cités dans l'étude, les plages d'incertitudes n'étant pas reprises ici. Les chiffres des accidents sont ceux constatés sur les années 1969-2000, et les autres chiffres sont estimés selon des périodes variables selon les différents types de pollution (effet des particules, effet de la radioactivité, etc.). Les maladies graves et non graves sont définies dans la référence 6. Dans les maladies non graves il y a les jours d'activité restreinte, les cas d'utilisation de bronchodilatateurs, la toux et les épisodes de toux chronique.

Tableau 1					
Effets de la production d'électricité par source primaire d'énergie (morts/TWh)					
	Morts par accidents		Effets dus à la pollution		
	dans le public	chez les professionnels	morts	maladie grave	maladie non grave
lignite	0,02	0,1	32,6	298	17676
charbon	0,02	0,1	24,5	225	13288
gaz	0,02	0,001	2,8	30	703
pétrole	0,03		18,4	161	9551
biomasse			4,63	43	2276
nucléaire	0,003	0,019	0,052	0,22	

Sur la base de ces chiffres moyennés, et en supposant qu'ils n'ont pas beaucoup varié au cours des 10 dernières années, on peut estimer le nombre de décès annuels dans les 28 pays de l'Union Européenne pour 2014. Durant cette année-là, la production totale de l'UE a été de 3.040 TWh (répartis pour 2310 TWh selon le tableau 2 ci-après, l'ensemble des autres énergies - hydraulique, éolien, solaire, géothermie - représentant 730 TWh).

	TWh	Morts par TWh	Morts
charbon	779	24,5	19087
gaz	461	2,8	1292
petrole	70	18,4	1285
biomasse	169	4,63	780
Nucléaire	831	0,074	61

Rapport OCDE

En 2010, L'OCDE a publié un rapport (3) comparant les effets du nucléaire à ceux des autres sources d'énergie. Dans son étude, l'OCDE publie le tableau des décès par accident et par source d'énergie entre 1969 et 2000.

Selon l'OCDE, lorsqu'on étudie les accidents et risques propres au secteur énergétique, il est primordial d'étudier des filières énergétiques complètes. En effet, s'agissant des combustibles fossiles, les accidents survenant dans les centrales sont très peu importants par rapport à ceux qui se produisent à d'autres étapes. Des analyses qui se contenteraient de porter sur les centrales sous-estimeraient grossièrement la situation réelle. En général, on inclut dans une filière énergétique les phases de prospection, d'extraction, de transport du combustible, d'entreposage, de production de chaleur et/ou d'électricité, de transport haute tension, de distribution locale, de traitement et de stockage des déchets, même si toutes les filières énergétiques ne comprennent pas l'intégralité de ces étapes. Les accidents graves sont parmi les aspects les plus préoccupants tant pour le public que lors de la définition des politiques énergétiques. C'est pourquoi, ils monopolisent l'attention, quand bien même la somme des accidents mineurs ayant des conséquences bien moindres est plus importante. Il y a diverses manières de définir ce qu'est un accident « grave » ; le rapport OCDE a choisi de les définir comme étant ceux qui provoquent cinq décès immédiats au minimum. Ce seuil permet également de recueillir des ensembles de données plus fiables puisque les accidents de moindre importance attirent moins l'attention et peuvent quelquefois échapper aux statistiques.

A partir de cette étude, on peut dresser le tableau du nombre d'accidents et du nombre de décès de 1969 à 2000 comme indiqué dans le tableau 3 ci-après.

Il est à noter que l'étude OCDE traite des décès par accident et non de décès par maladies chroniques. Il s'agit de décès réels et non d'estimations; tous les accidents connus ont été répertoriés et les décès dus à ces accidents dénombrés. A noter que les chiffres très importants cités pour l'hydraulique résultent essentiellement de l'accident de la centrale chinoise de Shimantan, Banquiao, survenu en 1975.

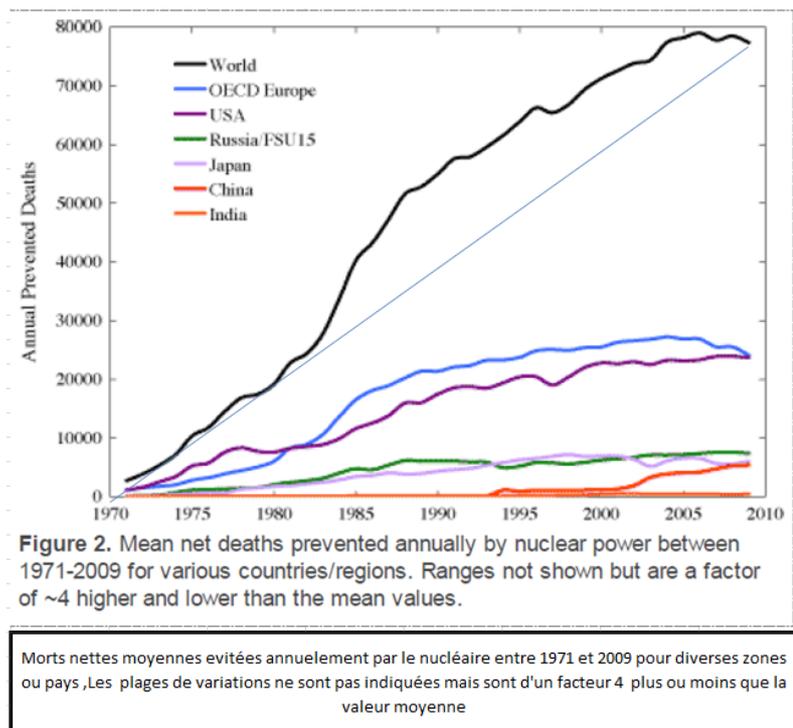
	OCDE		non OCDE		MONDE	
	accidents	morts	accidents	morts	accidents	morts
charbon	75	2259	1044	18017	1119	20276
charbon chinois			819	11334		
charbon sans la chine			102	4831		
pétrole	165	3713	232	16505	397	20218
gaz naturel	90	1043	45	1000	135	2043
GPL	59	1905	46	2016	105	3921
Hydraulique	1	14	10	29924	11	29938
nucléaire	0	0	1	31	1	31

Etude Hansen et Kharecha

Au-delà des accidents liés aux différentes sources et décrits précédemment, on peut aussi évaluer le nombre des morts évités par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils sont étudiés dans l'étude ci-dessous pour la période 1970 – 2010 et concernent donc l'impact des centrales en service.

En 2013, Hansen et Kharecha ont publiés une étude « Prevented Mortality and Greenhouse Gas Emissions from Historical and Projected Nuclear Power » (mortalité et émission de gaz à effet de serre évités historiquement et dans le futur grâce au nucléaire) (7) puis une suite « Coal and gas are far more harmful than nuclear power » (le charbon et le gaz sont beaucoup plus dangereux que le nucléaire) (8).

De ces études on peut extraire les données regroupées dans la figure ci-dessous, qui montrent que dans les pays européens de l'OCDE le nucléaire a évité 400.000 décès sur la période 1971-2009, par rapport à une hypothèse où l'énergie électrique correspondante aurait été produite à partir de charbon. Le chiffre est similaire pour les Etats-Unis, et pour le monde entier ce chiffre serait d'environ 1.200.000 décès. Ces chiffres sont bien évidemment basés sur des modèles (voir note sur les évaluations médicales en annexe).



Prise en compte de la catastrophe de Tchernobyl

Etant donné l'inquiétude soulevée par les accidents de Tchernobyl et de Fukushima, et le fait que les deux premières études, étant donné leur dates, ne permettent pas de dénombrer les morts dus à ces deux catastrophes, il paraît important de présenter les données de santé publique disponibles aujourd'hui sur les conséquences de ces 2 accidents.

Pour le nucléaire, il faut noter que les 31 décès figurant dans le tableau 3 ci-dessus se réfèrent au seul accident connu à la date du rapport ayant entraîné des morts, celui de Tchernobyl. Il n'y est fait état que des 31 décès déclarés comme accidents du travail de la centrale au sens strict; ce chiffre ne comprend pas les décès par irradiation dans les équipes d'intervention (les « liquidateurs »), qui ne font pas partie du dénombrement « classique » russe.

Pour corriger cette insuffisance le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), organisme des Nations Unies, a estimé, dans un rapport de 2006 incluant les liquidateurs et la population (en appliquant la RLSS, voir en annexe la note sur l'impact des dangers des radiations):

- un nombre de 1650 décès dus possiblement aux radiations de Tchernobyl (intervalle d'incertitude entre 700 et 3700) pour la période 1986 – 2005 ;
- Sur 80 ans un nombre de 16.000 décès qui pourraient possiblement être attribués aux retombées radioactives de Tchernobyl, entre 1986 et 2065 ;
- 40 000 cas de cancers supplémentaires sur la même période 1986 – 2065.

Les chiffres présentés ci dessus donnent un ordre de grandeur du nombre possible de cancers liés aux rayonnements, jusqu'en 2065, avec leur fourchette d'incertitude. Ces chiffres de décès par cancer entraînés par l'accident de Tchernobyl (3700 sur 20 an, soit 185 par an) sont bien entendu catastrophiques, mais il faut noter qu'ils restent très inférieurs aux chiffres déduits du rapport ExterneE (tableau 2) pour les autres sources d'énergie.

Il faut aussi souligner que les chiffres du CIRC estimés ci-dessus font aujourd'hui débat car les dernières connaissances sur les effets biologiques des radiations conduisent certains à penser que ces chiffres sont très surestimés (voir en annexe les notes sur les évaluations médicales et les impacts du danger des radiations).

Prise en compte de la catastrophe de Fukushima

Le rapport de l'OCDE est de 2010. Il est donc antérieur à la catastrophe de Fukushima consécutive au séisme et au tsunami qui ont fait 22 000 morts et disparus. De façon à présenter les données à jour en 2017, il est donc nécessaire de faire appel à d'autres publications internationales. Le rapport de 2013 de l'UNSCEAR (Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants) établit que l'accident nucléaire de Fukushima de 2011 n'a fait aucun décès comme conséquence directe de la radioactivité (2 morts emportés par le raz de marée, une chute et un arrêt cardiaque).

Les 10 décès enregistrés postérieurement parmi les travailleurs de la centrale ne sont pas attribuables à une exposition aux rayonnements ionisants (10). Le bilan des études épidémiologiques conduites sur les habitants de la Préfecture de Fukushima conclut qu'il n'y a pas de différence significative entre l'incidence annuelle du cancer de la thyroïde chez les enfants observée dans la Préfecture de Fukushima et celles estimées sur la base d'un dépistage systématique dans des préfectures non touchées par les retombées de l'accident de Fukushima (11).

L'UNSCEAR estime que « pour la population touchée par l'accident, les taux de cancer devraient rester stables ». S'agissant des futures statistiques du cancer le Comité ne s'attend pas « à des changements importants qui pourraient être attribués à une exposition aux rayonnements dus à l'accident ».

Conclusion

- 1 S'il n'est pas question de chercher dans le passé une projection certaine de l'avenir, les études sur le passé sont utiles pour éclairer le présent et l'avenir.
- 2 Les trois études présentées font apparaître des constats convergents (ces études comparatives ne signifient bien sûr pas que les effets sur la santé, et en particulier les décès, soient acceptables, quels que soient leurs niveaux):
 - Les impacts de la pollution continue sont largement prépondérants par rapport aux accidents ponctuels ;
 - Les niveaux sont très différenciés dans un sens décroissant depuis le lignite, le charbon et le pétrole, avec une baisse d'un ordre de grandeur pour le gaz et la biomasse, puis le nucléaire.
 - L'énergie nucléaire a évité de nombreux décès par rapport à un scénario où la fourniture des centrales nucléaires aurait été assurée par un panel de sources fossiles ; on peut conjecturer que le développement des énergies renouvelables ira dans le même sens.
 - Les données ci-dessus montrent aussi que les effets de santé dans les pays hors OCDE sont malheureusement nettement supérieurs à ceux des pays de l'OCDE.
- 3 D'autres données sur l'accidentologie (une large bibliographie des sources mondiale de données des accidents se trouve dans l'étude suisse en référence 12) montrent aussi que les progrès accomplis depuis 30 ans en prévention d'accidents, en sûreté industrielle, et en santé publique ont été et sont encore considérables, dans tous les domaines énergétiques. Hormis les effets climatiques attribués aux émissions de CO₂ et leurs différentes répercussions, l'ensemble des problèmes de sûreté liés à la production énergétique ont bénéficié de progrès constants, et il existe une volonté d'accélérer encore les progrès pour la santé dans l'avenir.
- 4 Ce document ne prétend évidemment pas avoir totalement couvert le sujet. Il reste à compléter, en particulier sur l'impact des énergies renouvelables autres que l'hydraulique.
- 5 Rappelons aussi qu'étudier et comparer ces risques ne doit pas faire oublier les gains apportés par les premières grandes sources d'énergie, comme le charbon, qui ont permis en leur temps, par un large accès à l'énergie, sous forme de vapeur puis d'électricité, d'améliorer de façon considérable la qualité de vie, la santé et l'espérance de vie de nombreuses populations depuis plus d'un siècle.

Chaque source d'énergie électrique comporte donc ses propres risques. Il paraît important de les évaluer quantitativement et objectivement afin d'aider les autorités à soutenir tous les efforts de recherche et d'innovation qui permettront, pour chacune des sources d'énergie dont l'importance stratégique est très différente d'un pays à l'autre, mais dont les conséquences sur la santé sont mondiales, d'améliorer les performances et de diminuer les risques.

Références

1. [La perception des risques](#), étude publiée en 2016 par l'Académie, rédigée par Gérald Bronner et Etienne Klein
<http://www.academie-technologies.fr/blog/categories/rapports/posts/la-perception-des-risques>,
2. http://www.externe.info/externe_d7/?q=node/6
3. <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2010/nea6862-evaluation-risques.pdf>
4. http://www.unscear.org/docs/revV1407898_Factsheet_F_ENG.pdf
5. Estimates of the cancer burden in Europe from radioactive fallout from the Chernobyl accident, Elisabeth Cardis et al
<https://www.iarc.fr/fr/media-centre/pr/2006/pr168.html>

6. « Electricity generation and health » de Anil Markandya et Paul Wilkinson
https://www.researchgate.net/publication/5965940_Energy_and_health_2_Electricity_generation_and_health_The_Lancet
7. « Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power » Environ.Sci.Technol.
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es3051197>
9. « Coal and gas are far more harmful than nuclear power » <https://climate.nasa.gov/news/903/coal-and-gas-are-far-more-harmful-than-nuclear-power/>
10. Les conséquences sanitaires de l'accident de Fukushima http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-fukushima-2011/fukushima-2016/Documents/IRSN_Fukushima_sante-travailleurs_201603.pdf
11. Bilan des études épidémiologiques conduites sur les habitants de la Préfecture de Fukushima
http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-fukushima-2011/fukushima-2016/Documents/IRSN_Fukushima_sante-habitants_201603.pdf
12. Severe accidents in the Energy Sector, 1st Edition Swiss Federal Office of Energy, Hirschberg et al, 1998
https://www.google.fr/search?q=Hirschberg+et+al+%3A+Severe+accidents+in+the+Energy+Sector+1st+Edition+Swiss+Federal+Office+of+Energy+1998&rlz=1C1CHBD_frFR718FR718&oq=Hirschberg+et+al+%3A+Severe+accidents+in+the+Energy+Sector+1st+Edition+Swiss+Federal+Office
13. Publication 103 de La CIPR, Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique
<http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-IRSN/Documents/CIPR.103.pdf>
14. La relation dose-effet et l'estimation des effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants
http://www.academie-sciences.fr/archivage_site/activite/rapport/rapport070405.pdf

Note sur les fondements du choix des rapports utilisés

Les rapports utilisés ci-dessus sont des rapports qui, après une revue de l'état de la science sur la question traitée, agrègent les résultats de nombreuses études pour établir une expertise collective scientifique en utilisant les résultats de centaines d'études à travers le monde pour dégager un [consensus de la communauté scientifique](#).

En général, ces institutions publiques commandent « des rapports d'expertise », dont la définition est « l'opinion des experts consultés, sur la base des connaissances du moment ». Cela présente l'avantage qu'on peut s'appuyer sur un corpus de bonnes pratiques, partagées au sein des organismes de recherche dans le monde, qui sont pour l'essentiel les suivantes :

les experts sont choisis sur la base de leurs compétences reconnues (notamment par leurs pairs dans le monde scientifique) et adaptées à la question posée ;

les experts déclarent leurs conflits d'intérêt, et s'abstiennent quand ces conflits rendent impossible la rédaction d'un rapport crédible ;

les sources d'information sont identifiées et traçables ; cela renvoie pour l'essentiel à des publications scientifiques évaluées, et réduit donc le recours à la littérature « grise », et élimine les sources purement orales;

la méthodologie d'analyse doit pouvoir être décrite ;

le rapport sépare nettement les faits issus des sources des opinions et recommandations des experts ;

il existe un mécanisme de relecture critique ;

s'il existe plusieurs opinions divergentes parmi les experts consultés, ces divergences d'opinion sont explicitées;

le commanditaire de l'expertise est propriétaire du résultat, mais a pour pratique de le rendre public.

On peut actualiser ces rapports par des articles scientifiques postérieurs à ces rapports et issus d'organismes ou de revues soumises à comité de lecture. Enfin, il n'est pas inutile de rappeler que nombre d'études de risques sur la santé sont faites

indépendamment les unes des autres, et différemment les unes des autres tant du point de vue méthodologique que du point de vue des pays et périodes étudiés. Leur valeur est liée au respect des bonnes pratiques précédentes ; c'est le cas des études citées dans le présent document.

