

LA DOXA¹ ET L'EXPERTISE SERONT-ELLES CONCILIAIBLES DANS LA TRANSITION ÉNERGETIQUE?

Gilbert Ruelle – Académie des technologies - Commission énergie et changement climatique

L'information du public sur l'énergie est souvent incomplète et déformée par certains médias. Il en résulte une doxa qui est un mélange de foi dans les énergies renouvelables, de consentement contradictoire à utiliser tant qu'il sera possible les énergies fossiles malgré leur influence néfaste sur le climat, et de méfiance, voire de rejet de l'énergie nucléaire dont les risques sont jugés incomparables avec ceux des autres sources d'énergie, qui fait du nucléaire un sujet tabou où l'émotionnel rend souvent le discours rationnel inaudible.

L'objectif de ce papier est d'enrichir cette doxa d'informations factuelles et incontestables souvent méconnues du public, afin de lui permettre un jugement plus élaboré..

La "transition énergétique", en débat dans de nombreux pays, recouvre, selon les pays et les acteurs, un éventail de sens allant d'une maîtrise améliorée de la consommation d'énergie à une sortie du nucléaire, avec en toile de fond un développement très poussé des énergies renouvelables, et en objectif ambitieux une réduction drastique des combustibles fossiles, ou de leurs émissions de CO₂, et le rêve du développement de l'hydrogène-énergie.

Le cap annoncé de cette transition reste toutefois en France la lutte contre le réchauffement climatique comme l'a rappelé le Président de la république dans son discours d'inauguration de la Conférence environnementale le 15 septembre 2012

Devant un tel éventail de contenus du terme "transition", Il est utile d'en chercher les origines dans le ressenti du public face aux différents points de vue du panorama énergétique.

PREMIER RESENTI GENERAL : LES ENERGIES RENOUVELABLES SONT SEDUISANTES

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

Contrairement aux énergies fossiles primaires (charbon, pétrole, gaz) que l'on ne peut transformer en énergie utilisable que par une combustion qui émet des gaz à effet de serre dégradant le climat, les EnR ne présentent pas cet inconvénient; celles qui sont basiquement mécaniques (hydraulique, éolien) se transforment en énergie utile sans passer par une combustion émettrice de gaz à effet de serre; seule la biomasse est une énergie thermique dont la combustion est émettrice de GES, , mais il y a alors théoriquement une compensation entre émissions de CO₂ de la biomasse brûlée et son absorption par celle qui repousse.

Le soleil et le vent étant des ressources assez bien distribuées, les EnR offrent donc une certaine sécurité d'approvisionnement, et donnent ainsi naissance au concept populaire d'énergie décentralisée, chacun pouvant produire l'énergie qu'il consomme ou la trouver à proximité sans nécessiter de grands réseaux de transport. Etant des énergies de faible densité, elles sont de taille plus modeste que les grandes énergies thermique ou nucléaire, plus à échelle humaine.

De plus, elles ont une apparence de gratuité car il n'y a pas de combustible à payer. Comment ne pas être favorable aux énergies renouvelables ? et qui peut être contre l'idée de les développer au maximum ?

¹ La **doxa** est l'ensemble – plus ou moins homogène – d'opinions (confuses ou non), de préjugés populaires ou singuliers, de présuppositions généralement admises et évaluées positivement ou négativement, sur lesquelles se fonde toute forme de communication, sauf celles qui tentent précisément à s'en éloigner, telles que les communications scientifiques (Wikipédia).

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

Tout homme soucieux d'écologie ne peut être que favorable à une limitation de l'usage des énergies fossiles puisqu'elles ne sont pas durables, étant constituées d'un stock épuisable en quelques générations au rythme croissant de leur exploitation. Elles sont de surcroît cause de pollutions locales, et la cause principale du réchauffement climatique, dont le danger, régulièrement évalué par le GIEC, se confirme d'année en année.

On observe cependant que la crise économique qui dure fait passer cette préoccupation climatique derrière celles de l'emploi et de l'équilibre économique, et qu'une tendance actuelle dans beaucoup de pays est de continuer à utiliser ces sources fossiles en fermant (au moins provisoirement) les yeux sur le climat, car chacun sait que ces énergies fossiles se sont révélées les plus faciles et les moins coûteuses à exploiter, que le charbon au 19^{ème} siècle, le pétrole et le gaz naturel au 20^{ème} siècle, sont à l'origine du développement économique dont le monde entier a bénéficié au cours des deux derniers siècles, et continuent à l'être pour les pays en développement. Elles représentent encore 80% de la consommation mondiale d'énergie primaire.

Les avantages économiques et stratégiques immédiats des énergies fossiles sont si importants qu'ils l'emportent sur les conséquences climatiques plus lointaines.

TROISIEME RESENTI GENERAL : LE NUCLEAIRE SUSCITE UNE CRAINTE DIFFUSE

Sans remonter à l'usage militaire de l'atome, son application civile à la production d'énergie électrique confirme la puissance de mystérieuse de cette source, où la fission d'un gramme d'uranium fournit la même énergie électrique que la combustion de 2,2 tonnes de charbon.

S'y ajoute que le risque induit sur l'homme par les rayonnements ionisants accompagnant les réactions nucléaires reste chargé de mystère dans le ressenti populaire, perçu comme encore insuffisamment connu puisqu'il continue à faire l'objet de débats d'experts sur la validité de la loi linéaire sans seuil² oet l'hormésis³. Ce risque est évocateur de conséquences décalées dans le temps telles que cancers, et présente un caractère durable car les combustibles nucléaires usés restent radioactifs pendant des siècles à l'état de déchets qu'il faut savoir gérer. .

Le niveau de formation scientifique du public moyen est généralement insuffisant pour lui permettre d'établir sa propre évaluation de du risque à partir des informations (et désinformations) dont il dispose dans les médias courants, et il doit déléguer sa confiance à des organismes tiers dont il doit évaluer la compétence et l'objectivité.

Comment donc ne pas être réservé vis-à-vis d'une énergie aussi puissante et aussi mystérieuse aux yeux du grand public? Le nucléaire a donc ceci de particulier que sa perception sociale est dominée par son aspect risque, contrairement aux autres sources d'énergie pour lesquelles cet aspect existe depuis longtemps, mais ne fait plus la une des médias.

Il en résulte une exigence croissante d'une sûreté d'exploitation au plus haut niveau, face à tous types d'accidents ou d'actions humaines imaginables, très au-delà de celle exigée d'autres installations industrielles quant à la prévention et la limitation des risques. Les deux grands accidents ayant provoqué des fuites de radioactivité à Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011 ont réactivé cette exigence, en faisant découvrir au public qu'il n'est pas simple de contrôler les réactions nucléaires si on ne dispose pas de moyens de refroidissement puissants et redondants dans toutes les circonstances imaginables de catastrophe externe à la centrale (inondation, tremblement de terre, attentat...), y compris après arrêt du fonctionnement du réacteur.

² Loi simplificatrice suivant laquelle l'effet d'une dose de rayonnement est proportionnel à la dose reçue, sur toute l'échelle de valeur des doses. Il est maintenant admis par les spécialistes qu'il existe un seuil, d'au moins 100 mSv/an, en dessous duquel aucun effet pathologique n'a jamais pu être observé.

³ 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.

CONSEQUENCE DE CES TROIS CONSTATS: UNE DOXA POPULAIRE S'EST ETABLIE

La doxa moyenne qui résulte de ces trois constats est un mélange de foi un peu bucolique dans les énergies renouvelables, de consentement contradictoire à utiliser tant qu'il sera possible les énergies fossiles faute de mieux, mais peut-être pas si nuisibles au climat si on développe la CSC⁴, et enfin 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. .

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

La plupart des pays n'ont pas encore parfaitement intégré le retour d'expérience de l'accident nucléaire le plus récent de Fukushima, prennent le temps d'évaluer les risques de leur propre parc de centrales nucléaires, variables selon les filières initialement retenues et leur degré de modernisation, renforcent leur sécurité et hésitent à définir clairement leur mix énergétique futur entre économie et risque:

- Les pays émergents grands émetteurs de CO₂ poursuivent l'exploitation des combustibles fossiles dont ils disposent. Ils développent en parallèle l'énergie nucléaire et dont ils estiment les risques raisonnables et développent aussi les énergies renouvelables en complément dans un mix énergétique visant à réduire un peu les émissions de CO₂,
- Aux Etats-Unis les ombres du peak-gaz 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.
- Certains pays accordent un poids plus grand au troisième terme de cette doxa et s'orientent vers une réduction (France), voire une exclusion programmée de la part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique (Allemagne, en n'envisageant qu'à plus long terme l'abandon des énergies fossiles dont ils disposent sur leur territoire national), choisissent un modèle énergétique contenant un taux de plus en plus élevé d'énergies renouvelables dans le mix énergétique, allant dans certains pays jusqu'à 80 ou 90%.

Une évolution aussi radicale vers une si nouvelle répartition des rôles des différentes sources d'énergie exige d'en évaluer la justification en approfondissant ses fondements sur trois points :

1. Les caractéristiques des EnR permettront-elles une utilisation pour la production électrique aussi massive dans des conditions économiquement et écologiquement acceptables ?
2. Peut-on fermer les yeux sur les conséquences climatiques de l'usage des énergies fossiles? Est-il réaliste d'espérer réduire rapidement et fortement cet usage? Ou pourra-t-on réduire leur nuisance par captage et stockage du CO₂ émis dans un délai acceptable?.
3. Comment se comparent objectivement les risques et les avantages des différentes sources d'énergie ? Le refus de l'énergie nucléaire sur la base de risques spécifiques incomparables à ceux des autres sources est-il fondé sur les faits et sur un examen rationnel?, ou n'est-il pas dominé par un émotionnel entretenu?

C'est ce que nous nous proposons d'analyser dans les pages qui suivent, chacune des parties 1, 2 et 3 essayant de répondre à chacune des trois questions ci-dessus.

⁴ CSC = captage et stockage du CO₂

PARTIE 1 : UTILISER AU MAXIMUM LES ENERGIES RENOUVELABLES

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

1. Les développer au maximum de leur capacité?, abstraction faite de leur coût?

L'image d'éternité des énergies renouvelables donne à penser que leur capacité n'est pas limitée, Mais on ne peut en tirer plus que leur flux naturel, réduit du rendement des convertisseurs d'énergie utilisés pour leur exploitation.

L'idée que l'énergie du vent et du soleil sont gratuites est quelquefois ancrée dans l'opinion car il n'y a pas de combustible à payer. Ce raisonnement est trop sommaire, car tout comme le vent, les combustibles fossiles sont un don gratuit de la nature et ne coûtent rien en eux-mêmes. C'est leur mise en œuvre qui est coûteuse !

Il est donc important de comprendre que ce n'est pas la ressource qui est coûteuse, mais l'accès à la ressource qui exige des investissements élevés pesant sur le prix du kWh. Il en est de même de toutes les formes d'énergie, mais l'accès aux énergies renouvelables coûte plus cher que celui aux autres (l'exception étant l'énergie hydraulique) parce que ce sont des énergies très diluées (de faible densité surfacique ou volumique). Les lois de la physique imposent qu'extraire une énergie diluée est plus coûteux en investissements (volume de matériaux, complexité, emprise au sol)⁵, que pour les énergies fossiles qui sont beaucoup plus concentrées. Aussi, en dépit de la gratuité évidente de l'énergie entrante (vent, courant d'eau, rayonnement solaire), le coût de l'énergie utilisable par le consommateur est plus élevé que celui de l'énergie issue de combustibles fossiles.

Cet investissement est plus réduit en cas d'un usage thermique direct de l'énergie, ce qui est possible pour la biomasse, le solaire et la géothermie, car on y évite le faible rendement du cycle de Carnot au passage de la forme thermique à la forme mécanique, mais pas pour les énergies spontanément mécaniques comme l'éolien et les énergies marines.

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

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

Notons aussi que le plafonnement de capacité des EnR n'est pas que d'ordre économique, il est aussi d'ordre sociétal, par la concurrence sur l'occupation des sols, des côtes et des mers, par la conservation des paysages...etc. De ce fait, leur potentiel global est difficile à évaluer avec précision, mais, à la louche, en France où la consommation annuelle d'énergie primaire va être

⁵ Un exemple simple est la comparaison d'une turbine hydraulique et d'une éolienne : la puissance délivrée par une turbine est proportionnelle à sa surface balayée (carré du diamètre), à la densité du fluide qui la traverse, et au cube de la vitesse de ce fluide. L'air ayant une densité 1000 fois plus faible que l'eau, il en ressort que pour fournir la même puissance, le diamètre d'une turbine à air doit être environ $1000^{1/2}$, soit ~30 fois plus grand que celui d'une turbine hydraulique pour des vitesses de fluide comparables, d'où des éoliennes de 100 mètres de diamètre pour produire 3 MW alors qu'une turbine hydraulique de 3 mètres y suffit.