Note sur les évaluations médicales

Il faut aussi rappeler que les chiffres présentés dans le présent document ne sont pas tous produits directement par des statistiques, mais contiennent aussi des évaluations des effets, et donc des risques, par des modèles. On est en effet capable, relativement facilement, de faire des statistiques sur des accidents mortels par exemple, dans les pays où des registres de santé existent. Cela peut se faire dans les domaines courants (accidents miniers, accidents de centrales, explosions...). Par contre, dans le domaine des faibles quantités, les statistiques sont plus difficiles à manier, que ce soit dans le domaine des faibles doses de radioactivité ou dans celui des risques extrêmes exceptionnels, et il est nécessaire alors d'utiliser des modèles qui peuvent être sujets à débat. Dans le présent document, les incertitudes liées aux modèles sont prises en compte par des fourchettes, avec une valeur basse et une valeur haute.

Note sur l'impact des dangers des radiations

Les chiffres estimés par le CIRC font débat car ils tiennent compte d'un modèle appliquant la loi linéaire sans seuil qui, selon certains, surestime considérablement les risques liés aux radiations. Ceci a d'ailleurs conduit le CIPR, dans ses [Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique — Publication 103](#) (13), à déconseiller l'utilisation de modèles basés sur une relation linéaire et sans seuil (RLSS) pour apprécier les dangers des radiations. Les Académies françaises des sciences et de médecine avaient auparavant écrit dans un rapport de 2005 « qu'il n'est pas justifié d'utiliser une relation linéaire sans seuil (RLSS) pour estimer le risque cancérogène des faibles doses » (14).

ANNEXE 4

LA RADIOACTIVITÉ, SA NATURE, SES RISQUES, SES MESURES.

Son origine (Rappel): Dans la première seconde de l'univers, l'énergie gigantesque injectée au Big-Bang s'est condensée en particules les plus élémentaires de matière (quarks et antiquarks, puis leptons et antileptons), qui ont commencé à s'assembler vers 3 minutes d'âge en protons et neutrons, puis en noyaux légers par fusion nucléaire entre 3 et 30 minutes, 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, qui libère de l'énergie, allumant des étoiles qui brûlent l'hydrogène en hélium en maintenant leur température par l'énergie dégagée par la fusion nucléaire.

Les plus grosses d'entre ces 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. Mars, plus petit que la Terre, contenait moins d'éléments radioactifs et s'est refroidi plus vite,

Sur la Terre, la radioactivité a facilité l'éclosion de la vie, sans elle la température moyenne serait plus basse d'une dizaine de degrés.

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 et de la Terre (carbone 14, tritium...etc)³⁹. 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 (millisievert) variable suivant les régions. Elle atteint 100 mSv/an dans certaines parties du monde, au Kérala (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.

Ses effets : Ces corps radioactifs émettent au cours de leurs désintégrations des rayonnements qui sont soit des ondes électromagnétiques, soit des particules. Il sont dits ionisants, parce que leur énergie est suffisante pour rompre les liaisons chimiques entre noyaux et électrons, transformant les atomes en ions, pour créer des "radicaux libres" de forte réactivité chimique (par exemple OH).

Trois types de rayonnement ionisant peuvent être émis par désintégration : alpha, beta et gamma.

Le rayonnement α est une émission de noyaux d'hélium (2 protons+2 neutrons), il est peu pénétrant, quelques centimètres d'air, ou la surface de la peau, l'arrêtent. Il n'est dangereux que par inhalation ou ingestion des radionucléides qui l'émettent, par exemple dans les poumons par respiration de radon.

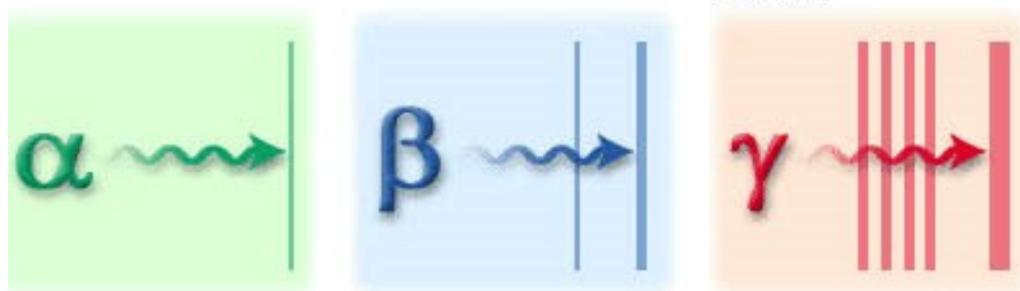
Le rayonnement β est une émission d'électrons; il est plus pénétrant que le rayonnement α , avec un parcours dans l'air de quelques mètres, il peut traverser les couches superficielles de la peau.

Le rayonnement γ est une émission de photons très énergétiques, il est très pénétrant, de fortes épaisseurs de béton ou de plomb sont nécessaires pour l'arrêter.

Les rayons peu pénétrants sont les rayons alpha.
Ils résultent de l'émission d'un noyau d'hélium, de charge positive (2 protons et 2 neutrons). Leur portée dans l'air est de 2,5 cm à 8,5 cm. Une feuille de papier ou la couche externe de la peau les arrêtent.

Les rayons bêta sont plus pénétrants. Ils résultent de l'émission d'un électron. Leur portée dans l'air est de quelques mètres. Ils peuvent traverser la couche superficielle de la peau. Une feuille d'aluminium ou une vitre les arrêtent.

Les rayons très pénétrants sont les rayons gamma. Ils résultent de l'émission d'un photon par le noyau. Ils sont de nature électromagnétique, comme la lumière ou les rayons X. Ils voyagent à la vitesse de la lumière. De fortes épaisseurs de matériaux compacts (béton, plomb...) sont nécessaires pour les arrêter.



Les 3 types de rayonnements radioactifs

Ces radiations ionisantes ont des effets sur les cellules du vivant, dépendant de la dose reçue et de sa vitesse d'acquisition. La radioactivité est d'autant plus importante que la période est courte. Ainsi l'iode 129 de période 16

³⁹ Et même, à l'état de traces, du plutonium.

millions d'années, ingéré par l'homme, a un effet 800 millions de fois moins important, à concentration égale, que celui de l'iode 131 (période 8 jours)). C'est donc un peu un abus de langage de parler de déchets de haute activité à vie longue, car les déchets à vie longue⁴⁰ sont ceux qui présentent le moins d'activité; on peut dire pour imager les phénomènes que les radionucléides de courte période tirent à la mitrailleuse, alors que ceux à période longue tirent seulement au fusil.

Ces effets se manifestent par une altération de l'ADN des cellules entraînant des ruptures de brins, mais elle est très faible. Ce phénomène est maintenant bien connu car les ruptures de brins d'ADN sont extrêmement fréquentes par l'attaque de divers toxiques, dont le principal est l'oxygène de l'air et ses radicaux libres : la respiration occasionne jusqu'à 10.000 altérations d'ADN par jour dans chaque cellule, le maintien de la température corporelle à 37°C par le métabolisme crée 20.000 à 40.000 cassures d'ADN par cellule et par jour. Une irradiation de moins de 40 mSv/an génère environ 2 cassures par cellule et par an.

Tant que l'on reste dans le domaine dit des faibles doses (inférieures à 50/100/200 mSv/an), aucune étude n'a jamais mis en évidence un effet néfaste de ces faibles doses de radioactivité, qu'elle soit naturelle ou artificielle. Cela est probablement dû aux mécanismes spontanés de réparation des brins d'ADN maintenant connus, ainsi qu'aux mécanismes naturels de suicide des cellules trop atteintes (apoptose) qui interdisent la reproduction des cellules anormales. Une forte dose de l'ordre de 10 000 mSv reçue en un temps court est rapidement létale. Au-delà de 100 mSv à la thyroïde dus à l'absorption d'iode radioactif, des cancers de la thyroïde peuvent apparaître chez l'enfant⁴¹.

La radioactivité émise par une centrale nucléaire en service

La radioactivité émise vers l'extérieur par un réacteur nucléaire en fonctionnement normal est **de l'ordre du millième de la radioactivité naturelle**, et de l'ordre du dixième de celle d'une centrale à charbon de même puissance (la combustion du charbon libère en effet dans les cendres et les fumées les éléments radioactifs naturels qu'il contient : l'uranium et ses descendants, le thorium et ses descendants, et le potassium 40).

LES UNITES

Les unités d'émission de radioactivité

La radioactivité d'un corps se mesure en **Becquerel (Bq)** ; 1 Bq correspond à une désintégration par seconde. Cette unité est vraiment petite quand on songe qu'un homme présente une radioactivité d'environ 8000 Bq, un m³ de granite de ~4 millions de Bq, une source radioactive médicale de 100 000 milliards Bq, et 1 kg de déchets nucléaires de haute activité (vieux de 50 ans), vitrifiés 10 000 milliards Bq.

Dans le passé, on utilisait le Curie (Ci) : 1 Ci correspond à la radioactivité d'un gramme de radium soit 37 milliards de désintégrations par seconde. le curie est alors une unité énorme et on utilisait généralement le micro-curie (1microCi = 3.7 x 10⁴ Bq).

Les unités de réception de radioactivité

Utilisées pour l'analyse des effets pathologiques des radiations et la radioprotection, elles mesurent les doses absorbées, les doses équivalentes et les doses efficaces.

La Dose absorbée se mesure en Gray (Gy). Un Gy = 1 joule absorbé par kg de matière.

La dose absorbée ne dépend pas du type de radioactivité (alpha, beta, gamma). On utilisait avant le Röntgen (1 R= 2.58 x 10⁻⁴ C/kg) et plus récemment le Rad (abréviation de "radiation absorbed dose", 1 rad=10⁻² Gy)

La dose équivalente prend en compte l'effet différencié des types de radioactivité sur les tissus vivants ; *par exemple, 1 gray de radiation alpha aura plus d'effets qu'un gray de radiation beta*. La dose équivalente **se mesure en Sievert (Sv)** ; c'est en fait la dose absorbée multipliée par un facteur de pondération du rayonnement. Un sievert représente une dose très élevée et on parle généralement de milli-sievert (1 mSv=10⁻³ Sv).

On utilisait avant le Rem (abréviation de "röntgen equivalent man", 1 rem = 10⁻² Sv)

Le Dari? C'est une unité proposée par Georges Charpac, qui est la radioactivité du corps humain, soit 1 Dari = 0,2 mSv/an. *Pour mémoire, non utilisée.*

Quels risques pour quelles doses ?

Les effets sur l'organisme dépendent bien sûr de la dose reçue mais aussi de la durée pendant laquelle cette dose a été reçue.

- 10 Sv en une fois (quelques heures) : mort en quelques semaines.
- Entre 2 et 10 Sv en une fois : dommages sérieux mais non définitifs jusqu'à 4 Sv. Au delà, ils deviennent irréversibles et risques de mortalité augmentent avec dose.
- 1 Sv en une fois : peut entraîner (temporairement) des nausées, une baisse des globules blancs et des leucocytes mais pas la mort. Tout redevient normal en peu de temps.
- Un sievert accumulé sur un temps plus long entraîne une augmentation du risque de développer un cancer mortel d'environ 5% plusieurs années plus tard.
- 50 mSv/an est la plus petite dose (de façon conservative) à partir de laquelle on ne peut prouver l'apparition de cancers (cette dose est aussi la radioactivité naturelle de plusieurs lieux sur Terre). Au delà de cette valeur, le nombre de cancers (mais pas de leur gravité) augmente avec la dose.
- 20 mSv/an moyenné sur 5 ans : c'est la limite légale que peuvent recevoir les travailleurs du nucléaire.
- 2-10 mSv/an : radioactivité naturelle moyenne (peu être beaucoup plus élevé).

⁴⁰ On devrait dire : déchets à haute activité ou à vie longue

⁴¹ A. Aurengo – « De Tchernobyl à Fukushima, les risques de la radioactivité » -Science & pseudo-sciences n° 298 (octobre – novembre 2011)

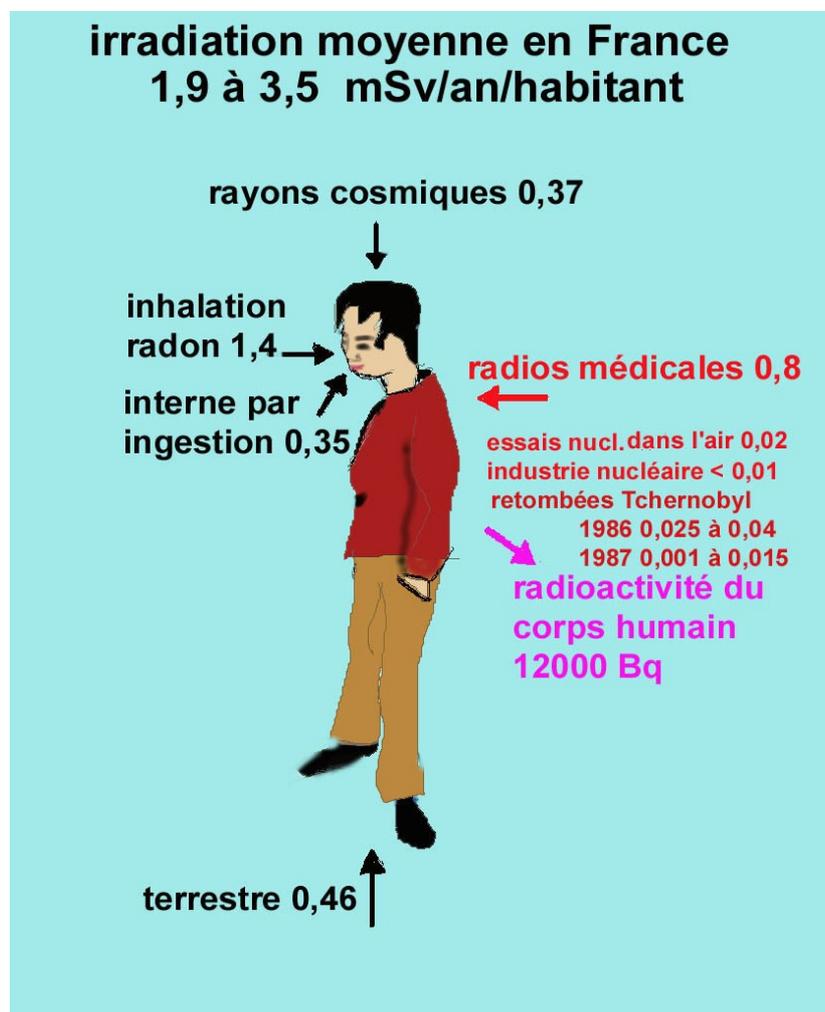
- 1 mSv/an : c'est la limite légale que peut recevoir le public (au dessus de la radioactivité naturelle).

Pour les faibles doses, les effets biologiques ne peuvent être mesurés. Pour les besoins de la radioprotection, la CIPR (Commission Internationale de Protection Radiologique) suppose une loi linéaire par rapport à la dose (le risque croît linéairement avec la dose ; la pente de cette droite est déterminée là où les effets sont mesurables, i.e., aux fortes doses). Notons cependant que ce principe de linéarité est remis en cause par un certain nombre de spécialistes.

Un modèle mixte linéaire-quadratique donne un risque plus faible aux petites doses (partie quadratique) et s'identifie au modèle linéaire pour les doses plus élevées. Ce modèle semble être un des plus réalistes.

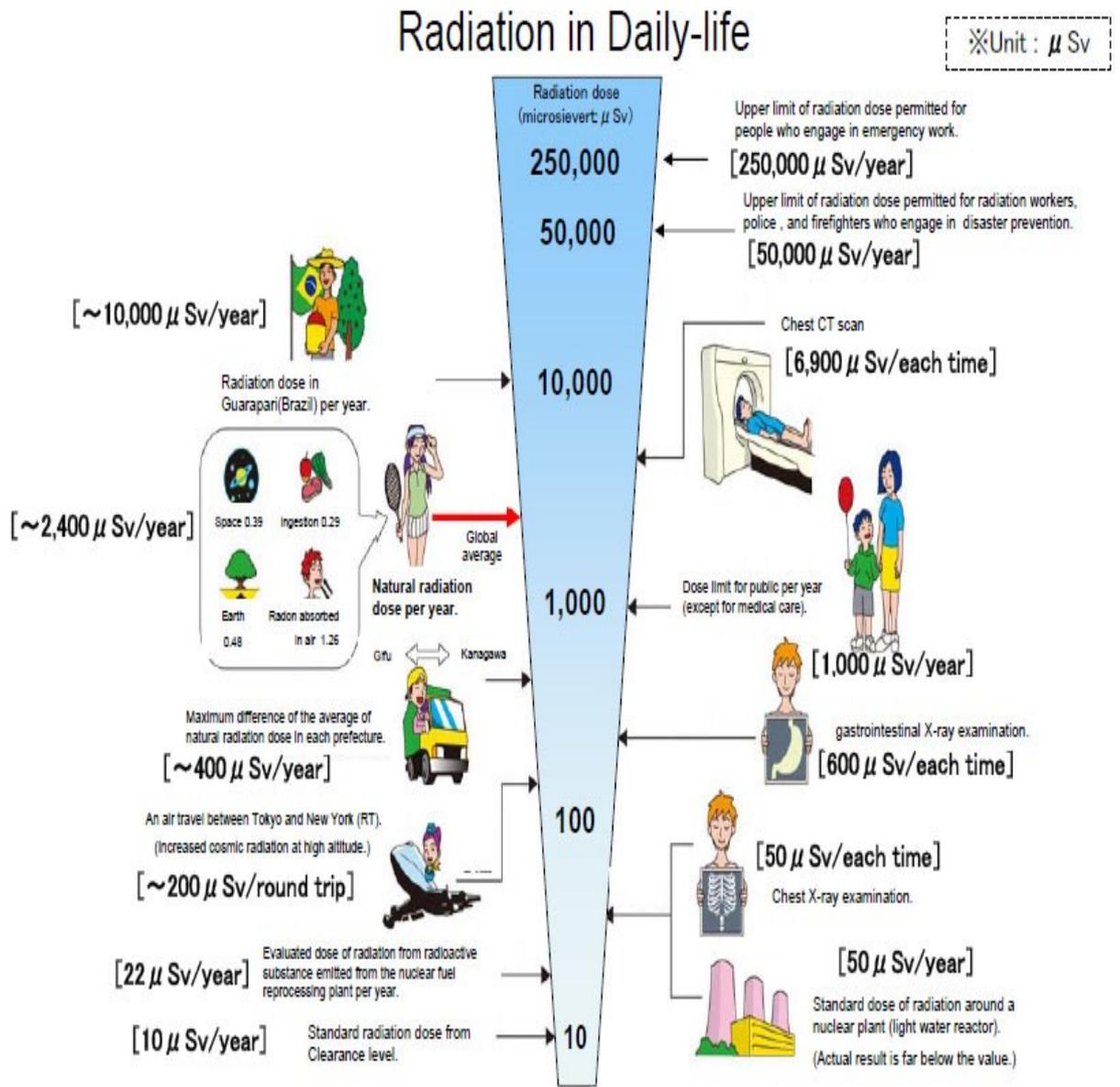
Certains spécialistes pensent que les faibles doses peuvent être bénéfiques pour la santé c'est l'effet Hormesis, elles pourraient "protéger" contre les cancers.