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

dans cette décennie d'environ 250 à 300 Mtep⁶, les potentiels de participation de chacune des EnR pourraient se situer dans les ordres de grandeur ci-dessous :

- biomasse ~ 35 à 45 Mtep (chauffage, biocarburants), soit ~15 % de cette consommation
- géothermie ~15 Mtep, (chauffage), soit ~5 %
- solaire thermique ~10 Mtep (eau chaude sanitaire, contribution chauffage), soit ~3 %
- éolien à terre ~100 TWh (8,6 Mtep), probablement limité vers 30 TWh par des contraintes environnementales, sociétales et économiques, soit ~6 % de la production électrique
- éolien en mer en phase de lancement, plus difficile à pronostiquer, dépendra de la réduction de son coût, actuellement très élevé, par une industrialisation massive.
- solaire photovoltaïque, actuellement de l'ordre du pour-cent, dépendra de l'évolution de son prix actuellement loin de la "parité réseau" si celle-ci est correctement évaluée compte tenu de son intermittence et du transport de sa revente.

2. Les développer au maximum de leur possibilité d'insertion dans le réseau électrique ?

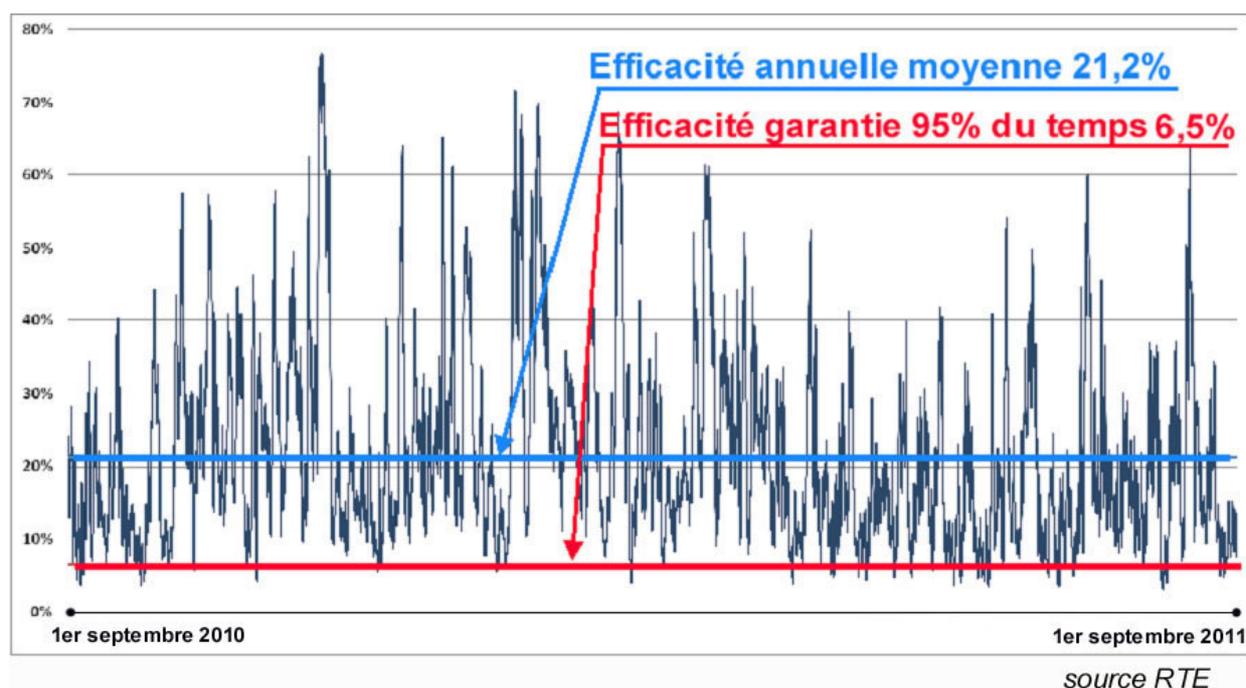
Les deux énergies renouvelables qui disposent du plus grand potentiel de développement, l'éolien et le solaire sont des énergies intermittentes.

Les formes d'intermittence de ces deux énergies sont différentes, celle du soleil étant beaucoup plus prévisible (jour/nuit, couverture nuageuse moyenne) de même que sa variabilité journalière assez cohérente avec la demande de mi-journée, et saisonnière à contretemps des besoins; mais de toute manière sa très faible part actuelle dans le mix énergétique (de l'ordre du pourcent) ne fait pas de son intermittence une préoccupation majeure pendant cette décennie.

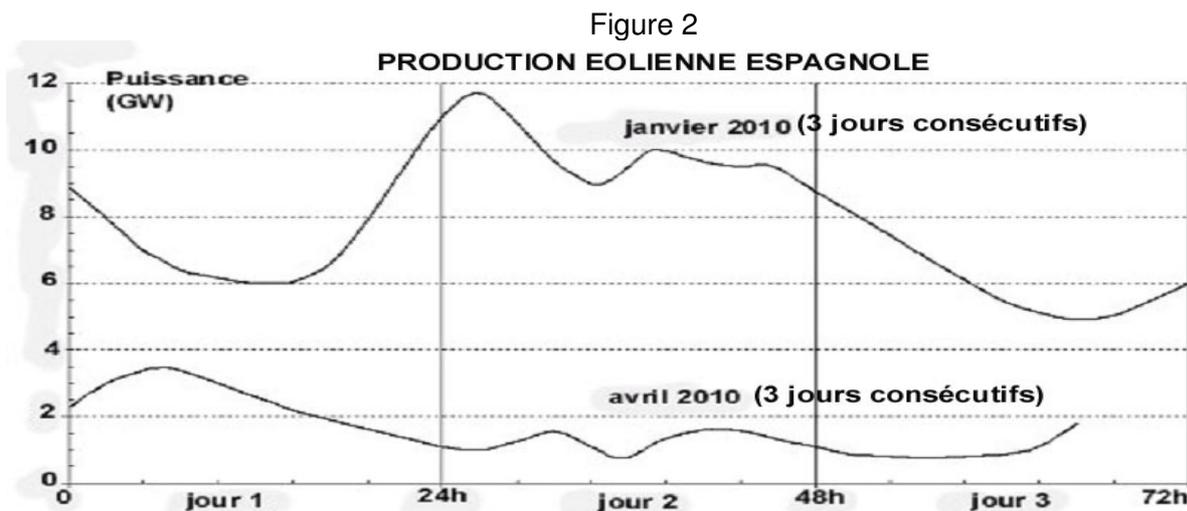
Par contre, l'intermittence de l'éolien est beaucoup plus préoccupante, car particulièrement élevée comme le montre la figure 1, et mal prévisible. La raison en est qu'une éolienne n'est performante que pour des vents compris entre 40 et 95 km/h, car sa puissance variant à peu près comme le cube de la vitesse du vent peut fortement varier en quelques heures, par exemple passer en 6 heures d'un extrême à l'autre (figure 2).

Pour les vents très forts, la puissance est nulle par mise à l'arrêt de sécurité.

Figure 1 Puissance fournie/Puissance installée en France sur un an



⁶ Dont près de la moitié pour produire 500 à 750 TWh d'électricité (1 tep = 11,6 MWh)



Il en résulte que pour une puissance installée donnée, la puissance moyenne délivrée au long de l'année n'est que 20 à 35% de cette puissance (coefficient de charge).

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

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

La prévisibilité de l'éolien est très liée à la météorologie, assez bonne à 24 heures, ce qui permet d'établir un plan de charge approché. Elle est à peu près nulle à moyen et long terme. La variabilité à court terme n'est malheureusement qu'assez peu atténuée par le foisonnement qu'on peut espérer dans un réseau couvrant des zones climatiques variées⁷.

• LES CONTRAINTES RESEAU

Sauf mesures de contrôle de la consommation, la distribution d'électricité n'a pas le droit d'être intermittente. Un réseau électrique doit donc être capable de fournir de l'électricité à tous ses clients, dont la demande n'est prévisible que statistiquement et approximativement par la compilation des consommations antérieurement observées dans les circonstances analogues de saison, date, d'horaire, et de météorologie.

Comme l'électricité ne peut se stocker directement, et que son stockage indirect est coûteux, la production n'a qu'un droit très limité à l'intermittence, et c'est à elle de s'adapter instantanément à la demande, ce qui exige que le gestionnaire du réseau dispose à tout moment d'une réserve de puissance qu'il puisse mettre très rapidement en service.

Si une part importante de cette production, dite non commandable, présente une forte variabilité et des intermittences imposées par la nature des sources, les centrales de production commandables héritent de la responsabilité totale de l'ajustement entre demande variable et production variable. Elles doivent donc disposer de puissants moyens de réaction rapide. Si ces

⁷ Dans une étude bien documentée, H. Flocard et J.P. Pervès extrapolent à l'ensemble de l'Europe (*Intermittence et foisonnement de l'électricité éolienne en Europe de l'ouest*, ww.sauvonsleclimat.org); cette étude confirme la très grande variabilité de l'éolien au niveau européen.

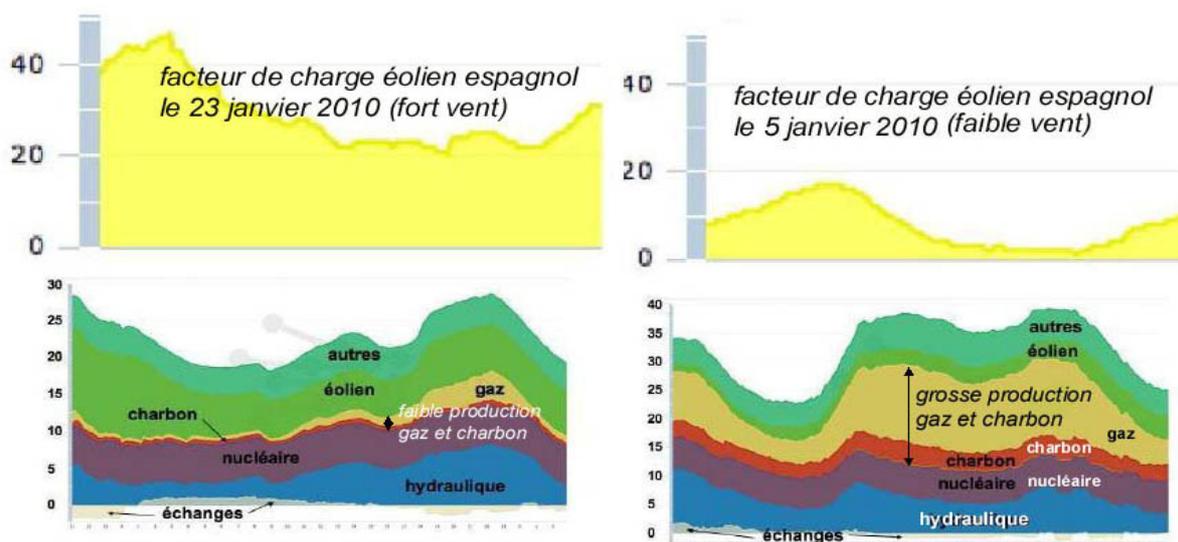
moyens sont insuffisants, l'importance et la rapidité des fluctuations de l'éolien et du solaire limitent de facto leur contribution à la production d'électricité, qui ne peut être que minoritaire.

Quels sont ces moyens ?

- Dans les premières secondes, ce sont les automatismes de réglage de la puissance délivrée par les turbines qui interviennent en surchargeant momentanément les générateurs déjà en service,
- Puis; dans les minutes qui suivent, le dispatching appelle les réserves d'énergie disponibles, soit en modulant la puissance des centrales thermiques déjà en service, soit en mettant très rapidement sur le réseau des turbines à combustion supplémentaires qui étaient en stand-by, soit en faisant appel au stock indirect d'énergie électrique que constituent les grands barrages et les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) qui pompent de l'eau la nuit lorsque les besoins en électricité sont faibles, et la restitue valorisée aux heures de pointe, soit encore en transportant de l'énergie électrique sur de longues distances pour mutualiser les sousproductions et les surproductions entre régions plus ou moins éloignées.
- Enfin, en dernier ressort, en accordant intelligence et autorité au réseau pour lui permettre de couper autoritairement certaines consommations non prioritaires pendant les périodes d'intermittence, ou inversement de couper certaines surproductions en imposant une jachère temporaire à des éoliennes dont la surpuissance momentanée met en péril la stabilité du réseau.