Origine de l'irradiation moyenne en France



UN INDICATEUR DE RISQUE

(Largement diffusé au Japon après l'accident de Fukushima)



(Ref) Average dose rate at the monitoring post of Tokyo (3/17 9:00~3/18 9:00, March) : $0.050 \mu\text{Sv/h} = 438 \mu\text{Sv/y}$

ANNEXE 5

LES DÉCHETS RADIOACTIFS, LEUR GESTION

La production d'électricité nucléaire 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 successifs de neutrons sur l'uranium 238 en cours de réaction (92 protons +146 neutrons = 238 nucléons) le transmutent en plutonium 239 (92 protons + 147 neutrons), puis 240 (92 protons + 148 neutrons), isotope du plutonium dit "civil", car il est inapte à une utilisation militaire⁴². 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.

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 jusqu'à la décennie 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 la mode et le lieu de stockage en France.

Le volume des déchets:

La production de 1 GW pendant 1 an laisse en déchets :

- Pour une centrale à charbon : 350.000 m³ de cendres, 6000 t. de poussières, 8 millions de t. de CO₂
- Pour une centrale nucléaire : 120 m³ de déchets de faible activité à vie courte, 5 m³ de déchets de faible ou moyenne activité à vie longue, 2,5 m³ de déchets de moyenne et haute activité vitrifiés si on traite (ou 40 m³ sans retraitement).

La gestion des déchets semble a priori simplifiée par leur faible volume, mais **malgré leur faible volume, la gestion des déchets est compliquée par le dégagement de chaleur** associé à la radioactivité de leurs produits de fission et de quelques actinides mineurs à vie courte et moyenne .

La nature des déchets: Les principaux radionucléides contenus dans les déchets sont

- Les produits de fission, dont le nombre de masse $A = Z$ (nombre de protons) + N (nombre de neutrons) est de l'ordre de la centaine puisqu'ils sont le résultat de la fission des noyaux lourds de l'ordre de $A > 200$; la plus grande partie de leur radioactivité, déjà très affaiblie au sortir des piscines de stockage, a pratiquement disparu au bout de 2 à 3 siècles ; seuls subsistent quelques radionucléides à vie très longue (I129 et Cs135 sont les plus notables)
- Les actinides dits mineurs, produits par captures successives de neutrons dans l'uranium et le plutonium (donc de A supérieur à 200): les principaux sont le neptunium, le plutonium, l'américium et le curium ; diverses réactions nucléaires transforment certains de ces radionucléides (exemple $\text{Pu241} > \text{Am241} > \text{Np 237}$).

⁴² 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.

Le plutonium tient un rôle à part ; produit à partir de U238, il est fissile et permet de valoriser U238 : il est donc considéré parfois comme un déchet, parfois comme une ressource

LA GESTION DES DÉCHETS REPOSE SUR PLUSIEURS PRINCIPES:

Un premier principe : le confinement des radionucléides

L'objectif ultime de la gestion des déchets radioactifs est d'empêcher la radioactivité de remonter jusqu'à l'homme en quantités entraînant des effets sur la santé (si l'on s'en tient aux normes actuelles, ceci signifie une dose à l'individu inférieure à 1 mSv/an).

Cet objectif de confinement conduit à un large consensus. Les rares exceptions concernent quelques radionucléides très peu radioactifs et qui peuvent se diluer dans la biosphère sans possibilité de reconcentration (I129, Kr85...).

Ce confinement est assuré par des barrières successives ; dans le cas des déchets à vie longue enfouis, par exemple :

- Une matrice robuste (oxyde d'uranium en absence de retraitement, verres dans le cas du retraitement)
- Un conteneur résistant à la corrosion
- Une barrière ouvragée destinée à la fois à limiter l'arrivée d'eau et à retenir les éventuelles fuites de radionucléides
- Une couche géologique destinée à maintenir les déchets à l'abri d'événements extérieurs (glaciation, guerres) et à retenir les fuites de radionucléides

Un deuxième principe : le tri

Les déchets radioactifs sont caractérisés par leurs volumes, leurs périodes et leurs activités (leur dégagement de chaleur étant une conséquence des trois). Il y a un large consensus sur l'intérêt de les trier et de réserver des sorts spécifiques à chaque composante de ce tri.

Le premier niveau de tri, largement consensuel, sépare :

- Les déchets à vie courte de faible et très faible activité (FA et TFA – plusieurs millions m³ pour le parc nucléaire français, déchets de démantèlement des centrales inclus), stockés en surface (site de l'Aube), la radioactivité ayant totalement disparu au bout de 3 siècles.
- Les déchets de faible activité, mais comportant des émetteurs alpha ou beta⁴³ à vie longue (déchets B (de l'ordre 100.000 m³) ; ces déchets ne dégagent pas de chaleur.
- Les déchets de forte radioactivité initiale (donc dégageant de la chaleur) et comportant des radionucléides à vie longue (déchets C – de l'ordre de 10.000m³).

Le deuxième niveau de tri n'est mis en œuvre que dans certains pays, dont la France. Il consiste à séparer le plutonium et l'uranium des autres radionucléides dans une opération dite de **retraitement** du combustible. Cette opération modifie à la fois les ressources en matières fissiles, la nature et les quantités des radionucléides présents dans les déchets (et notamment le dégagement de chaleur). On y reviendra plus loin.

Un troisième niveau de tri a fait l'objet d'un certain nombre d'études : il consisterait à extraire un ou plusieurs des actinides mineurs (neptunium, américium, curium) en vue soit de leur assurer un confinement spécifique, soit de les transmuter en éléments à vie plus courte.

Les conséquences du dégagement de chaleur

Le dégagement de chaleur en début de vie des déchets C est très important et nécessite des dispositions appropriées de refroidissement : les combustibles usés sont entreposés pendant plusieurs années dans des piscines refroidies (d'abord à côté des réacteurs, puis à l'usine de retraitement de La Hague). Les verres issus du retraitement, tout comme les combustibles usés non retraités, sont entreposés pendant plusieurs décennies avant d'être placés dans un stockage définitif ; au bout d'un temps plus ou moins long, leur refroidissement peut être assuré par des systèmes simples de convection naturelle.

Lorsque l'on veut placer les déchets C dans un stockage profond, il est généralement admis qu'il faut remplir deux conditions :

- Ne pas dépasser 100 °C sur la paroi externe du conteneur, afin d'éviter tout risque d'ébullition de l'eau si celle-ci trouvait son chemin jusque là : cette condition fixe la quantité de radionucléides que l'on peut mettre par conteneur, en fonction de leurs natures et de leurs dégagements de chaleur.
- Ne pas dépasser un flux de chaleur par unité de surface du stockage (environ 10 kW/ha) compatible avec la bonne tenue du terrain dans le temps. Pour un terrain donné, cette condition fixe la superficie du stockage, qui sera d'autant plus faible que l'on aura réduit les sources de chaleur (soit en allongeant la durée d'entreposage, soit en poussant le tri encore plus loin et en transmutant certains radionucléides). Il en résulte que, malgré le faible volume

⁴³ Le chlore 36 et le carbone 14 sont les principaux émetteurs présents dans le graphite des UNGG

des déchets C (10000 m³), le volume à excaver pour leur stockage serait compris entre 5 et 25 millions m³ pour une emprise de stockage de l'ordre de 1000 ha. Soit 10 fois plus que pour les déchets B pourtant 10 fois plus volumineux.

LE DÉBAT SUR LE RETRAITEMENT DES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Les pays qui ont choisi de ne pas retraiter le combustible usé (notamment les Etats-Unis), et de l'enfouir en totalité ont été guidés par le souci de limiter au maximum les risques de prolifération de matières nucléaires qui pourraient permettre d'alimenter des filières militaires ou terroristes. Cet argument s'est un peu affaibli au cours des années, et on peut parler sans passion des deux voies de séquestration des déchets (avec ou sans retraitement).

Le système nucléaire français a été créé avec une volonté d'indépendance énergétique dans un contexte de pénurie d'énergies fossiles. Il a été conçu avec une contrainte forte : la disponibilité et l'économie de matières premières fissiles. Le retraitement du combustible usé a été conçu pour extraire le plutonium qui peut être utilisé comme combustible dans les réacteurs à neutrons rapides. Le retraitement du combustible usé permet d'en extraire 99,8% du plutonium et de l'uranium. Après l'abandon de Superphénix, le plutonium, est maintenant utilisé dans le combustible MOX, réduisant le volume des combustibles déchargés des réacteurs et entreposés. Le choix du retraitement conduit à ne pas enfouir le plutonium. En contrepartie, il faut gérer ce plutonium, ce qui serait une affaire compliquée s'il n'est pas utilisé dans de nouveaux systèmes nucléaires (RNR, HTR ...).

Avantages et inconvénients du retraitement

Le retraitement permet :

- De récupérer l'uranium²³⁵ restant et le plutonium produit dans le combustible usé, en vue de les recycler. Ceci augmente les ressources en matière fissile, de 20 % environ (10 % pour l'uranium +10 % pour le plutonium) si on les recycle une seule fois dans les REP, de 40 % (10 + 30) si on faisait du multi recyclage dans les REP, mais de 50 fois si on les recyclait dans des RNR.
- De sortir le plutonium des déchets, ce qui réduit le dégagement de chaleur et l'inventaire de produits radioactifs α stockés.

Il a comme inconvénients :

- D'augmenter les quantités de déchets B en y ajoutant ceux en provenance de l'usine de retraitement.
- D'augmenter, dans le combustible recyclé usé, les quantités d'américium (période 432 ans) et de curium (période 18 ans) ; ces radionucléides, qui ont une vie plus courte que le plutonium, augmentent les sources de chaleur dans les déchets qui leur sont associés (combustible usé non retraité ou verres issus du retraitement) ; la présence de curium tend à augmenter les durées d'entreposage avant stockage, et celle d'américium compense partiellement la diminution des sources de chaleur liée à l'enlèvement du plutonium. Il faut noter que la production nette de d'américium et de curium est plus faible dans des réacteurs à neutrons rapides, car une partie de l'américium produit y est détruit par fission.

LE DÉBAT SUR LA TRANSMUTATION

Ce troisième niveau de tri n'est qu'hypothétique et fait l'objet d'études sur son intérêt :

Avantages et inconvénients de la transmutation des actinides mineurs

Les avantages et inconvénients doivent être regardés radionucléide par radionucléide :

- Pour le neptunium, l'extraction est relativement facile, mais l'intérêt est très limité ; en effet, le neptunium a une période très longue (2 millions d'années) et est donc très faiblement radioactif ; il est peu soluble et peu mobile, ce qui réduit d'autant les possibilités de le voir atteindre la biosphère et l'homme. Tous les modèles de calcul donnent des effets potentiels sur l'homme très largement inférieurs à 1 mSv par an.
- Pour l'américium, l'extraction est plus difficile mais sa faisabilité a été prouvée ; la transmutation a fait l'objet d'expériences dans le réacteur à neutrons rapides PHENIX ; l'intérêt serait de réduire la source de chaleur dominante dans les verres après la décroissance des produits de fission, et donc de limiter l'emprise du stockage ; cet intérêt est en partie compensé par l'inconvénient que, parallèlement, on augmente les quantités de curium, ce qui conduirait à allonger la durée de l'entreposage des verres.
- Pour le curium, les opérations de transmutation sont très complexes du fait de la forte radioactivité de ce corps ; et l'intérêt est réduit car sa période est courté (15 ans) et il suffit d'attendre qu'il ait suffisamment décréu.

En résumé, seule la transmutation de l'américium pourrait présenter un intérêt, et cela uniquement si la transmutation était réalisée dans un réacteur à neutrons rapides. Une telle voie s'inscrit normalement dans un scénario de développement des RNR, donc d'extension importante de la place du nucléaire dans le "mix" énergétique.

LA GESTION PROCHE DES DÉCHETS EN FRANCE

Chaque année, 1000 à 1100 tonnes de combustible usés sont déchargés des 58 réacteurs français. S'y trouvent mélangés avec l'uranium 238 et l'uranium 235 appauvri (et d'autres isotopes), environ 10 tonnes de plutonium, une tonne d'actinides mineurs et 50 tonnes de produits de fission.

Ce combustible usé après 4 ans de séjour dans le réacteur est entreposé en piscine où il perd une grande partie de sa radioactivité en 6 à 8 ans. Une partie (850 tonnes) est ensuite retraitée pour séparer les matières recyclables (uranium et plutonium). Le plutonium récupéré est utilisé pour faire du MOX qui est envoyé aux centrales (utilisable dans 28 des réacteurs français mais seuls 20 sont Moxés), ce qui réduit de 25% la quantité de plutonium produite et de 12% les besoins en isotope 235 de l'uranium. Par contre, le recyclage du plutonium produit davantage d'actinides mineurs : américium et curium, et cela complique la gestion ultérieure des MOX usés.

Les déchets ultimes (produits de fission PF et actinides mineurs) sont conditionnés sous forme vitrifiée et, entreposés à la Hague en attente de leur orientation finale (prolongation de l'entreposage en entreposage réversible de longue durée ou stockage géologique). L'uranium appauvri, l'uranium de retraitement, l'UOX et le MOX usés sont entreposés en attente également de décisions concernant leur gestion. Ils constituent une réserve de matière fissile et fertile en cas de relance de la filière RNR.

LA GESTION À LONGUE DURÉE, AVEC DES PROBLÈMES SPÉCIFIQUES POUR CHAQUE PÉRIODE DE GESTION

L'ensemble des éléments ci-dessus conduit à considérer 3 ou 4 périodes selon les cas :

Une **première période de quelques décennies**, laquelle la radioactivité et le dégagement de chaleur sont dominés par les produits de fission. Le refroidissement des déchets est nécessaire. Il est assuré par l'entreposage (en piscine s'il s'agit de combustibles usés, en silos refroidis s'il s'agit de verres). On dispose aujourd'hui d'une large expérience industrielle.

Une **deuxième période éventuelle**, lorsque les quantités de curium et de plutonium sont importantes (cas du combustible usé MOX non retraité ou des verres provenant du retraitement de combustibles très irradiés), **pouvant dépasser un siècle**, pendant laquelle on prolonge l'entreposage avec deux objectifs : attendre que le dégagement de chaleur ait suffisamment diminué pour permettre le stockage et réserver la possibilité de récupérer le plutonium pour l'utiliser dans des RNR. Cet entreposage de longue durée ne soulève pas de problème technique nouveau, mais la pérennité de l'entreposage doit être assurée.

Une **troisième période (quelques dizaines de milliers d'années)** où les déchets sont placés dans le stockage définitif, dont le dimensionnement est défini par les critères évoqués plus haut : les laboratoires souterrains et les travaux de qualification d'un site ont pour objet de fournir les éléments chiffrés de ce dimensionnement et les données nécessaires au dossier de sûreté. La radioactivité est essentiellement celle des actinides mineurs (et du plutonium s'il est incorporé en cas de non retraitement). Le confinement rapproché est assuré par les conteneurs ; la barrière géologique n'intervient qu'en cas de leur défaillance.

Une **quatrième période, au delà de quelques dizaines de milliers d'années**, où seuls subsistent les radionucléides à vie très longue et, de ce fait, faiblement radioactifs. Les doses pour l'homme liés à des remontées éventuelles de radionucléides sont largement inférieures à la radioactivité naturelle pour les émetteurs α (neptunium) et pourraient s'en approcher pour I129 si ce dernier n'était pas rejeté lors du retraitement (*parmi les AM, il reste essentiellement le **237Np** très peu mobile dans les conditions de stockage. On fait alors l'hypothèse que le confinement par conteneur peut être perdu, la barrière géologique assurant alors l'essentiel de la protection. En ce qui concerne les produits de fission à vie longue, au delà de 100.000 ans, il ne subsiste que 5 PF importants : technétium 99, palladium 107, étain 126, iode 129 et césium 135. Les seuls PF réellement solubles dans l'eau sont le césium et l'iode, le seul vraiment mobile est l'iode (le césium est fixé par sorption dans le sous-sol) . En prenant l'hypothèse la plus pessimiste (scénario altéré) d'un puits ouvert sur un site d'enfouissement contenant la totalité des déchets de 50 ans d'exploitation d'un parc de 400 TWhe/an, la dose reçue par la consommation exclusive de cette eau serait du même ordre de grandeur que celle délivrée par la radioactivité naturelle moyenne en France (2,4 mS/an). De plus, on saurait réduire cette dose si on le souhaitait (en ajoutant de l'iode naturel dans les verres, en conditionnant l'iode des combustibles usés en céramiques...). Les modélisations associées aux différents scénarios montrent que les doses délivrées sur l'homme dans les hypothèses les plus pessimistes en y ajoutant ceux se chiffreraient en fractions de celles dues à la radioactivité naturelle).*

LES SCENARIOS DU NUCLEAIRE ET LEURS CONSEQUENCES SUR LA GESTION DES DECHETS

On peut en simplifiant envisager deux scénarios extrêmes pour l'avenir du nucléaire et examiner quelles seraient leurs conséquences sur la gestion des déchets (et sur les autres critères de jugement):

- **arrêt du nucléaire**
- **relance forte**

Scénario n° 1 : arrêt du nucléaire

- **Ce scénario détruit l'espoir d'une réduction des quantités de plutonium et des déchets nucléaires existants au moment de l'arrêt (espoirs portés par le développement de la génération IV des réacteurs rapides). Le plutonium devient un déchet dont il devient coûteux de se débarrasser.**
- L'arrêt du nucléaire entraînerait un accroissement de la demande sur les combustibles fossiles⁴⁴, surtout sur le gaz naturel, accélérant l'épuisement de ceux-ci et une hausse de leur prix et du prix de l'électricité.