Le moyen le plus largement utilisé est l'appel à des centrales thermiques à charbon ou des turbines à gaz pendant les périodes de faible vent. La figure 3 illustre cette pratique en montrant comment s'opère cette compensation en Espagne. Le même exemple pourrait être trouvé dans les autres pays charbonniers (Allemagne, Espagne, Danemark). Lorsque ces centrales thermiques existent et constituent le principal moyen de production électrique (pays ci-dessus), l'éolien permet de réduire partiellement l'appel à ce type de production émetteur de CO2.

Figure 3 Compensation de l'éolien par le charbon en Espagne (source F. Livet)



Ces nécessaires compensations de la variabilité de l'éolien (et bientôt du solaire photovoltaïque) limitent la part de ces énergies intermittentes à un taux dépendant des moyens disponibles pour secourir le réseau en cas de défaillance des sources (thermique à démarrage rapide, déstockage, importation d'énergie), ou en cas d'excès d'énergie disponible (stockage, exportation d'énergie). Parmi ces moyens ; le stockage d'énergie électrique apparaît le plus important à mettre en œuvre si on veut éviter que la compensation des intermittences des énergies renouvelables ne se fasse au détriment du climat par l'usage d'énergies d'appoint d'origine fossile à créer.

LE STOCKAGE

Le stockage de l'énergie électrique, qui permet de ne pas gaspiller l'énergie fatale des EnR, en excès pendant les périodes de fort vent et de demande insuffisante, et de la transférer aux heures de pointe sans faire appel aux énergies thermiques fossiles émettrices de CO₂, est la condition nécessaire à un large usage des sources d'énergie intermittentes.

C'est notamment la conclusion d'une étude assez complète de cette question de l'intermittence, menée par le Boston Consulting Group (BCG) en mars 2010.

Extrait : " Bien que des moyens comme le démarrage ou l'effacement rapide des moyens classiques de soutien, généralement thermiques émetteurs de CO₂, qu'un certain contrôle de la demande par compteurs intelligents puisse se développer, qu'une compensation interrégionale par investissement dans un super-réseau puisse voir le jour, ces mesures ne suffiront pas, car l'importance des fluctuations résultant d'une insertion croissante de sources intermittentes exigera la mise en place de moyens de stockages à l'échelle de ces fluctuations. Un des enjeux essentiels du mix énergétique du futur résidera donc dans la capacité du réseau à stocker l'électricité, et les promoteurs des énergies renouvelables sont à la recherche désespérée de moyens de stockage de l'électricité "

Les paramètres principaux structurant le coût du kWh stocké sont la capacité du stockage, sa durée d'utilisation possible (quotidienne ou saisonnière), son coût d'investissement et son rendement.

Quels sont les moyens de stockage (indirect) de l'électricité?

Nous ne retiendrons ici que les quatre principaux capables d'assister un réseau dans le présent ou un avenir pas trop lointain. Ces moyens présentent des capacités, des coûts, des performances et des degrés de maturité différents.

- Le plus connu et le plus puissant est le stockage d'eau en altitude par pompage nocturne et turbinage aux heures de pointe, ce sont les **STEP** (stations de transfert d'énergie par pompage). La technologie est tout à fait mature, leur coût, variable selon les sites, est de quelques c€/kWh stocké. Les pays développés en sont déjà largement pourvus (environ 300 dans le monde, correspondant à 140000 MW). C'est ce type de stockage qui permet actuellement au Danemark d'exploiter un niveau élevé d'éolien en utilisant par son interconnexion les importants moyens de stockage hydraulique de la Norvège (figure 4)

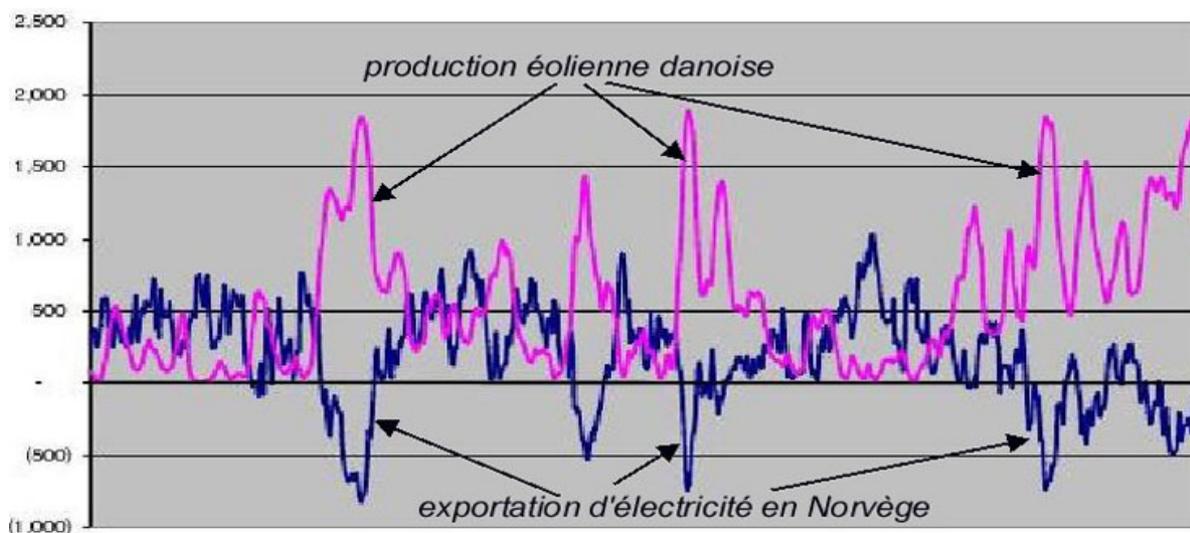


Figure 4 Stockage exporté du Danemark (source F. Livet)

Mais la capacité globale de stockage n'est pas à l'échelle des besoins futurs de compensation si le pourcentage de sources intermittentes atteint les valeurs envisagées dans les scénarios allemands. Les possibilités d'équipements supplémentaires sont limitées par le relief et l'occupation humaine des sols. En Grande Bretagne où il est envisagé d'installer 33 GW d'éolien,

une absence de vent d'une semaine exigerait de disposer de 1200 GWh de STEP soit 40 fois plus que ce qui existe aujourd'hui. 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 actuellement.

Une idée développée par François Lempérière est de créer de telles stations en mer (STEM) en y construisant des îles ou des presqu'îles permettant des dénivelés de l'ordre de 80 mètres se fondant dans le paysage; cette idée est à affiner. On peut craindre que les turbines-pompes et alternateurs fonctionnant sous ces chutes relativement faibles soient très coûteux, car les STEP terrestres classiques exploitent des chutes plus économiques de plusieurs centaines de mètres.