⁴⁴ Et bien entendu d'énergies renouvelables, mais l'intermittence des deux principales -vent et soleil – nécessite, sauf innovation révolutionnaire dans le stockage de l'énergie électrique; de les accompagner d'une forte réserve d'énergie thermique..

- Ce scénario ne participe pas à la réduction des rejets de CO₂, et au contraire les accroît.

Scénario n° 2 : relance du nucléaire

- Une relance forte entraînerait vers le milieu du siècle un choix de systèmes nucléaires optimisant la production d'énergie, la gestion des ressources et celle des déchets (*génération IV*) et ouvrirait de nouveaux débouchés.
- Permettrait une limitation du coût de l'électricité
- Permettrait une forte réduction des rejets de CO₂

EN RÉSUMÉ :

La gestion des déchets repose donc sur l'étude de divers et nombreux scénarios.

On a vu que les solutions mises en œuvre au cours des deux premières périodes bénéficient d'une large expérience industrielle et que le très long terme ne pose pas de vrai problème pour la santé de l'homme. **Seule la troisième période nécessite des études et des travaux pour confirmer les choix des natures des terrains pour le stockage définitif** (argile, granite ou sel) et fournir les données nécessaires pour dimensionner le stockage et qualifier un site particulier. La mise au point des conteneurs adaptés aux déchets B et C ne pose pas de problèmes sortant de l'ingénierie classique. Les Finlandais et les Suédois sont bien avancés dans ce travail pour le stockage des combustibles usés dans des sites en granite. Le stockage des verres issus du retraitement devrait être plus facile.

Le problème des déchets nucléaires est-il pour autant un problème résolu ? Dans ses grands principes peut-être, mais dans la pratique pas encore. Comme on vient de le voir, il reste encore beaucoup de travail pour aboutir à la qualification d'un site de stockage et pour arrêter le dessin précis des conteneurs et les qualifier. Il reste aussi à optimiser l'ensemble de l'aval du cycle : les solutions adaptées au parc nucléaire actuel, constitué de réacteurs à neutrons thermiques (en France, les REP), ne seraient pas nécessairement les meilleures pour un parc comportant des réacteurs à neutrons rapides, pour lequel il faudrait regarder de plus près l'intérêt d'extraire l'américium et de le transmuter. En réduisant les sources de chaleur dans les déchets, on augmenterait les capacités de stockage dans un site donné. L'ensemble de ces travaux dirigés par l'ANDRA est encadré par la Loi Bataille de 1991 et la loi de 2006 sur la gestion des matières et des déchets radioactifs ; ils sont suivis par la commission nationale d'évaluation (CNE) et contrôlé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). Et suivi par la commission nationale d'évaluation (CNE). On peut dire que la question des déchets est menée en France avec la plus grande rigueur possible et verra émerger la solution finalement retenue vers 2020 en ayant ménagé entre temps toutes les options possibles en fonction de l'avancement des études sur la transmutation

ANNEXE 6

L'HYDROGENE PEUT-IL PERMETTRE UN MIX ELECTRIQUE 100 % RENOUELABLE ?

Auteurs : Jean-Pierre Chevalier, Bernard Estève, Marc Florette, Gérard Grunblatt, Patrick Lederman, Bernard Tardieu, Dominique Vignon

Membres du pôle Energie de l'Académie des technologies

La loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat assigne l'objectif de réduire la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % en 2035¹. Cependant, il n'est pas défini d'objectif au-delà de cette date et l'option est ouverte de poursuivre cette réduction pour sortir du nucléaire, ou de maintenir une part de 50% du nucléaire dans le mix de production d'électricité, ou d'atteindre tout objectif intermédiaire. La même loi fixe également l'objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050², ce qui implique de complètement décarboner les secteurs des bâtiments résidentiels et tertiaires, toutes les mobilités terrestres, l'industrie et la production d'électricité.

En l'absence d'électricité d'origine nucléaire, la production d'électricité serait assurée par un développement massif des énergies éoliennes et solaires. Leur intermittence serait palliée en transformant par électrolyse les excédents d'électricité en hydrogène. Cet hydrogène serait reconverti en électricité (« Power-to-Power ») par des piles à combustible (PAC) lors des périodes de faible production d'énergies renouvelables.

Cette note vise à évaluer les capacités d'électrolyseurs et de piles à combustible et les volumes de stockage d'hydrogène requis pour assurer une production d'électricité complètement décarbonée sans recourir à l'énergie nucléaire. Il en résulte quelques conclusions démontrant qu'une telle stratégie se heurterait à des impossibilités physiques et serait en tout état de cause très coûteuse.

Une étude similaire a été publiée début 2020 par Énerpresse, puis reprise par le Monde ; elle conclut à la faisabilité d'un mix électrique 100% renouvelable (Alain Grandjean et al.³). Nos résultats qui contredisent cette étude lui sont comparés.

1. Méthodologie et hypothèses

Les hypothèses de production d'électricité en 2050 sont les suivantes

1 : en 2050, la consommation d'électricité française (hors électricité nécessaire à la production d'hydrogène) sera identique à celle d'aujourd'hui (479 TWh en 2017 et 476 TWh en 2018, pertes

incluses selon la méthodologie du gestionnaire de réseau (RTE)). L'ADEME dans son scénario 2018 « mix 100 % renouvelable en 2060⁴ » présente deux hypothèses : 1) une hypothèse basse descendant à 400 TWh en 2050 ; 2) une hypothèse haute avec une faible croissance (495 TWh). RTE a présenté en 2017 quatre scénarios à l'horizon 2035 dont deux avec stabilité et deux avec une baisse de la consommation⁵. L'Académie des technologies a déjà eu l'opportunité de critiquer les hypothèses baissières de la consommation d'électricité qui vont à l'encontre de toutes les prévisions des pays de l'OCDE préparant la transition énergétique. Même dans une hypothèse de baisse des consommations globales d'énergie, il y aura des transferts d'usages d'hydrocarbures vers de l'électricité décarbonée et donc une croissance de la demande d'électricité ; notre hypothèse de constance de cette demande facilite donc l'atteinte de l'objectif de décarbonation du mix électrique.

Bien entendu, une consommation d'électricité plus élevée rendrait plus difficile la décarbonation d'un mix électrique sans nucléaire.

2 : L'électricité produite à partir de biomasse est stable. Il convient en effet de privilégier l'utilisation de la biomasse pour produire du biométhane se substituant au gaz naturel, éventuellement avec un apport d'hydrogène non pris en compte dans la présente étude.

3 : il n'y a pas d'importation d'électricité. En première approximation, il convient de privilégier la sécurité énergétique : la France ne peut faire l'hypothèse que ses déficits momentanés d'électricité seront compensés par des pays voisins qui souhaitent également décarboner leurs mix électriques. Tout particulièrement, l'Allemagne qui est notre principal secours actuellement en période de pointe grâce à son parc lignite et charbon ne pourra plus assurer ce service quand elle sera sortie des énergies fossiles.

Il n'y a pas non plus d'exportation : tous les excédents d'électricité sont stockés sous forme chimique (batteries ou hydrogène) pour passer les périodes de creux d'électricité intermittente. Pour exporter, il faudrait accroître les capacités de production et de stockage.

4 : la production hydraulique (chutes, fil de l'eau et stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)) est identique aux productions des années 2015 à 2018. Le modèle utilisé place la production hydraulique (et la consommation des STEP) aux mêmes heures que ces années-là. Cette hypothèse est une simplification, car la production hydraulique sera optimisée par le marché en fonction de la production fatale d'énergie solaire et éolienne et de la consommation : mais elle ne modifie pas la production nette de l'hydraulique qui est plafonnée par les installations disponibles. Le complément doit donc être assuré par des énergies renouvelables intermittentes et du stockage/déstockage.

5 : des capacités d'énergies solaires et éoliennes sont développées pour compenser en totalité sur l'année 2050 les autres sources (nucléaire, fioul, gaz, charbon), et l'électricité en excès est stockée lorsque la production éolienne et solaire dépasse la demande. Les autres besoins de production d'hydrogène ne sont pas pris en compte ; en particulier, le développement d'une économie de l'hydrogène vert (électrolyse) pour des usages énergétiques (mobilités, injection dans les réseaux de gaz, méthanation, etc.) créerait des besoins s'ajoutant à la production d'hydrogène requise pour sortir du nucléaire et viendrait en concurrence avec cet objectif.

6 : chaque jour, la production est moyennée, en supposant que des capacités de stockage quotidien sont disponibles. Compte tenu de la baisse spectaculaire des prix des batteries et de leur rendement (90%) très supérieur à celui de la chaîne hydrogène, le lissage des pointes quotidiennes serait sans doute effectué par des batteries. Cette hypothèse permet d'éviter de dimensionner un stockage hydrogène saisonnier pour les pointes quotidiennes.

7 : l'électricité excédentaire est utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse ; cette énergie stockée est restituée sous forme d'électricité lorsque la demande d'électricité excède la production. Cette électricité est produite par des piles à combustible (PAC) alimentées en hydrogène. Il est retenu un rendement de la conversion d'électricité à électricité de 27,5%. L'ADEME retient 25% (rendement

d'environ 60% pour l'électrolyse et 40% pour la PAC⁶). La littérature fait état d'un rendement de la chaîne complète atteignant voire dépassant 30% ; mais il est établi que le rendement est maximal si la pile à hydrogène fonctionne à puissance constante, ce qui est loin d'être le cas ; en revanche le rendement d'une pile à combustible se dégrade si elle fonctionne à puissance variable. En outre, les piles à combustible fournissent une énergie en courant continu. Elle doit être convertie en courant alternatif, et sa tension doit être élevée à 380 V pour une utilisation locale, mais à 15 000 V, 220 000 V ou 400 000 V pour assurer l'équilibre des réseaux : ces opérations d'où résultent des pertes ne sont pas intégrées dans les évaluations de rendement de 30%.

Alternativement, la production d'électricité à partir de turbines à gaz qui fonctionneraient 100 % à l'hydrogène doit être évoquée. Les différents constructeurs font état de développements qui pourraient permettre de disposer de telles turbines en 2030⁷. Ces turbines à gaz présenteraient l'avantage de contribuer par leur inertie à la stabilité du réseau et à la fourniture de puissance réactive. Cependant, fonctionnant pour l'essentiel à charge partielle ; elles seront à cycle direct, car le cycle combiné ne se justifie que pour des facteurs de charge élevés. Elles auront donc un rendement inférieur à leur rendement à pleine puissance (qui est de 40% à 45%). Leur utilisation ne devrait pas modifier substantiellement le rendement de la conversion d'hydrogène en électricité (40% retenu via une PAC) et le rendement global de la chaîne d'environ 25%.

Résultats bruts

La méthode consiste à appliquer les hypothèses 1 à 7 aux historiques des quatre années 2015 à 2018¹, et à simuler la production d'électricité selon les différentes sources (hydraulique, biomasse, éolien, solaire, déstockage), et son utilisation (consommation et stockage). En ordre de grandeur, il faut multiplier les productions d'énergie éolienne et d'énergie solaire par respectivement 21 et 11 en 2050 par rapport à 2017 pour assurer l'égalité requise entre production et consommation. La simulation à partir de quatre années différentes permet de corriger les irrégularités climatiques qui pourraient être spécifiques à une année. Les résultats sont présentés sous forme de courbes en annexe.

Malgré des profils de production d'énergie assez variable d'une année à l'autre, les principaux paramètres dimensionnant le système (puissance à garantir, et énergie à stocker et déstocker les jours les plus sollicités) dépendent peu de l'année de référence.

¹Sur la base des données semi horaires mises à disposition par RTE

	Référence 2015	Référence 2016	Référence 2017	Référence 2018	Moyenne 2015- 2018
Consommation	473 TWh	480 TWh	479 TWh	476 TWh	477 TWh
Consommation diminuée de l'hydraulique, de la biomasse et du solde des échanges	414 TWh	415 TWh	423 TWh	406 TWh	414,5 TWh
Production éolienne	461 TWh	455 TWh	473 TWh	424 TWh	453,2 TWh
Production solaire	80 TWh	90 TWh	91 TWh	95 TWh	89 TWh
Production totale (yc PAC)	589 TWh	601 TWh	614 TWh	568 TWh	593 TWh
Electricité entrant dans la chaîne de stockage	176 TWh	176 TWh	186 TWh	155 TWh	173,2 TWh
Electricité sortant de la chaîne de stockage	48 TWh	56 TWh	51 TWh	43 TWh	49,5 TWh
Puissance des batteries requises pour le stockage quotidien	Non évalué pour 2015 et 2016 ; données très voisines de 2017 et 2018		12,0 GW	12,7 GW	12,35 GW
Energie annuelle du stockage quotidien (batteries)			37,4 TWh	39,2 TWh	38,3 TWh
Pointe de puissance d'électrolyse requise	>100 GW	>100 GW	>100 GW	>100 GW	>100 GW
Puissance PAC requise la journée la plus chargée	50,6 GW	56 GW	51,6 GW	45,6 GW	51,0 GW
Soutirage PAC requis la journée la plus chargée	1,16 TWh/j	1,3 TWh/j	1,23 TWh/j	1,11 TWh/j	1,2 TWh/j
Facteur de charge des électrolyseurs	20,1%	20,1%	21,2%	17,7%	20,0%
Facteur de charge des piles à combustible	10,8%	11,4%	11,3%	10,8%	10,6%

Tableau 1 - Principaux paramètres du système électrique simulé pour 2050

Il ressort de ce tableau et des courbes en annexe présentant les simulations les principaux éléments ci-après.

Les énergies solaires et éoliennes sont, dans une certaine mesure, complémentaires. Le maximum de production d'énergie solaire est l'été, contrairement à l'énergie éolienne dont la production est maximale en automne et en hiver. Cependant cette complémentarité est loin d'être parfaite, et la production éolienne est très chaotique.

Le lissage des pointes et creux quotidiens est selon notre hypothèse assuré par des batteries. En fonction des chroniques des années 2015 à 2018 étudiées, la puissance stockable ou délivrable doit être de l'ordre de 10/12 GW (écart entre le maximum et la moyenne quotidienne). Ce potentiel est utilisé environ à moitié ; la simulation montre qu'environ 38 TWh doivent être stockés et déstockés

chaque année, pour le lissage quotidien. Au regard des trente millions de résidences principales en France, et des points de distribution professionnels et industriels de puissance plus élevée, l'installation d'une telle capacité de stockage ne pose pas de problème de faisabilité, même si elle a un coût qui devra être rémunéré.

L'énergie à déstocker chaque jour par les piles à combustible n'excède évidemment jamais la consommation quotidienne alors que l'énergie à stocker peut être très élevée un jour de faible consommation et de forte production éolienne et solaire (en 2017 par exemple, le maximum quotidien d'énergie à stocker se serait situé le lundi de Pentecôte ensoleillé et venté) ; c'est ce qui explique l'écart important entre ces deux paramètres. L'énergie maximale à stocker sous forme d'hydrogène est de l'ordre de 50 TWh (voir courbes), permettant de produire 20 TWh d'électricité, soit près d'un demi- mois de consommation. Les puissances de stockage et déstockage sont de l'ordre des deux tiers du parc nucléaire actuel (63 GW). La simulation montre que la puissance journalière moyenne disponible pour alimenter les électrolyseurs excéderait 100 GW une vingtaine de jours par an, pour atteindre jusqu'à 160 GW. Nous avons choisi de retenir un parc d'électrolyseurs de 100 GW, car le facteur de charge d'électrolyseurs additionnels qui ne fonctionneraient qu'une vingtaine de jours par an serait très faible. Il faudra en conséquence limiter à 100 GW la puissance fournie ces jours-là (en sus de la puissance requise pour la consommation).

L'ordre de grandeur de la puissance appellable en déstockage (environ 50 GW de PAC et une dizaine de GW de batteries) est similaire à celui envisagé par Alain Grandjean et al. (70 GW). Cependant cette dernière étude n'évoque que la puissance à garantir. Or ce système est caractérisé par des puissances élevées d'électrolyseurs et de piles à combustible ; mais par des facteurs de charge très bas de ces équipements (11% et 20 % respectivement).