- Un stockage de même nature mécanique, mais utilisant de l'air comprimé dans une caverne souterraine, a fait l'objet de quelques développements à moindre échelle, c'est le **CAES** (compressed air electricity storage) qui n'exige ni relief ni eau, donc susceptible d'un plus large usage géographique. Deux installations seulement sont en service dans le monde, en Allemagne (Huntorf) et aux Etats-Unis en Alabama. Si l'air comprimé pourrait être utilisé pour alimenter directement une turbine à gaz dont les 2/3 de la puissance sont habituellement consommés par le compresseur monté sur son arbre, ce procédé permettrait de bénéficier de la pleine puissance de la turbine à gaz en heure de pointe, au lieu de 1/3 seulement, ce qui équivaut à un déplacement de ce supplément d'énergie produite, des heures de pointes aux heures creuses, comme le font les STEP. Mais la chaleur de compression de l'air stocké est perdue, et le rendement global du stockage est limité à environ 55% au lieu de 70% pour les STEP. Le développement d'un A-CAES (A=adiabatique) à meilleur rendement est en cours, où la chaleur de compression serait partiellement récupérée en compensant le refroidissement de la détente finale. Une installation pilote est attendue vers 2013 et un développement industriel pourrait voir le jour vers 2025.

Ce type de stockage semble toutefois encore moins à l'échelle des besoins que les STEP, et l'importance et le coût des travaux souterrains à réaliser pour stocker 2500 GWh serait à évaluer.

- Un autre moyen de stockage pour des puissances et des capacités plus modestes est le stockage chimique par **accumulateur électrique** (batterie). C'est le système de stockage qui atteint le meilleur rendement (~80%). Pour les applications stationnaires, les filières sodium-soufre et vanadium redox (VRBs) ont un potentiel intéressant pour les moyennes puissances et capacités. Le problème majeur est le prix de ce type de stockage qui reste élevé. Le BCG prévoit une baisse de prix de l'ordre de 30% dans les 10 ans, avec moins de 2000€ par kW, soit ~300 € par kWh de capacité pour le système complet.

Une idée qui accompagne actuellement le développement du véhicule électrique est que lorsque le parc de véhicules deviendra important, il pourrait jouer un rôle favorable à une plus large acceptation des énergies intermittentes, d'une part par la recharge nocturne des batteries qui atténuera l'écart entre consommation diurne et nocturne, d'autre part par l'utilisation éventuelle des batteries de la partie du parc à l'arrêt comme soutien au réseau aux heures de plus forte demande en journée et en soirée, à partir des parkings de travail en journée et des garages individuels en pointe du soir.

Cette idée mérite d'être fouillée, car la capacité d'assistance au réseau n'est effectivement pas négligeable: dans l'hypothèse d'un parc de 10 millions de véhicules électriques stockant chacun 10KWh, cela fait 100GWh (la plus grande STEP française de Granmaison stocke environ 20 GWh), ce qui serait un apport bien réparti, appréciable pour la couverture des pointes françaises de l'ordre de 100 GW, mais au prix d'une grande complexité.

On ne peut oublier les obstacles psychologiques qui risquent de freiner le développement de ce moyen de stockage, le conducteur qui rentre chez lui en grande banlieue après sa journée de travail, sa batterie rechargée au parking, arrivera avec une batterie partiellement vidée et hésitera peut-être à mettre sa charge résiduelle à la disposition du réseau, alors qu'il ne pourra la remettre en charge qu'après minuit. Par ailleurs, si une batterie neuve ne peut supporter qu'environ 1000 cycles au cours de sa vie comme actuellement, cela signifie que chaque

recharge paie un droit d'entrée égal au millième du prix de la batterie; si une batterie de véhicule électrique coûte 7500€, une décharge sur réseau va coûter à son propriétaire 7,5€ de droit d'entrée pour une décharge de 10kWh, ce qui met le kWh apporté au réseau à 75 c€. Ces considérations conduisent à envisager plutôt l'emploi de batteries en fin de vie, dévalorisées par leur aptitude réduite à la traction électrique, mais encore capable de servir de stockage pour secours réseau avec des performances certes réduites, mais bénéficiant d'un coût marginal.

On en arrive au constat bien connu que l'avenir du stockage par batterie repose sur deux progrès essentiels qui restent à faire, baisser considérablement le coût, et augmenter sensiblement la capacité par unité de masse et la tolérance au cyclage. Les accumulateurs à ion-lithium ont envahi le marché de l'électronique portable. Mais pour gagner les applications de réseau et le marché des véhicules électriques, 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.

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

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

LE SUPER – RESEAU

Quels sont les moyens autres que le stockage pour accepter les fortes intermittences ?

Les moyens de stockage supplémentaires à créer coûtant très cher, une réflexion s'est engagée sur la possibilité d'accepter une part croissante d'énergies intermittentes en ayant simplement recours à une mutualisation immédiate des défaillances et des surcapacités par transport d'électricité sur un super-réseau THT sur de longues distances intra-européennes, voire étendues à l'Afrique du nord, pour équilibrer les productions intermittentes propres au nord (hydraulique et vent) et celles propres au sud (soleil et vent).

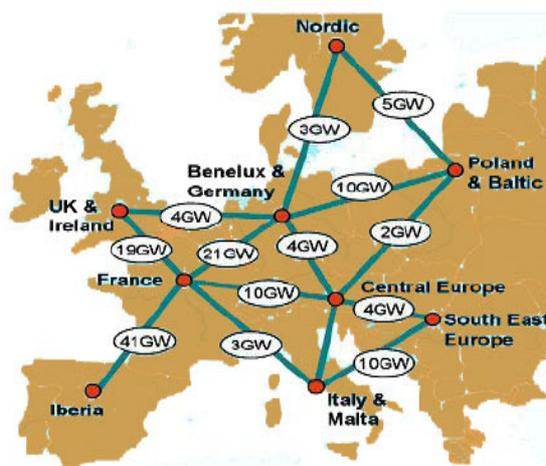
Le projet le plus populaire est *Désertec*, exploitant le solaire de l'Afrique du nord pour alimenter l'Europe. Outre un coût qui, vu d'aujourd'hui, semble irréaliste, que devient le souci d'indépendance énergétique de l'Europe si elle doit dépendre du soleil du sud de la Méditerranée?

Un projet plus modeste (figure 5) se limite à équilibrer le nord et le sud de l'Europe. On y voit que les puissances échangeables doivent croître de manière considérable, par exemple la liaison France-Espagne qui n'est en 2012 que de ~1 GW, va passer à ~2 GW avec l'extension actuellement en cours, devrait être multipliée par environ 40.

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

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

Figure 5 Le super réseau européen (Présentation M. Dürr 13/10/2010 à Bruxelles)



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

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

Cet évanouissement de l'idée d'énergie porteuse d'autonomie gagne progressivement le domaine du solaire, qui aurait pu être un modèle d'énergie décentralisée autonome avec des panneaux solaires photovoltaïques (PV) et thermiques contribuant par autoconsommation à réduire l'énergie prélevée sur les réseaux, mais c'est un solaire PV connecté que l'on a développé, permettant de puiser sur le réseau sans le recours à des batteries lorsque le soleil fait défaut, avec des incitations financières d'emblée si élevées qu'il est devenu plus profitable de revendre la totalité de l'énergie PV à EDF à 60 c€/kWh plutôt que de la consommer, et d'acheter sa propre consommation à un tarif 4 ou 5 fois moins cher, à charge pour le gestionnaire de réseau de transporter et distribuer cette énergie PV délocalisée revendue à perte, et à charge pour le consommateur moyen de payer la différence à travers la CSPE⁸ qui pèse de plus en plus lourd sur les autres consommateurs.

On remarquera que 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.

⁸ Contribution au service public de l'électricité, qui, pour maintenir un tarif unique réglementé, mutualise notamment les surcoûts de production dus à obligation d'achat des énergies renouvelables générées par des particuliers

PARTIE 2 : POURRA-T-ON "VERDIR" LES ENERGIES FOSSILES

Le besoin de les "verdir" 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 le plus généralement recherché par trois voies :

- Une augmentation du rendement des nouvelles centrales, utilisant 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, donc 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%.

Pour le futur, ce "verdissement" signifie aussi: pourra-t-on capter et stocker le CO2 émis par la combustion de ces sources d'énergie?

Les émissions diffuses : essentiellement celles des transports et du chauffage domestique, les deux consommant des combustibles fossiles. Pour ces deux secteurs, on ne peut guère espérer capter le CO2 de si nombreuses petites sources aussi dispersées, et pour beaucoup d'entre elles, mobiles⁹.

Les efforts de réduction des émissions 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 des combustibles fossiles, principalement du charbon. Ces grands émetteurs qui, en Europe, font partie du système européen de permis d'émission ETS (emission trading system) sont soumis à des quotas d'émission décroissants.

Pour ce secteur clé de l'économie, où l'on n'aperçoit pas de possibilité de remplacement rapide du combustible fossile (plus de 60 % de l'électricité mondiale est produite à partir de ce type de combustible), l'idée de capter le CO2 émis par ces centrales et de le stocker (CSC captage et stockage du carbone) de manière durable et sûre est à l'ordre du jour depuis une vingtaine d'années¹⁰.

Une réduction significative des émissions de CO2 ne pourra donc être obtenue que si on réussit à généraliser au plus vite le CSC, 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 du CSC. Il apparaît alors le risque que cet impératif de réussite se transforme en croyance optimiste sur sa possibilité et sur les délais de son développement.

- **Entre ces deux classes extrêmes d'émetteurs** se situent quelques industries moyennement émettrices de CO2. En attendant que ces espoirs se précisent, les industriels

⁹ Sans compter les transports, essentiellement du charbon et du gaz, entre les sites de production et les centrales électriques, responsables de 5 à 10 % de la totalité des rejets de CO2, et probablement de quelques fuites de méthane.

¹⁰ L'IEA (international energy agency) en suit son évolution dans 113 pays à travers sa revue dédiée "Greenhouse News".

émetteurs ne comptent pas sur le CSC trop lointain et réduisent leurs émissions de manière déjà significative par des modifications de leurs procédés industriels en ce qui concerne les sidérurgistes et les cimentiers.

1. Points durs du développement du CSC

Sur le plan économique, 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 €/tCO₂¹¹ 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.

On connaît les points durs du développement 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 20 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 démontrée¹², compte tenu de l'acidification du milieu en présence d'eau pouvant initier des fissurations¹³ ; par ailleurs, les problèmes juridiques restent à clarifier.

Le coût global du CSC, actuellement de l'ordre de 75 €/tCO₂ devrait tomber à moins de 50 avant 2020 pour rejoindre le prix du marché du CO₂ dont on espère qu'il atteindra ce niveau vers 2020/2030. 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.

Au cours de la période actuelle de décantation 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. Mais on notera que 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

¹¹ Ce sont des Euros 2009

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

¹³ 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)

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 %.

On doit enfin noter qu'une publication du 15 juin 2012 de l'académie nationale américaine des sciences (info AFP du 19 juin 2012) conclut que la séquestration géologique massive du CO₂ sous pression peut potentiellement induire des tremblements de terre importants. Les experts géologues pensent que ce risque est limité à des régions déjà fortement sismiques.

2. Le point sur le développement du CSC dans le monde

Tous les grands pays charbonniers ont conscience de la nécessité de développer le CSC s'ils veulent continuer à exploiter leur ressource. Un objectif affiché était de parvenir un déploiement industriel vers 2020. Les initiatives mondiales sont répertoriées par l'IEA GHG (International energy agency greenhouse gases) qui publie sur son site¹⁴ et sur celui du CSLF¹⁵ (carbon sequestration leadership forum) les nouvelles concernant leur évolution.

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.

Parmi les nombreux rapports et articles sur le CSC figurant dans les revues spécialisées et sur Internet, le plus synthétique d'entre eux semble être le rapport Mc Kinsey «*carbon capture and storage, assessing the economics*», du 22/09/2008 qui reste une bonne synthèse de l'ensemble de la question. Il estime que c'est environ 3,6 GT/an que l'on pourrait stocker en 2030 au niveau mondial dont 0,4 en Europe (soit environ 20% de la réduction d'émissions souhaitée par Bruxelles en 2030). Atteindre cet objectif nécessitera le déploiement en Europe de 80 à 120 sites de captage et stockage à échelle commerciale.

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.

D'après le «global CCS institute» (créé en 2009 par l'Australie et auquel ont adhéré 20 gouvernements et 80 grandes compagnies) 238 projets plus ou moins avancés de CSC existaient dans le monde en avril 2010, dont 80 à grande échelle (> 1 Mt CO₂/an pour le charbon, > 0,5 Mt CO₂/an pour le gaz), dont 9 opérationnels.