Le système électrique décrit comprend les principaux éléments ci-après :

- Des batteries assurant un stockage quotidien, avec une puissance de l'ordre de 10 GW (un peu inférieure au maximum de l'écart entre la demi-heure la plus chargée et la demi-heure la moins chargée d'une journée), et un stockage-déstockage annuel de 35 TWh. Ce système fonctionne tous les jours alternativement en charge et décharge.
- Des éoliennes et installations photovoltaïques dont le mix pourrait être le suivant

	Production (TWh)	Puissance (GW)	Facteur de charge
Eolien terrestre	154	61	28,5%
Eolien en mer	290	82	40%
Solaire	98	75	15%
Total	542	221	29%

Tableau 2 -Mix de la présente étude -

- Des PAC d'une puissance de 56 GW produisant une cinquantaine de TWh par an

Ce mix est un peu plus réduit que celui de Alain Grandjean et al. dans leur étude du Monde/Énerpresse, pour l'essentiel parce que ces auteurs prennent en compte une croissance de la demande d'électricité (640 TWh en 2050 pour Alain Grandjean contre 480 TWh en 2017/18). Nous retenons une option de stabilité de la demande dans une étude de faisabilité d'un mix électrique sans nucléaire (notre hypothèse n°1) ; toute croissance de la demande rendrait plus difficile le remplacement du nucléaire par des énergies intermittentes.

	Production (TWh)	Puissance (GW)	Facteur de charge
Eolien terrestre	180	72	28,5%
Eolien en mer	340	80	48,5%
Solaire	120	100	13,7%
Total	640	252	29%

Tableau 3 -Mix Alain Grandjean et al.

Le facteur de charge retenu par Alain Grandjean et al. pour le solaire est très bas, alors que les rendements de cette filière présentent des perspectives d'amélioration ; et le facteur de charge très haut retenu pour l'éolien en mer : c'est celui du large de l'Ecosse ou de la Norvège. Il y a tout lieu de penser que les sites atlantiques et méditerranéens français n'atteindront pas ces valeurs.

Au total, pour substituer 63 GW de nucléaire, il faut environ 384 GW de moyens alternatifs (221 GW Renouvelables + 12 GW Batteries+100 GW Electrolyseurs + 51 GW PAC²). Il ne s'agit donc pas d'une

« transition énergétique », mais d'une rupture dont il faut apprécier la faisabilité technique et le coût.

La faisabilité technique et physique de ce système énergétique est douteuse

4.1

L'empreinte environnementale des installations requises serait considérable

Un MW de puissance photovoltaïque au sol requiert d'un à six hectares⁸. En retenant 3 ha/MW, il faut environ 2 250 km² pour installer les 75 MW d'installations photovoltaïques nécessaires à la production de 98 TWh. L'ADEME estime⁹ que le potentiel solaire français pour des installations solaires de grande puissance (centrales au sol) ou moyenne puissance (parkings, ...) peut produire 64 TWh : le potentiel n'est que les 2/3 du besoin.

Un MW de puissance éolienne requiert 34 ha/MW (emprise totale d'un projet) ou 0,3 ha/MW¹⁰ (surface affectée de façon permanente : routes, réservations pour maintenance, etc). L'emprise totale de 70 GW d'éolien terrestre serait de 23 800 km², soit l'équivalent de quatre départements.

La densité de puissance des électrolyseurs et des piles à combustible est faible, du fait des grandes surfaces de membranes requises et des installations annexes, comme le montre la photo d'une installation d'électrolyseurs de 2 MW. Pour 100 GW, il faudrait 50 000 installations de ce type soit environ 5 000 par département ; leur implantation en hauteur n'est pas admise par la réglementation.

Piles à combustibles et électrolyseurs requièrent des matériaux et ressources minérales importées et parfois rares, avec de forts impacts environnementaux et enjeux de disponibilité.



Figure 1 Parc solaire de 6,3 MWc en Belgique



Figure 2 - Installation d'électrolyseurs de 2 MW © EON/Hydrogenics

² Auquel il faut retrancher 15,1 GW d'éolien, 6,3 GW de solaire et 2GW de bioénergie électrogène déjà réalisés fin 2018.

4.2 La sécurité du système électrique serait obérée

En l'absence de l'inertie fournie par les turbo-alternateurs, la fréquence du réseau et la production de puissance réactive seraient régulées par de l'électronique de puissance : il n'existe aucune référence d'un tel système.

Les plans de reprise du réseau en cas de perte totale (black-out) seront longs et difficiles à mettre en œuvre. Les unités de production d'un mix 100 % renouvelable sont de faible puissance (quelques MW par unité élémentaire), et les exploitants du réseau ne pourront donc que reprendre très progressivement de petites unités de consommation au fur et à mesure du retour sur le réseau de petites unités de production.

4.3 Le système de stockage et transport de l'hydrogène ne serait pas faisable sur le territoire français

C'est un nouveau système de transport et stockage d'hydrogène qu'il faudrait créer, dont GRTGaz a esquissé le schéma.



Figure 3 Présenté par GRTGaz aux journées HyEvolution. – Parc floral de Versailles – Février 2020

Il s'agirait de créer en sus du système actuel de transport et stockage de gaz naturel (en pointillé vert) un nouveau système dédié à l'hydrogène (en bistre). En effet les opérateurs gaziers pensent pouvoir injecter jusqu'à 20% d'hydrogène (volume) dans un système de gaz naturel (essentiellement méthane) ; mais les opérateurs de réseau ne savent pas – et sans doute ne pourront pas – convertir tout ou partie d'un système gaz naturel en système 100 % hydrogène ; d'autant que les grands opérateurs européens étant interconnectés, il faudrait qu'ils le fassent simultanément.

L'énergie électrique à stocker peut sembler être d'un ordre de grandeur gérable : une cinquantaine de TWh d'électricité. Mais il faudrait stocker sous forme d'hydrogène une énergie 2,5 fois plus élevée que l'énergie électrique requise (rendement de la PAC de 0,4). Et à volume donné, le contenu énergétique de l'hydrogène n'est que 0,38 fois celui du méthane. Le volume requis d'un stockage de 50 TWh d'hydrogène pourrait contenir 131 TWh d'énergie sous forme de gaz naturel. Or le volume actuel des stockages de gaz naturel est de 138,5 TWh dont l'essentiel en aquifères¹². Le volume des stockages dédiés à l'hydrogène serait du même ordre de grandeur que les stockages de gaz actuels. Et encore cette évaluation fait l'hypothèse que le volume d'hydrogène stocké pourrait varier de 0% à 100 %, alors qu'en pratique, le système ne peut jamais utiliser 100 % des capacités. Cependant les capacités de stockage souterrain de gaz naturel sont majoritairement des aquifères, alors que le stockage souterrain d'hydrogène n'est validé que dans des cavités salines de capacité sensiblement plus petite. Les sites de stockage en formation salines disponibles en France n'offrent pas les volumes compatibles avec les quantités d'hydrogène requises.

Un calcul direct confirme cette conclusion ; une cavité saline de 500 000 m³ – ordre de grandeur des plus grandes cavités salines exploitées - pourrait stocker de l'hydrogène permettant de produire environ 50 GWh d'électricité¹³. Or la quantité requise est de 20 TWh ce qui nécessiterait 400 cavités alors que la France ne dispose que de trois sites Le plus gros n'a que 12 cavités pour un volume total de 600 000 m³.

Avec des infrastructures de telles dimensions, il ne s'agit plus d'énergies douces que chaque territoire pourrait développer à sa main.

3. **Economie du système**

L'électricité des panneaux solaires et des éoliennes pourrait être produite au prix moyen de 60 €/MWh. Il est parfois considéré que l'électricité excédentaire (lorsque la production « Solaire + éolien » dépasse la consommation diminuée de l'apport de l'hydraulique) est gratuite ; mais un raisonnement économique ne peut retenir cette assertion : 1) par construction, le mix énergétique envisagé prévoit que les excédents sont convertis en hydrogène dans des installations d'électrolyse dédiées. Les producteurs d'excédents d'électricité les vendront – et ne les donneront pas – aux exploitants d'électrolyseurs, d'autant qu'ils pourront alimenter des électrolyseurs servant d'autres usages (mobilités, injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz, etc.) ; 2) selon un autre point de vue, l'électricité issue du système de production doit être vendue au coût moyen actualisé (LCOE – Levelized Cost of Electricity) ; si une partie de l'électricité produite n'était pas vendue mais cédée gratuitement, alors le solde devrait être vendu à un prix plus élevé que le LCOE, pour que la production reste rentable. Quel que soit le raisonnement retenu, l'électricité produite par le système éolien et solaire est nécessairement vendue à un prix moyen (LCOE), qui assure l'équilibre entre les coûts de production et les recettes compte tenu du taux d'actualisation.

Le système doit chaque année équilibrer la production et la consommation. Celle-ci est fixée (les évaluations ci-après sont faites sur la moyenne des années de référence 2017 et 2018). La production est composée de trois termes : la production des installations éoliennes et solaire diminuée de la consommation des électrolyseurs, la production des piles à combustible, et le solde de la production et consommation des batteries assurant le stockage/déstockage quotidien. Les termes sont ceux du graphique ci-après.

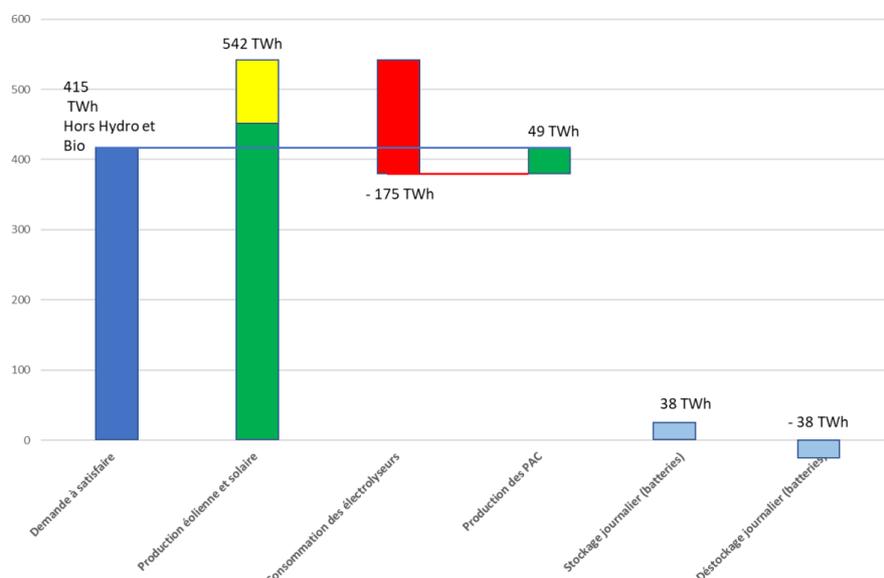


Figure 4 Equilibre Production – Consommation

Le coût de la production nette de 415 TWh (soit la consommation diminuée de l'hydraulique et des bioénergies) est égal à la somme du coût de production de 542 TWh (au prix de 60 €/MWh) augmenté du coût des 49 TWh produits par la chaîne hydrogène, et du coût du stockage-déstockage quotidien par batteries électriques.

Le coût de production des 542 TWh (solaire + éolien) est 32,6 B€³ (542x60).

Pour calculer le coût du MWh d'électrolyse et de pile à combustible (hors coût de l'électricité), on suppose que l'investissement (Capex) est 1 200 €/kW ; la construction dure deux ans (il s'agit de grandes installations, de l'ordre de la centaine de MW) ; les coûts de fonctionnement (Opex) sont de 3,5% du Capex par an ; le taux d'actualisation est de 7%⁴ ; la durée de vie est vingt ans, avec une maintenance décennale qui coûte 30% de l'investissement initial ; il faut ajouter un coût de transport de l'électricité vers les électrolyseurs de 20 €/MWh⁵ ; en revanche il n'y a pas lieu de prendre en compte de coût du transport de l'électricité produite par les piles à combustible vers le consommateur, qui est à payer par celui-ci. Tous ces paramètres peuvent être aisément ajustés par le tableur utilisé pour les calculs¹⁴.

Avec ces hypothèses, il faut vendre le service d'électrolyse 0,107 € par kWh entrant dans la chaîne, soit 107 €/MWh, et le service de production à partir de pile à combustible 0,213 € par kWh entrant soit 213 €/MWh (la différence résulte du facteur de charge : 20% pour les électrolyseurs et 10% pour les piles à combustible), en sus les 20 €/MWh de transport de l'électricité vers les électrolyseurs. Le montant annuel de la part électrolyse est donc (175 TWh à traiter) : 22,2 B€ (175*(107+20)) et le montant de la part PAC est de (49*0,213) : 10,4 B€.

³ 1 B€ : un milliard d'euros

⁴ Ce taux d'actualisation est un coût d'accès au capital (apports en fonds propres, endettement, prime de risque).

⁵ C'est l'ordre de grandeur du « tarif d'utilisation des réseaux publics de transport d'électricité » (Turpe). Les gros électrolyseurs qualifiés d'électro-intensifs pourraient en être dispensés. Mais il faut bien dans l'appréciation économique prendre en compte les renforcements de réseaux requis par l'accroissement de la puissance des moyens de production.

Il convient d'ajouter le service de transport et stockage de l'hydrogène. Ce service pour le gaz naturel est de 7 €/MWh¹⁵ ; l'énergie calorifique de l'hydrogène étant trois fois moindre, il faut retenir 21 € s'appliquant à (47/0.4 (47 TWh = électricité sortie des PAC) : 117 TWh, soit 2,6 B€. A noter que le prix de 7 €/MWh est le prix actuel pour un réseau amorti. Il inclut essentiellement des coûts d'exploitation ; le prix pour un réseau nouveau de transport et stockage d'hydrogène serait sensiblement plus élevé.

La rémunération des batteries quotidiennes doit être de 68 €/MWh (durée de vie : sept ans ; Capex : 180/kW) ; le coût des 38,3 TWh stockés/déstockés chaque année est de (68*38*10⁶) : 2,1 B€ ; les pertes sont de 10% de 38 TWh dont la production coûte 60 €/MWh, soit 0,23 B€. Le coût de ces batteries assurant le lissage quotidien est sans doute sous-estimé, car la durée de vie de batteries fortement cyclées est sensiblement plus faible que les quatre ans pris en compte.

Coût de production éolienne et solaire	32,6 B€	542*60
Electrolyse	22,2 B€	175*(0.107+0.20)
PAC	10,4 B€	49*0,213
Transport d'hydrogène	2,6 B€	21*0,213/0.4
Batteries	2,6 B€	68*38,3*10 ⁶
Pertes dans les batteries	0,23 B€	10%*38,3*60*10 ⁶
Total	70,6 B€	

Tableau 4 Coût de production de l'électricité (hors hydraulique et bioénergie)

Au total, le coût de revient des 415 TWh de la demande finale (hors hydraulique et bioénergie) est : 70,6 B€ soit **170 €/MWh**. Le coût de la seule production de 415 TWh consommée immédiatement aurait été de 24,9 B€ (60 €/MWh). **En ordre de grandeur, la chaîne de stockage et conversion triple le prix de l'électricité (170/60).**

Cette évaluation ne prend pas en compte :

- le renforcement nécessaire des infrastructures des réseaux de transport et distribution de l'électricité
- l'investissement et l'exploitations de grandes infrastructures de stockage et transport de l'hydrogène
- les problèmes d'implantation des installations solaires et éoliennes, et des éléments de la chaîne hydrogène (électrolyseurs et piles à combustible)
- et la faible fiabilité d'un tel système énergétique qui serait d'une grande complexité

6 4. Comparaison avec les études étrangères et conclusions

De nombreuses études françaises et étrangères concluent également que la transformation d'énergie électrique en hydrogène pour stocker des excédents de production d'électricité n'est pas pertinente. Des études similaires d'organisations réputées aboutissent aux mêmes conclusions.

- Une vaste étude du National Renewable Energy Laboratory (NREL) américain consacrée à la production et au stockage d'énergie renouvelable conclut à propos de l'hydrogène : « le déploiement limité de l'hydrogène comme moyen de stockage, et une grande incertitude sur les perspectives de réduction des coûts et l'amélioration des performances du stockage, ont conduit à écarter l'hydrogène en tant que technologie de stockage d'énergie de base¹⁶ ».

- Le Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Karlsruhe et le Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg qui ont réalisé à la demande du Gouvernement fédéral une « hydrogen roadmap for Germany »¹⁷ concluent que du fait de sa position centrale, l'Allemagne n'a pas besoin de se préoccuper de stockage d'électricité. Il lui suffit d'exporter son électricité excédentaire, et d'importer en cas de déficit. L'Allemagne, consciente des limites de la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables produites sur son territoire envisage d'importer l'hydrogène...
- L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) souligne le difficile défi posé par le faible rendement de la chaîne de conversion ; elle rappelle les capacités limitées des formations salines pour le stockage d'hydrogène ainsi que l'absence de qualification des aquifères et champs gaziers déplétés¹⁸.

Le coût du stockage massif d'électricité via la chaîne hydrogène Power-to-Gas-to-Power est très élevé. Il faut réserver l'hydrogène vert à des usages plus accessibles (industrie, mobilités lourdes, flottes, etc.), ou le convertir en carburant de synthèse pour des usages difficile à décarboner (kérosène), ou l'injecter dans les réseaux de gaz naturel pour décarboner partiellement la filière Gaz.

Outre son coût, ce mix se heurte à des impossibilités physiques, notamment la capacité à stocker et déstocker l'hydrogène aux volumes et avec la variabilité requise.

Il n'y a guère d'alternative à l'hydrogène pour stocker l'électricité. Alain Grandjean et al. envisagent des STEP et des turbines à gaz. Cependant n'y a pas de site disponible pour réaliser de grandes installations hydrauliques dans les massifs montagneux français. Il a été proposé de réaliser des installations côtières. Mais en l'absence de hauteur de chute conséquente, il faudrait mobiliser des volumes d'eau considérables. La densité énergétique (énergie par unité de volume) des installations hydrauliques est relativement faible : l'énergie potentielle d'un m³ d'eau à une altitude de 100 m est de 0,272 kWh, et la chaîne pompage-turbinage a un rendement de 80%. Il faudrait des réserves d'environ 66 milliards de m³ d'eau soit 660 km de longueur, 100 mètres de hauteur de chute moyenne, 100 m de profondeur et 1km de largeur pour stocker sous forme gravitaire les 15 TWh d'électricité requis !

Une alternative pour « sortir du nucléaire » serait une production d'énergie renouvelable plus faible, et une gestion de l'intermittence par des turbines à gaz. Mais une telle stratégie poserait des problèmes d'indépendance énergétique, et ne serait pas cohérente avec l'objectif français de « zéro émission nette de CO₂ en 2050 ». Une alternative serait d'importer l'hydrogène comme l'envisagent l'Allemagne et le Japon ; mais l'absence d'offre et l'importance des coûts de transport à longue distance de l'hydrogène rendent cette solution très peu crédible.

En tout état de cause, le système électrique est complexe ; il couple production et consommation en temps réel ; et il interagit sur le système gaz. Des évaluations de l'ensemble des systèmes, couplés, sont nécessaires. Au regard des éléments présentés, un mix électrique 100% renouvelable n'est pas possible ; pour décarboner le secteur électrique, d'autres énergies telles que le nucléaire paraissent indispensables.

7 Annexe 1 – Principaux graphiques

Équilibre Production – Consommation en Puissance (MW)

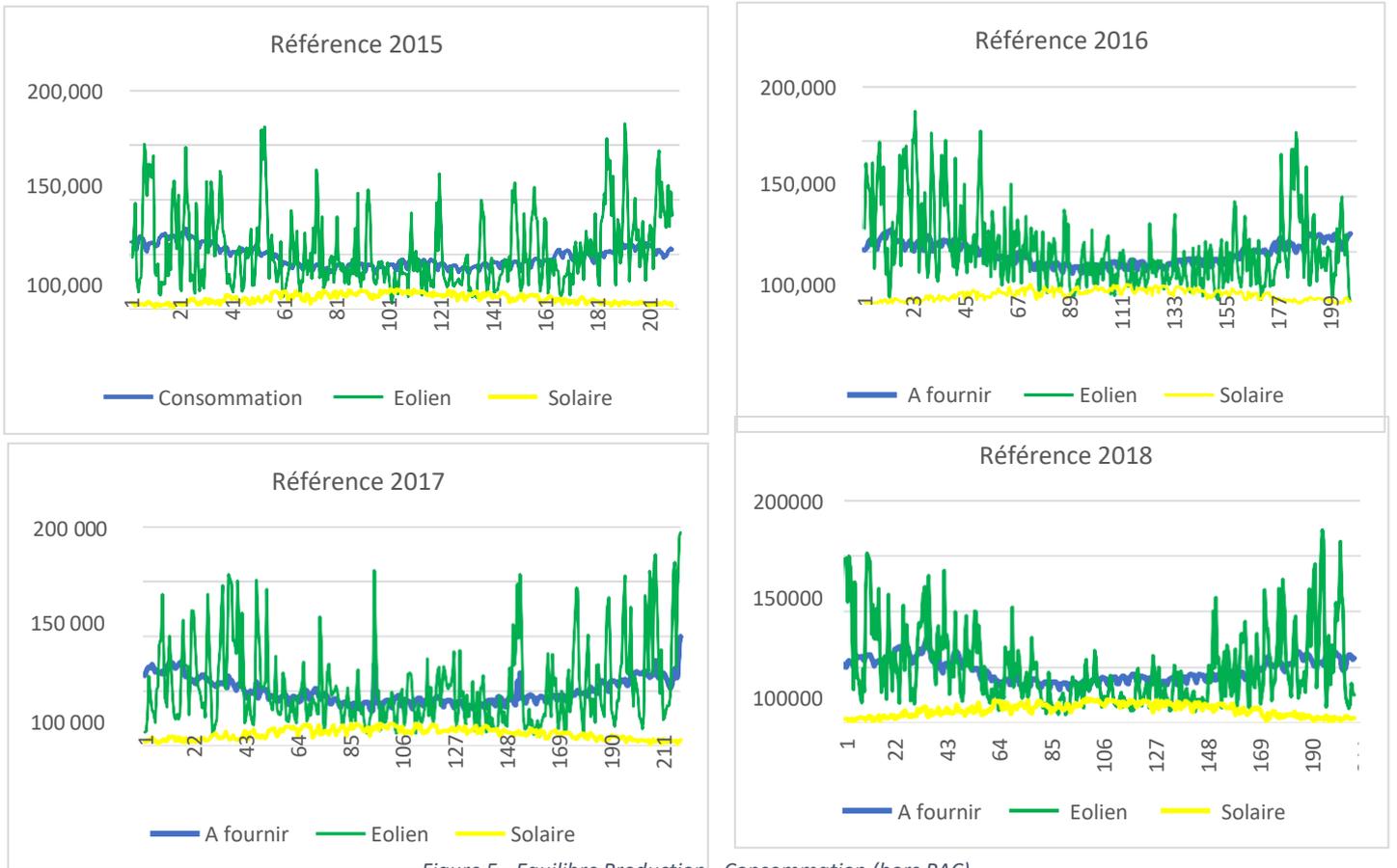


Figure 5 – Equilibre Production - Consommation (hors PAC)

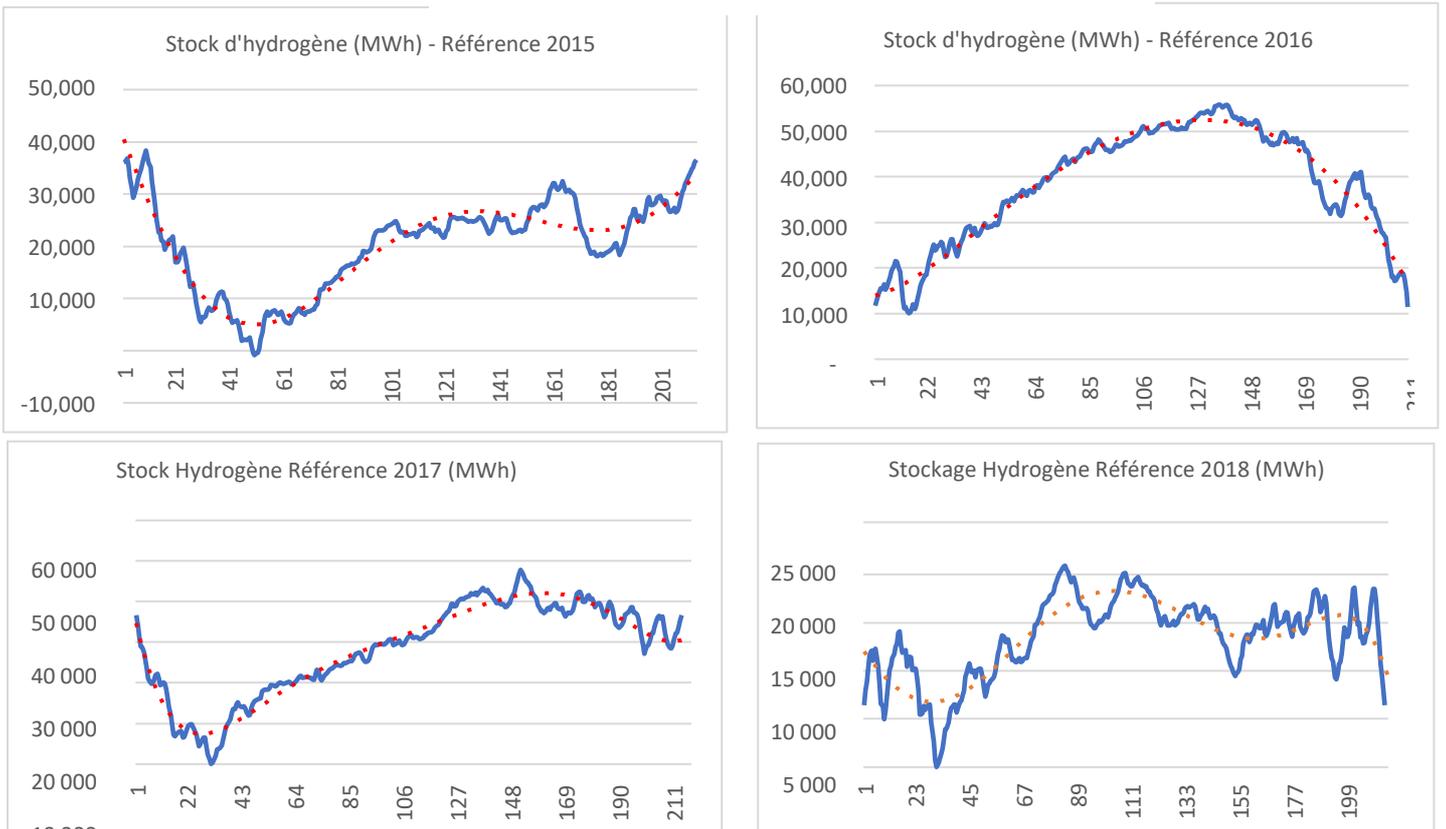


Figure 6 Energie stockée sous forme d'hydrogène

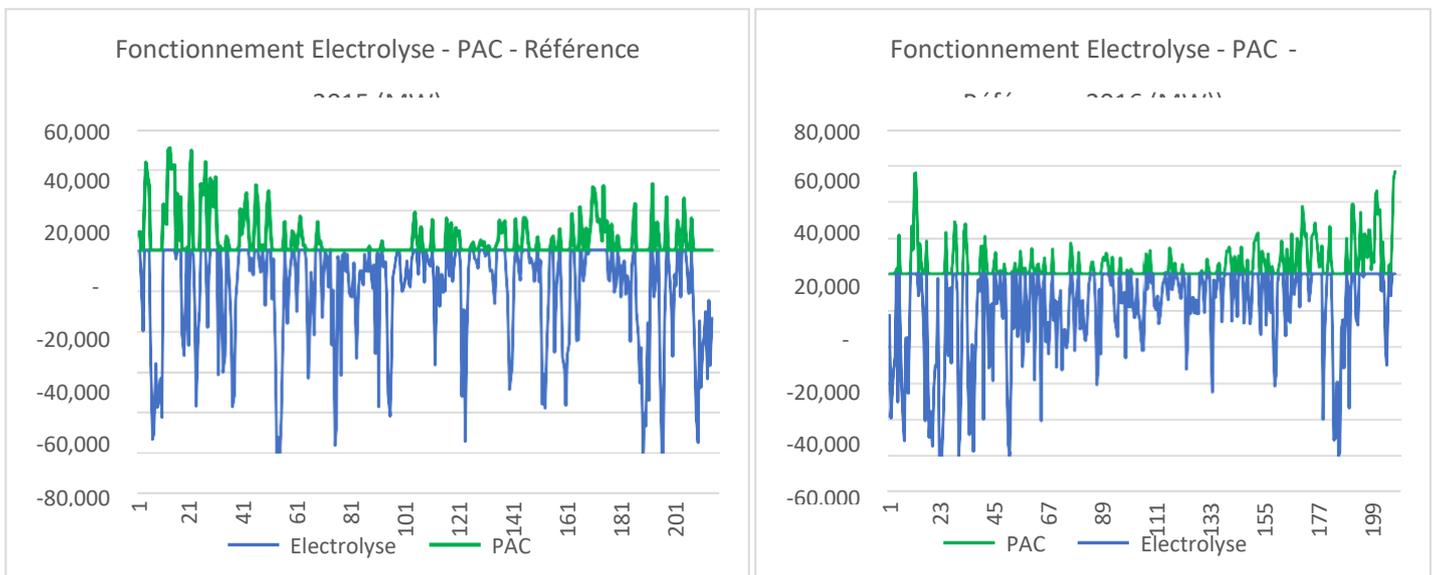
Les projections de l'année 2050 sur le fondement des profils de consommation et de production solaire et éolienne des années 2015 à 2018 sont présentées dans les graphiques de la page précédente.

Ces graphiques démontrent qu'il n'y a guère de reproductibilité des profils de production d'énergie éolienne et solaire d'une année à l'autre. La production d'énergie solaire est plus forte l'été que l'hiver alors que les périodes les plus ventées suivent un profil inverse, il n'y a cependant aucune prédictibilité de ces dernières. Il en résulte que les profils de remplissage et vidange du stock d'hydrogène sont très variables. Les profils issus des références 2015 et 2017 sont analogues ; en revanche le profil fondé sur l'année 2016 est assez différent du fait d'une très forte production éolienne l'hiver 2016. Le profil 2018 est caractérisée par une très bonne alternance entre les périodes ventées et non ventées, et donc un stock à constituer sensiblement plus faible.

Malgré cette variabilité, il n'en reste pas moins que certains grands paramètres déterminant le dimensionnement du stockage sont les mêmes d'une année à l'autre. À l'exception de la référence 2018 l'énergie maximale à stocker sous forme d'hydrogène va de 45 à 55 TWh, et l'énergie quotidienne maximale à déstocker est de l'ordre de 1,1 à 1,3 TWh/j.

La page suivante présente les profils de fonctionnement des électrolyseurs et des piles à combustible.

Fonctionnement des électrolyseurs et des PAC selon l'année de référence



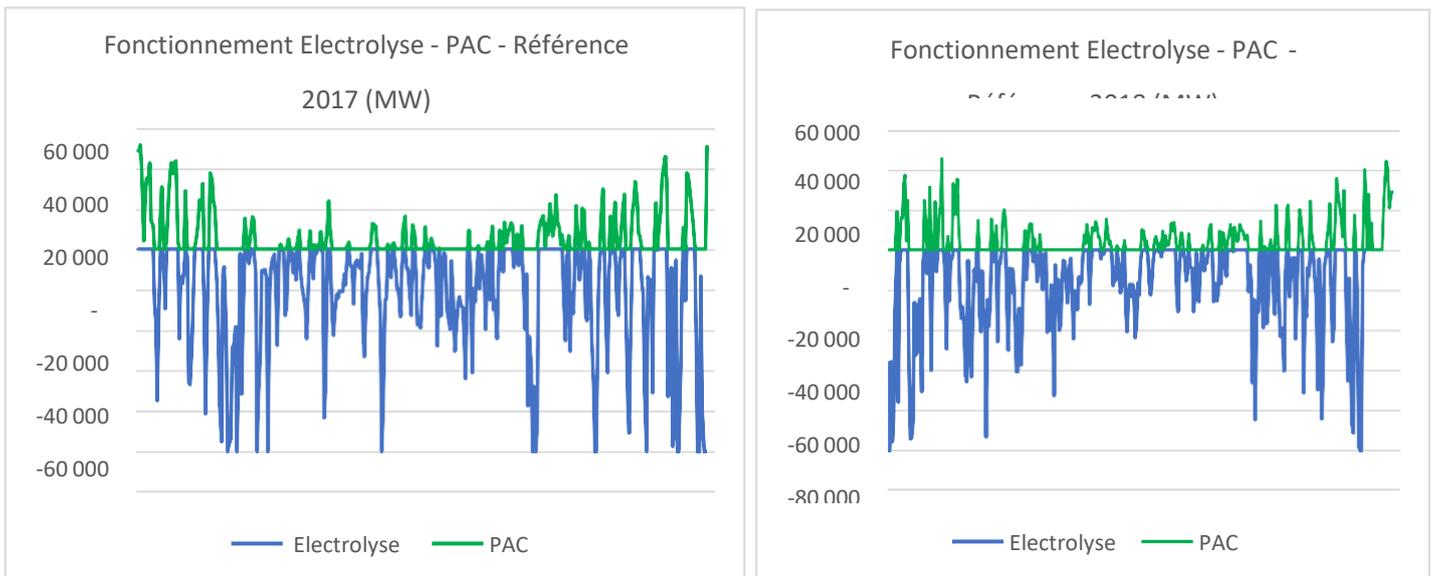


Figure 7 Fonctionnement des électrolyseurs et des PAC

Références

- 1 Article L100-4 – 5ème du code de l'énergie
- 2 Article L100-4 – 1er du code de l'énergie
- 3 Alain Grandjean, François Lempérière et Cédric Philibert – Énerpresse – 16 janvier 2020 – Peut-on se passer en France de l'énergie nucléaire - et erratum du 22 janvier 2020. Mêmes auteurs - « Le problème principal de l'option sans nucléaire est la reconversion des emplois directs du nucléaire dans 15 ans étalée sur vingt ans » - Le Monde – 8 février 2020
- 4 Ademe - Trajectoires d'évolution du mix électrique 2020-2060 : cahier d'hypothèses – Décembre 2018
- 5 RTE - Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France - 2017
- 6 Ademe – Rendement de la chaîne Hydrogène - Cas du « Power-to-H2-to-power » - Janvier 2020

7 Voir par exemple

<https://new.siemens.com/global/en/company/stories/energy/hydrogen-capable-gas-turbine.html> - 02/08/2019. General Electric et Mitsubishi font des annonces similaires et aussi lointaines.

8 Selon les références “Global land outlook working paper energy and land use” et “DoE quadrennial technology 2015” le PV requiert de un à six ha/MW.

Selon le NREL, la surface totale requise est de 3,6 ha/MW, et la surface directement utilisée est de 3 ha/MW ; Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States - National Renewable Energy Laboratory (NREL) - 2013

9 ADEME, Transénergie. Mars 2019. Évaluation du gisement relatif aux zones délaissées et artificialisées propices à l’implantation de centrales photovoltaïques.

10 Land-Use Requirements for Modern Wind Plants in the United States - National Renewable Energy Laboratory (NREL) - 2013

11 The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure. Dries Haeseldonckx, William D’haeseleer – Université de Louvain – 2008.

12 Stratégie française pour l’énergie et le changement climatique – Programmation pluriannuelle de l’énergie (PPE)– Projet janvier 2020

13 Large-Scale Hydrogen Energy Storage - Erik Wolf, in Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, 2015 et Large-Scale Hydrogen Energy Storage - Erik Wolf, in Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, 2015 et Large-scale underground storage of hydrogen for the grid integration of renewable energy and other applications - U. Bünger, ... O. Kruck, in

[Compendium of Hydrogen Energy, 2016](#)

14 Ce tableur est à disposition auprès des auteurs

15 [Stockage souterrain de gaz - Inspection générale des finances - CGEDD - CGE Avril 2017](#) -

16 National Renewable Energy Laboratory (NREL) - Renewable Electricity Futures Study Volume 2: Renewable Electricity Generation and Storage Technologies – 370p. Juin 2012.

17 Fraunhofer - Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland - Karlsruhe und Freiburg Oktober 2019 18 IAE - The Future of Hydrogen - Seizing today’s opportunities -

Annexe 7

A) SITES DE CAPTAGE ET SEQUESTRATION DE CO₂ OPERATIONNELS B) DESCRIPTION ET DIFFICULTES DU CAPTAGE-STOCKAGE DU CO₂ (CSC)

A) Sleipner, Norvège

À Sleipner en mer du Nord, la compagnie nationale Statoil extrait le CO₂ d'un gisement de gaz naturel naturellement riche en CO₂, qui en contient jusqu'à 9,5 % alors que les clients exigent que ce taux ne dépasse pas 2,5 %, en utilisant des solvants aminés et en réinjecte depuis 1996 environ un million de tonnes par an dans une formation saline, économisant ainsi des millions d'euros sur la taxe carbone norvégienne de 43 €/tonne instaurée en 1992 ; mais il faut une centrale de 6 MW pour comprimer le CO₂ à enfouir. Les émissions de CO₂ de la plate-forme de Sleipner (centrale de compression, centrale électrique de 6 MW, torchère) atteignent malgré cette capture 900 000 tonnes/an³⁵. En juin 2015, le cumul du CO₂ injecté depuis le début atteignait 15,5 Mt (millions de tonnes). Le coût de l'injection est de 17 \$/t CO₂. Des tests sismiques ont permis de vérifier l'absence de fuites³⁶. En avril 2008, quand une fuite fut découverte et l'expérience interrompue, la quantité de CO₂ ainsi stockée depuis 1996 atteignait un total de 10 millions de tonnes. À la suite de l'incident la Direction norvégienne du pétrole a changé sa description de la formation géologique utilisée de « pouvant stocker toutes les émissions européennes pendant des centaines d'années » en « pas très adaptée »^[réf. nécessaire].

Weyburn, Saskatchewan, Canada

À Weyburn depuis 2000, on injecte et stocke dans un champ pétrolier découvert en 1954 et partiellement épuisé dans le sud-est de la Saskatchewan (Canada) le dioxyde de carbone produit par une unité de gazéification du charbon située à Beulah (Dakota du Nord, États-Unis). Ce dioxyde de carbone à raison d'1,5 million de tonnes par an permet d'augmenter la production de pétrole (et donc de dioxyde de carbone, indirectement). C'est le premier projet CO₂-EOR, ayant disposé d'un budget d'environ un milliard de dollars, associant des partenaires publics et privés de plusieurs pays. Ce gisement initialement estimé à un milliard de barils de pétrole, dont 350 millions environ récupérables selon les techniques conventionnelles. L'application de la technologie CO₂-EOR devrait permettre d'extraire 130 millions de barils de plus, le gisement restant actif jusqu'en 2030. Bien sûr, il ne faut pas déduire de cet exemple que la technologie CO₂-EOR permet d'augmenter de 35 % les réserves ultimes de pétrole de façon globale : elle ne peut s'appliquer que dans certains gisements, et Weyburn a été choisi parce qu'il s'y prêtait particulièrement bien³⁷. L'injection de dioxyde de carbone a commencé en l'an 2000 et a atteint depuis un rythme d'environ 1,8 million de tonnes par an. C'est l'entreprise Encana qui est chargée de l'opération³⁸.

In Salah, Algérie

Sur ce site gazier d'Algérie, depuis 2004, chaque année 1,2 million de tonnes de CO₂ sont extraites du gaz naturel puis réinjectées dans un ancien gisement de gaz naturel³⁹. Ce site de séquestration fait partie intégrante d'un vaste projet de développement des gisements de gaz de la région, dont la production est exportée vers l'Europe après transit par Hassi R'Mel. Le gaz extrait de ce gisement contient jusqu'à 10 % de CO₂ et ce taux doit être réduit à 0,3 % avant la commercialisation du gaz. Mais les opérations de stockage ont été suspendues en 2011 en raison du recueil de données préoccupantes sur l'intégrité d'un problème d'étanchéité du dispositif de stockage ; de plus, un soulèvement progressif des terrains (surrection) et une fuite a été constatée le long d'un puits et a fait l'objet de mesures correctives. Des interrogations existent sur l'énergie dépensée pour la réinjection et sur le coût du procédé⁴⁰.

Snøhvit, Norvège

Le projet consiste à réinjecter dans un aquifère le CO₂ coproduit avec le gaz de ce gisement, à l'image de ce qui est fait à Sleipner et à In salah. L'injection a commencé à Snøhvit en septembre 2007.

K12b, Pays-Bas

Il s'agit un petit gisement de gaz offshore épuisé, dans lequel du CO₂ provenant de gisements voisins est injecté. L'opérateur est Gaz de France

Blue Lake, Colorado, États-Unis Entré en service fin 2007, un petit gazoduc transporte un million de tonnes de CO₂ par an depuis une usine de traitement de gaz naturel vers le réseau de pipe-lines existant qui achemine le CO₂ du gisement de sheep mountain vers les projets EOR du Texas.

Zama, Canada Ce petit projet de récupération assistée dans un vieux gisement de pétrole est actif depuis décembre 2007. S'il est d'une toute petite échelle comparé à Weyburn, avec quelque 25 000 tonnes de CO₂ par an, il a particularité d'utiliser tel quel le « gaz acide » (70 % CO₂, 30 % H₂S) issu du traitement de gaz naturel local.

Al Reyadah, Abou Dabi Aux Émirats, ce site est entré en service en novembre 2016. Il capture le CO₂ produit par deux sites sidérurgiques (ce qui est une première mondiale), à hauteur de 800 000 tonnes par an. Le gaz est alors compressé et expédié via un pipeline de 41 km vers les deux gisements de pétrole Rumaitha et Bab, où il est injecté dans le cadre d'une opération de récupération assistée du pétrole⁴¹.

Projets Ils sont nombreux dans le monde, répertoriés par l'Agence internationale de l'énergie⁴² et en France par le BRGM⁴³.

Projets européens L'Europe espère que d'ici 2030, 14 % du CO₂ émis dans le monde sera stocké de la sorte, et qu'en 2050, 60 % des émissions mondiales du secteur de l'électricité pourrait être ainsi « éliminées », avec une réduction espérée de 87 % des émissions des centrales électriques équipées de système CSC.

Il existe plusieurs projets pilotes dans l'UE, ne concernant aujourd'hui que quelques dizaines de milliers de tonnes par an et pour une période plutôt courte, visant à valider la stabilité de formations géologiques et/ou les technologies utilisables.

- Miller⁴⁴, Royaume-Uni : le projet comprend la construction d'une centrale à décarbonisation utilisant du gaz naturel, et l'emploi du CO₂ dans le gisement *Miller* en mer du Nord.
- Ketzin, Allemagne : près de Berlin, ce projet de démonstration utilise une formation anticlinale dans un aquifère qui servit au stockage saisonnier de gaz naturel avant d'être abandonnée⁴⁵. Entre juin 2008 et août 2013 environ 67 000 tonnes de CO₂ ont été injectées sur ce site pilote de grès poreux à une profondeur de 630 m à 650 m ; un essai in situ de récupération de ce dioxyde de carbone stocké a été mené en octobre 2014⁴⁶.
- Lindach, Autriche : les sources seraient ici deux usines (pâte à papier et engrais) émettant 300 000 tonnes par an. Le *piège* serait un petit gisement de gaz épuisé.
- Gisement "Casablanca", Espagne : ce projet de séquestration utilise un ancien gisement de pétrole, mais sans récupération assistée : la production de pétrole sera définitivement arrêtée avant que l'injection de CO₂ commence. Ce petit gisement se situe au large de Tarragone et 500 000 tonnes par an de CO₂ provenant de la raffinerie de cette ville y seront enfouis.
- Lacq, en France (Aquitaine) a été le lieu du premier projet, porté par Total inauguré (pour les premières installations) le 22 janvier 2010, 5 ans après son annonce officielle⁴⁷, visant la démonstration de toute la chaîne d'oxycombustion, depuis la production d'oxygène à l'injection et stockage de CO₂ dans un gisement à terre de gaz naturel épuisé. Une chaudière existante sur le site de Lacq a été convertie à l'oxygène utilisant une technologie d'oxycombustion élaborée par Alstom, Air liquide⁴⁸ (partenaire technologique) fournissant l'unité de séparation d'air nécessaire à la production d'oxygène pur. Les fumées d'oxycombustion, dépourvues du ballast azote de l'air, sont composées majoritairement de CO₂ et de vapeur d'eau. Après condensation de l'eau, elles sont comprimées, séchées et transportées en tête du puits de Rousse, où elles sont recomprimées avant d'être injectées. Une importante étude géotechnique est faite, associant des partenaires industriels et universitaires, visant à garantir l'intégrité du réservoir et à obtenir un premier et précieux retour d'expérience sur ce pilote (un *pilote* de transformation de biomasse est également prévu dans le cadre d'un projet de recherche dit *Prebiom* public/privé piloté par l'institut français du pétrole, il ne traite que 2 kg/h en 2010 mais doit préfigurer une installation industrielle prévue pour 2013, devant traiter 300 kg/h de résidus agricoles et forestiers torréfiés à 250 °C puis broyé et injecté comme combustible de cogénération ou biocarburant *Veolia Environnement* a annoncé le 13 mars 2008 lancer une étude pilote de captage et stockage géologique de CO₂ à Claye-Souilly (77) où le groupe exploite déjà un centre de valorisation et de stockage de déchets. Le CO₂ issu de la combustion de biogaz (200 000 tonnes par an de CO₂ sur plusieurs années) sera injecté à plus de 1 500 m de profondeur dans un aquifère salin dépourvu d'intérêt écologique et économique. Le groupe fera appel à *Geogreen* filiale commune de l'IFP, du BRGM et de Géostock, créée en 2008, spécialisée dans le transport et stockage souterrain de CO₂.
- Les ports du Benelux organisent le lancement d'un projet géant de stockage du CO₂ qu'ils émettent dans d'anciens champs pétrolifères ou gaziers épuisés, à une vingtaine de kilomètres des côtes néerlandaises. Lancé en 2017 par le port de Rotterdam, ce projet est rejoint en 2019 par Anvers et l'alliance portuaire belgo-néerlandaise North Sea Port (Gand, Terneuzen et Vlissingue). Dénommé Porthos, pour « Port of Rotterdam Transport Hub & Offshore Storage », il nécessitera un investissement de quelque 400 à 500 millions d'euros. Ces ports et les entreprises qui y sont installées émettent jusqu'à 60 millions de tonnes de CO₂ par an et sont responsables d'un tiers des émissions de gaz à effet de serre dans le Benelux ; Rotterdam, premier port européen, produit à lui seul 15 % à 20 % des émissions

de CO₂ des Pays-Bas. Selon le calendrier envisagé, 2 à 5 millions de tonnes de CO₂ pourraient, dans un premier temps, être enfouies chaque année en mer du Nord, puis à terme 10 millions. Ce chantier impliquerait la construction d'un réseau de pipelines entre les installations portuaires et ces cavités sous-marines. Le trajet devrait en outre traverser les 40 kilomètres de la zone portuaire de Rotterdam afin de collecter le CO₂ émis par les sociétés qui y sont implantées. Ce réseau devrait être construit dès 2026. Les travaux de construction des autres pipelines reliant le port néerlandais à Anvers et aux autres ports de North Sea Port se dérouleraient entre 2026 et 2030⁴⁹.

Projets nord-américains

Les États-Unis ont une longue expérience de la technologie CO₂-EOR. Le principal objectif est maintenant de construire des centrales électriques équipées de séquestration du CO₂.

- Canada occidental : nombre de gisements de gaz de cette région contiennent une part appréciable de H₂S et de CO₂. Nombre d'opérateurs injectent ces gaz dans des aquifères ou des gisements épuisés. Ces opérations ont été entreprises dans le but de se débarrasser du H₂S, gaz très polluant, mais elles séquestrent aussi de petites quantités de CO₂.
- Rangely, Colorado : CO₂-EOR actif depuis 1986 utilisant une partie du CO₂ produit en association avec du gaz naturel et de l'hélium provenant du site de LaBarge.
- Gisements de pétrole du Wyoming : le CO₂, provenant également de l'usine de traitement de LaBarge, est acheminé vers plusieurs gisements *via* un nouveau pipeline. Il alimente principalement les deux grands gisements de *Salt Creek* (projet commercial d'Anadarko, visant surtout à la production de pétrole) et de *Teapot Dome* (projet public, privilégiant la séquestration du CO₂. Plusieurs gisements moindres seront reliés.
- Carson (Californie) : le projet comprend la construction d'une centrale à gazéification transformant les résidus de pétrole produits par une raffinerie en hydrogène, et l'utilisation du CO₂ (4 millions de tonnes par an pendant 10 ans à compter de 2011, ce qui en fait un des plus grands projets du monde) dans un gisement de pétrole.
- Centrale de Saskpower : cette compagnie électrique canadienne prévoit une centrale à charbon utilisant la technologie d'oxycombustion, d'une capacité de 300 MW, qui entrerait en service dès le début de la prochaine décennie si le projet est approuvé.
- New Haven, Virginie-Occidentale : annoncé⁵⁰ par *American Electric Power* en mars 2007, ce projet appliquera la séquestration post-combustion à une partie des gaz d'échappements d'une grande centrale à charbon. Environ 100 000 tonnes par an de CO₂ seront séquestrés dans un aquifère local, très profond. Le projet pourrait être opérationnel dès 2008, et devrait donner naissance à une version plus grande, installée dans l'Oklahoma, pour 1,5 Mt/an en 2010.
- Beulah (Dakota du Nord) : un million de tonnes de CO₂ par an seront capturés d'une centrale au charbon existante, et injectés dans le pipeline déjà construit pour le projet Weyburn. La capture sera post-combustion, à base d'ammoniac.
- Mount Simon (Ohio) : cette formation aquifère recevra 100 000 tonnes de CO₂ par an venant d'une usine d'éthanol. Ce projet mené dans le cadre du *Midwest Regional Carbon Sequestration Partnership* devrait démontrer la capacité de cette grande structure géologique à servir plus tard au stockage à plus grande échelle.
- Kimberlina (Californie) : une centrale Oxy-combustion DE 50 MW fournira un million de tonnes de CO₂ par an, qui dans le cadre du *West Coast Regional Carbon Sequestration Partnership* sera réparti entre plusieurs structures souterraines à la verticale de la centrale, pour comparer leur capacité à stocker le CO₂.
- Alberta (Canada) : le producteur d'engrais Agrium et la compagnie pétrolière naissante *Enhance Energy* ont signé un accord⁵¹ selon lequel du CO₂ provenant d'une usine d'engrais Agrium servira à la récupération assistée dans plusieurs petits gisements à partir de 2011.
- Occidental : cette compagnie pétrolière entend appliquer la technologie CO₂-EOR à plusieurs gisements du bassin permien actuellement à l'abandon ou proche de l'abandon. Le CO₂ viendra d'une nouvelle usine de traitement du gaz naturel, il s'agit donc d'une source anthropique. 500 millions de barils doivent être rendus extractibles⁵².

Autres projets

- Gorgon⁵³, Australie : autre projet en aquifère, associé à l'exploitation d'un groupe de gisements de gaz naturel contenant trop de CO₂. C'est un projet à très grande échelle, visant un total de 120 Mt de CO₂ sur 40 ans.
- Stanwell, Australie : une centrale à charbon, cousin du projet Futuregen américain, dont le CO₂ serait envoyé dans un aquifère. Si le projet est mené à bien, il pourrait être en opération dès 2010.

- Daqing, Chine : une petite partie de ce grand gisement de pétrole pourrait recevoir une injection de CO₂ (environ 1 million de tonnes par an) dès 2009, ce qui permettrait la production d'environ 30-40 000 barils/supplémentaire. Le CO₂ viendrait d'une centrale au charbon, les détails techniques ne sont pas connus. Le Japon est impliqué dans le projet⁵⁴.
- Sécunda, Afrique du Sud : Encore au stade des premières études, ce projet stockerait du CO₂ issu de la production de carburants synthétiques dans des veines de charbon.

B) DESCRIPTION ET DIFFICULTES DU CAPTAGE-STOCKAGE DU CO₂ (CSC)

La CSC reste à prendre au sérieux, son développement viendra de pays qui y ont un intérêt direct pour continuer à exploiter leurs ressources en gaz, pétrole et charbon. L'Europe du nord y porte intérêt par les possibilités de stockage en aquifère salin sous la Mer du Nord, mais son économie est loin d'être assurée et ses risques exigent une analyse approfondie.

On ne pourra jamais capter les émissions de CO₂ trop diluées et mobiles de la filière transports, qu'on ne pourra réduire qu'en amont par une révolution des carburants qui se prépare actuellement, ni les émissions du secteur habitat, qu'il faut réduire par une meilleure isolation thermique et des moyens de chauffage moins émetteurs (bois, pompe à chaleur, électricité à très bas carbone).

Les émissions concentrées (centrales thermiques, sidérurgie, cimenteries, poches souterraines ou soumarines de gaz naturel trop chargé en CO₂, puits de pétroles en fin d'exploitation...) sont fans la liste de l'annexe 7. Les coûts associés à ces technologies (ramenés à la tonne de CO₂ économisée ou au KWh sans CO₂ produit) sont encore trop élevés pour avoir permis un développement significatif du CSC jusqu'alors et probablement pas avant 2030..

Les émissions de CO₂ dispersée des transports et du chauffage ne semblent pas captables; le verdissement de ces usages portent donc sur le développement de moyens de chauffage moins émetteurs de CO₂ (biomasse, solaire, géothermie assistée par pompe à chaleur, électricité si celle-ci est produite sans émission de CO₂) et sur le remplacement à terme des carburants pétroliers par des vecteurs d'énergie moins émetteurs (biocarburants, électricité et hydrogène produit hors combustibles fossiles).

Les émissions concentrées, essentiellement celles des grandes centrales électriques brûlant du charbon (plus de 60 % de l'électricité mondiale est dans ce cas), l'idée de capter le CO₂ émis par ces centrales et de le stocker de manière durable et sûre est à l'ordre du jour depuis une trentaine d'années⁴⁵.

Entre ces deux classes extrêmes d'émetteurs se situent quelques industries (sidérurgistes et cimentiers) moyennement émettrices de CO₂, qui ne comptent pas sur la CSC trop lointaine et réduisent leurs émissions de manière déjà significative par des modifications de leurs procédés industriels.

Principes de la séquestration Il s'agit d'enfouir dans le sous-sol, massivement et de manière sécurisée, du CO₂ préalablement capté en sortie de chaudière ou turbines à gaz puis comprimé.

Captage du CO₂, aujourd'hui techniquement possible (déjà utilisé pour épurer le méthane de mauvais gisements), mais il est coûteux et énergivore (environ 20 % d'augmentation de la consommation d'énergie par le process global en 2010/2012²). Il n'est pas aujourd'hui économiquement rentable dans le cas du stockage ; l'Ademe dans son avis de 2013 évoque "des coûts élevés et des perspectives de baisse incertaines " et selon cette Agence « le coût de la filière CSC est évalué à 60 €/tonne de CO₂ évitée, dont les deux tiers pour le captage²».

Le CSC aurait une chance de se développer massivement si une pénalisation des émissions (que ce soit par le marché ETS, par taxation ou par réduction autoritaire) pouvait conduire le cours du CO₂ à un niveau qui puisse le justifier, supérieur à 50 €/tCO₂⁴⁶ dès 2030 et d'au moins 85€/tCO₂ en 2050, alors que depuis 2005 où le marché européen des droits d'émission a été mis en place, il a présenté, par suite de ses défauts de jeunesse, des prix du CO₂ erratiques et très en dessous de ces seuils. Avant d'atteindre ces seuils, nous sommes dans une phase préparatoire où se décantent les filières de capture et où s'expérimentent quelques pilotes de stockage.

Difficulté supplémentaire : le gaz capté n'est pas du CO₂ pur, il contient jusqu'à 10 % de « gaz annexes » (généralement il s'agit d'Ar, N₂, O₂, SO_x et NO_x très réactifs; On doit veiller aux interactions possibles avec la roche du réservoir (risques de fuites pae porosité ou fissuration).Pour travailler avec des gaz d'échappement plus propres, Des projets de centrales électriques « propres » capable de capter le CO₂ existent, par exemple *via* l'extraction des gaz d'échappement de la chaudière ; système qui pourrait être adapté à des centrales existantes. Mais cela consomme beaucoup d'énergie : environ le quart de la production d'une centrale à charbon. Ce type de procédé est

⁴⁶ Ce sont des Euros 2009

donc accompagné, à puissance nette produite égale, d'une augmentation¹² locale de la pollution de l'air (+ 11 % des émissions de NO_x et + 17,9 % de SO_x dans le cas d'une centrale au charbon en raison de l'augmentation de consommation de combustible. La désulfuration des fumées demandera une quantité plus importante de chaux et le traitement des NO_x consommera plus d'ammoniaque.

Pour diminuer l'opération très coûteuse de séparation des gaz en aval, on a eu l'idée de brûler le combustible avec de l'oxygène pur et maintenir une température de combustion adéquate en remplaçant l'azote de l'air par du CO₂ recirculé. Mais cette méthode demande de produire une quantité importante d'oxygène, ce qui est également coûteux et/ou consommateur d'énergie, si bien qu'en termes de bilan énergétique, il n'y aurait pas d'avantage significatif (sur le plan énergétique) par rapport à la séparation du CO₂ dans les fumées.

La décarbonisation du combustible est très étudiée : il s'agirait par des réactions chimiques dite de gazéification dans le cas des combustibles solides, ou de reformage dans le cas du gaz, de convertir le combustible en un mélange de CO et d'hydrogène, Le CO peut alors fournir de l'hydrogène et du CO₂ supplémentaires par réaction avec de la vapeur d'eau. L'hydrogène et le dioxyde de carbone se séparent aisément, et l'hydrogène peut alors alimenter une centrale électrique (turbines ou piles à combustible), servir à la pétrochimie, au raffinage pétrolier, ou à la production d'engrais, avec un rendement énergétique final meilleur et une centrale multiproductrice (cogénération + production d'hydrogène). Le gaz de synthèse pourrait contribuer à produire du benzène, propylène ou méthanol, bases d'autres synthèses chimiques plus complexes (dont plastiques).

Transport Après son captage, le CO₂ doit être transporté jusqu'au lieu de son stockage, par canalisations, à l'état supercritique, ou par navires pour plus de 1000 km, sous forme liquéfié.

Stockage : Si le captage et la partie sécurité du stockage sont entre les mains des industriels multinationaux et des instituts de recherche, l'inventaire des capacités de stockage est mené par les nations qui ont besoin de se doter de ces capacités, et élaborent des atlas des possibilités souterraines. Plus de 90 % des capacités mondiales de stockage se situent dans les aquifères salins profonds.

Le CO₂ est injecté dans des formations rocheuses profondes sous forme supercritique via des puits dans des roches perméables situées sous des formations jugées suffisamment hermétiques. Lieux utilisés :

- **Les gisements de gaz naturel et de pétrole sont les candidats les plus cités** pour y séquestrer du CO₂. L'injection de CO₂ dans des gisements pétroliers étant d'ailleurs déjà pratiquée depuis des décennies (surtout au Texas), à des fins de récupération assistée : acidifiant (et puissant pouvoir solvant du CO₂ supercritique), le CO₂ aide à récupérer une partie du pétrole résiduel de gisements difficiles ou en baisse de production. Néanmoins, la grande majorité des projets de récupération assistée à base de CO₂ (CO₂-EOR, pour enhanced oil recovery) entrepris jusqu'à présent utilisent du CO₂ issu de sources naturelles. C'est une option attrayante pour les pétroliers qui espèrent pouvoir compenser les coûts économiques et énergétiques du stockage par la récupération de pétrole supplémentaire qui serait extrait après injection de CO₂. Cependant, les gisements de pétrole sont souvent éloignés des grandes sources de dioxyde de carbone et les anciens champs pétrolifères sont peu utilisables (on y a déjà injecté de l'eau de mer, ou du gaz, et le substrat a pu se colmater). Cette solution pose un autre problème préoccupant pour le climat : on sait avec certitude depuis 2012-2013^{8,9} que le CO₂ injecté dans un substrat salin prend alors facilement la place du CH₄ qui était éventuellement déjà présent ; le front de CO₂ chassant ainsi le méthane qui remontera plus facilement vers des nappes qu'il pourra contaminer (en s'y dissolvant), ou vers la surface où il pourrait accélérer le réchauffement climatique bien plus vite que ne le ferait un volume équivalent de CO₂¹⁰
- **Les aquifères salins** sont géologiquement assez comparables aux gisements d'hydrocarbures, mais avec une capacité bien plus grande. Plusieurs mécanismes de piégeage (structural, capillaire, par dissolution et par minéralisation) semblent pouvoir y immobiliser le CO₂, avec moins de risque de fuite que dans les bassins houillers ou certains champs pétrolifères criblés de puits et parfois victimes d'affaissements. Leur répartition homogène dans le monde diminuerait les besoins de transport du CO₂, mais ils sont mal connus et leurs saumures ne semblent pas pouvoir être vendues pour rentabiliser l'opération comme on peut le faire dans les champs gaziers et pétrolifères avec le gaz ou le pétrole poussés par le CO₂ injecté.
- Le méthane des **veines de charbon** non exploitées pourrait être exploité et remplacé par du CO₂, la vente du méthane finançant le stockage du CO₂. Réinjecter du gaz dans les pores du charbon est théoriquement possible si les couches ne se sont pas tassées après extraction. Des pilotes expérimentaux testent cette solution, qui pourrait éventuellement être associée à la gazéification du charbon, si des méthodes probantes et sécurisées étaient développées. L'utilisation de bassins houillers souterrains déjà exploités est quasi impossible en raison des affaissements miniers qui ont suivi l'exploitation (bassin du Nord de la France ou lorrain par exemple). Des problèmes liés au gonflement du charbon et de pertes de perméabilité se posent.

POINTS DURS DU DEVELOPPEMENT DU CSC

Le **captage** est coûteux en investissement et surtout en perte de rendement actuellement estimée à environ 25 à 30%, par la consommation énergétique des auxiliaires de captage. Le rendement des centrales les plus modernes chuteraient alors de ~45% vers ~35%, régressant alors, au milieu du XXI^{ème} siècle, au niveau de la moyenne mondiale de la fin du XX^{ème} siècle. Un enjeu technologique important est donc de réduire la perte de rendement entraînée par le captage.

Le **stockage** est moins coûteux que le captage. La réalisation des stockages et le transport jusqu'aux stockages nécessitent une énergie dont il faut tenir compte dans la perte de rendement global. Des réalisations pilotes sont en exploitation depuis plusieurs années : à Sleipner en Mer du Nord, à Weiburn au Canada, à In Salah en Algérie, on stocke dans chacun de ces sites environ 1 MtCO₂/an, depuis près de 30 ans pour Sleipner, mais pour réduire seulement de 20% les émissions mondiales annuelles (30 GtCO₂/an), il faudrait l'équivalent de 6000 "Sleipner". La faisabilité technique et l'acceptation sociétale du CSC ne sont pas acquises, l'étanchéité des sites n'étant pas démontrée⁴⁷, compte tenu de l'acidification du milieu en présence d'eau pouvant initier des fissurations⁴⁸ ; par ailleurs, les problèmes juridiques restent à clarifier.

LE COÛT GLOBAL EST LE PRINCIPAL POINT DUR Il comprend les coûts de captage, filtration, compression, transport, injection, et creusement de cavités ad hoc et des mesures de suivi et de sécurité nécessaires.

Le coût du captage varie en 2019 entre 15 € par tonne de CO₂ captée dans une centrale à gaz et jusqu'à 100 euros la tonne sur un site sidérurgique et même 120 euros dans une cimenterie. Selon l'AIE, 450 millions de tonnes de CO₂ pourraient être captées et stockées dans le monde avec une subvention de moins de 40 € par tonne.

Le seul coût du captage en sortie d'une centrale thermique était estimé en 2013 entre 20 et 40 € par tonne de CO₂, ce qui conduit par exemple à un coût de 4 à 11 milliards d'euros par an pour capter le carbone émis par les centrales à charbon allemandes. Le coût du transport par gazoduc varie de 0,5 à 15 € par tonne et par centaine de kilomètres. Une partie de ces coûts pourrait être compensée par la valorisation du carbone récupéré. celui-ci peut notamment être injecté dans certains puits de pétrole pour en chasser les hydrocarbures (« récupération assistée »). Une petite partie des coûts pourrait aussi être prise en charge de la commercialisation de CO₂ comme solvant ou réfrigérant (neige carbonique) ou comme produit chimique utile dans certains procédés (intermédiaires chimiques pour la chimie organique ou la production de carburants de synthèse

Actuellement de l'ordre de 60€/tCO₂, il devra rejoindre au plus vite le prix du marché du CO₂ si on veut pouvoir espérer un petit effet sur le climat. Des objectifs à long terme plus ambitieux, de 20 €/tCO₂ en Europe et de 10 US\$/t CO₂ aux Etats-Unis (DOE) sont visés, qui permettraient d'accélérer la conversion vers le CSC. Pour espérer un effet significatif sur le climat, il faudrait en enfouir environ 3,5 milliards de tonnes par an, soit l'équivalent de 28,6 milliards de barils de pétrole (à titre de comparaison on extrait du sol dans le monde 27 milliards de barils de brut par an). Cette solution est limitée aux sources de CO₂ fixes et importantes (centrales électriques thermiques, industries chimiques, sidérurgiques, cimenteries...). Généralement, la limite inférieure considérée est de 100 000 tonnes de CO₂ par an.

À quel prix pourra-t-on développer le CSC ? Selon Mc Kinsey, le coût pourrait se situer entre 30 et 45 €/tCO₂ en 2030. Ce prix rendrait les installations rentables pour un prix du CO₂ anticipé par de nombreux instituts entre 30 et 50 euros à cette échéance (même si des experts le voient à un niveau bien supérieur) fourchette qui va de pair avec l'hypothèse où l'on adopterait des politiques « facteur 4 » partout dans le monde développé.

Quelques tendances favorables

Au cours de la période actuelle de décarbonation des filières de capture et d'expérimentation de pilotes de stockage, certaines tendances se manifestent : Parmi les diverses variantes étudiées pour le captage, le marché de mise à niveau des centrales récentes à bon rendement favorise le captage postcombustion qui est le seul pouvant être implanté sur des centrales existantes, alors que pour les centrales en projet, l'oxycombustion ou le captage précombustion permettant la séparation de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone sont considérées par certains comme les technologies d'avenir, l'IGCC (Integrated gasification combined cycle) pouvant être associé à la poly-génération électricité-hydrogène+captageCO₂, au développement des biocarburants de seconde génération, à la production de pétrole ex charbon. De telles installations, fort complexes, se prêtent très mal aux variations de charge.

Le taux de captage de CO₂ attendu de toutes ces filières est de l'ordre de 90%; lorsqu'on compte l'augmentation de la consommation de charbon due au procédé et les émissions diffuses de CO₂ lors du transport du charbon, le CSC doit permettre de diviser par 4 ou 5, et non par 10, les rejets de CO₂, soit un rendement effectif de 75 à 80 %.

⁴⁷ On a notamment repéré en 2012 une fracture de 12 km du fond marin recouvrant la zone d'injection de CO₂ de Sleipner en mer de Norvège, où une injection de l'ordre du million de tonnes par an fonctionnait depuis 1996 (Le Monde du 21 avril 2012)

⁴⁸ Chaque site a ses caractéristiques propres, nécessitant des études longues et coûteuses et dont l'issue est incertaine (B. Durand captage et stockage du gaz carbonique www.sauvonsleclimat.org)

LES RISQUES CONSTITUENT UN AUTRE POINT DUR

Risques de fuites Le CO₂ est acidifiant et corrosif, il est en outre solvant sous forme liquide. Il peut donc interagir avec les roches, les canalisations métalliques et le béton des puits. Des exemples naturels laissent penser que la séquestration longue durée est possible à condition de maîtriser le colmatage durable des puits d'injection : certains gisements de gaz naturel contiennent une proportion importante de CO₂, conservé sous pression depuis des millions d'années. Néanmoins, des fuites naturelles existent, parfois mortellement brutales comme dans le lac Monoun (1984) ou dans le lac Nyos où l'émission soudaine d'une énorme « bulle » de CO₂ a, en 1986, tué plus de 1 700 personnes et des milliers d'animaux. Cependant, une configuration semblable au lac Nyos (lac méromictique de cratère) est extrêmement rare. Il existe aussi des gisements étanches de CO₂ tels qu'à Montmiral (Drôme, France) par exemple. En cas de fuite, le gaz sous pression monte dans l'atmosphère, où il se refroidit rapidement, et redescend en chape sur la zone environnante. Dans le cas d'une fuite massive, il y a risque d'asphyxie.

Risques d'asphyxie : En plus d'être un gaz à effet de serre, le CO₂ est un gaz plus lourd que l'air, asphyxiant s'il chasse l'oxygène présent, acide lorsqu'il est dissous. Ainsi, un relargage massif et brutal de grande quantité de CO₂, dans une vallée ou une zone urbanisée aurait des conséquences humaines et écologiques immédiates graves à mortelles (dans le pire des scénarios, asphyxie immédiate des humains et animaux).

– à 4 % dans l'air, le CO₂ entraîne des effets irréversibles sur la santé humaine ;

– à 10 % dans l'air, le CO₂ entraîne la mort par asphyxie en 10 minutes.

Aux lacs Monoun et Nyos, la nappe de CO₂ descendant de ces lacs de cratères a tué plusieurs milliers de personnes et d'animaux.

Risques de fuites diffuses en théorie possibles au niveau des puits d'injection ou d'observation, s'ils perdent leur étanchéité en raison de défauts de réalisation ou à la suite du vieillissement des matériaux au contact du CO₂¹³, ou à la suite d'événements sismiques. D'éventuelles variations locales de la porosité de la roche, la réactivation possible de failles et les effets de la microsismicité induite par la mise sous pression de la roche-réservoir ou d'une *cavité creuse* doivent être envisagées.

Risque sismique : Après que le GIEC ait considéré que le stockage était l'une des solutions envisageables, des géologues américains, experts en géo-mécanique ont estimé que le stockage géologique du CO₂ risquait lui-même d'accroître le risque sismique et de « compromettre l'étanchéité des poches géologiques contenant le CO₂ séquestré » notamment en rouvrant des failles endormies. Au même moment, un rapport (15 juin 2012) publié par l'Académie américaine des sciences, concluait aussi que cette séquestration géologique du CO₂ « peut potentiellement induire des tremblements de terre importants » (plus important qu'avec la fracturation hydraulique telle qu'utilisée pour le pétrole ou le gaz dans les schistes bitumineux).