L'IEA a publié en janvier 2010 une « roadmap » du CSC mondial, évoquant la nécessité de 100 installations d'ici 2020 et d'environ 3 000 d'ici 2050, impliquant un niveau d'investissements de l'ordre de 2 500 à 3 000 milliards de dollars de 2010 à 2050.

La 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.

¹⁴ <http://www.ieaghg.org/>

¹⁵ www.csforum.org

PARTIE 3 : RISQUES COMPARES DES DIFFERENTES ENERGIES. LE REJET DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, EST-IL JUSTIFIÉ AU REGARD DES FAITS?

De par son histoire militaire et quelques rares, mais spectaculaires, accidents civils, l'image du nucléaire est dominée par son aspect risque. Toutes les sources d'énergie présentent aussi des risques, mais nous y sommes habitués et ils ne font plus la une des médias, Il est donc utile pour une information correcte du public, de les comparer objectivement sur la base des faits puisque qu'aucune source d'énergie n'en est exempte :

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. Rien qu'en Chine en 2010, officiellement 1 400 morts dans les mines de charbon, chiffre sous-évalué par une comptabilité douteuse des petites mines privées. Cependant, la mortalité la plus importante n'est pas celle due à ces accidents, mais celle 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 année¹⁶, principalement causés par la silicose, mais la mortalité due à la pollution atmosphérique par les installations industrielles utilisatrices de charbon, en particulier les centrales électriques, reste importante : Les estimations actuelles pour l'Europe des 27 sont d'environ 30 000 morts par an, de manifestants dans les rues contre les centrales thermiques. et l'Allemagne écologiste continue à produire la moitié de son électricité avec le charbon.

Hors santé publique, l'extraction du charbon provoque de graves atteintes à l'environnement, en particulier quand les exploitations se font à ciel ouvert. Les surfaces concernées sont considérables; rien qu'en Allemagne 1500 km² environ ont déjà été bouleversés pour y exploiter la lignite, et 10 000 km² seront menacés dans l'avenir. Plus de 100.000 personnes ont été déplacées et leurs habitations détruites¹⁵.

- Nous n'évoquons 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.

- 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 le domaine industriel hors énergie, 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.

Les particules fines respirées, les oxydes d'azote, l'ozone photochimique des combustions seraient responsables en Europe de 250.000 morts prématurées par an ; on n'arrête pas les voitures ni les centrales ni la cuisine au gaz !

¹⁶ "Les dangers du charbon" par Bernard Durand novembre 2011 www.sauvonsleclimat.org

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.

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

- L'énergie nucléaire civile, développée depuis un demi-siècle, a causé une dizaine d'accidents mortels dans des laboratoires de recherche, et trois accidents majeurs (avec fusion plus ou moins importante du cœur) dans des centrales électriques : Three Mile Island aux USA en 1979, qui n'a fait aucune victime, Tchernobyl en 1986, dont le bilan humain est rappelé en bas de page^{18,19}, et Fukushima Daiichi, détruite en mars 2011 par un tsunami qui a tué environ 20.000 personnes, dont aucune à ce jour par la radioactivité, et dont nous rappelons le scénario.

Fukushima Daiichi Mars 2011: Tchernobyl datait de 25 ans, et rien de grave ne s'était passé depuis dans le monde des centrales nucléaires. Après des évaluations largement exagérées par les médias des dégâts humains de cette catastrophe, évoquant des centaines de milliers de morts assurés, les enquêtes approfondies de l'ONU à travers l'UNSCEAR¹⁷ régulièrement mises à jour¹⁸, avaient ramené les évaluations fantaisistes initiales à moins de 100 morts¹⁹, et à une possibilité de décès prématurés attribuables à l'accident pouvant atteindre 4000²⁰ dans une hypothèse de calcul extrêmement pessimiste.

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'enclaustrage de confinement, contrairement aux prescriptions occidentales de l'époque, et probablement par l'incendie pendant 10 jours du graphite servant de modérateur.

Les causes immédiates de l'accident de Tchernobyl avaient été expliquées par l'imprudence des opérateurs profitant d'un arrêt programmé du réacteur pour conduire un essai spécial d'alimentation électrique par l'alternateur principal en phase de ralentissement, en désactivant volontairement certaines protections de sécurité, et alors que le réacteur se trouvait dans une configuration connue comme particulièrement instable²¹.

Aucune de ces causes ne se retrouvaient dans la conception et les règles rigoureuses d'exploitation des réacteurs occidentaux. C'était assez rassurant.

Et voilà que 25 ans plus tard, 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 (niveau 10 relevé au Chili), initiateur d'un gigantesque tsunami.

La centrale n°1 (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;

¹⁷ United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiations.

¹⁸ Voir *Fukushima : quels risques sanitaires* par Roland Masse dans *Risques* n° 86 de juin 2011

¹⁹ 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.

²⁰ 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.

²¹ B. Lerouge « Un « nuage » passe... » - annexe III : « événements ayant conduit à l'accident ».

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.

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 compréhensible et justifiable, manifestée par beaucoup de nos concitoyens après la catastrophe de Fukushima Daiichi.

Soufflons un peu, et tentons d'utiliser notre pensée rationnelle pour poursuivre l'analyse et examiner objectivement 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'accident²²,

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 connu²³, 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.

²² 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.

²³ 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.

Dans les parties de la zone d'exclusion de rayon 20 km²⁴, 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 a d'établi 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 nucléaire²⁵, 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 destruction de cette centrale nucléaire ancienne et non mise à jour aurait été évitée si l'une des trois précautions suivantes avaient été prises par l'exploitant TEPCO :

1. Un mur anti-tsunami plus haut pour éviter la submersion de la centrale
2. Une implantation plus haute des diesels de secours pour éviter leur noyade
3. 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

Donc, sauf à renoncer à l'usage de la logique, ce n'est pas dans le nombre de morts par accident nucléaire qu'il faut chercher le motif d'un refus de cette filière énergétique, car aucune des autres grandes sources d'énergie n'a fait moins de morts à production égale au cours du dernier demi-siècle. C'est ce que confirme pour Fukushima le rapport de synthèse mondial de l'OMS de février 2013 sur les effets restreints de cette catastrophe nucléaire sur la santé publique.

Après ce rappel de faits incontestables sur l'accident de Fukushima, qui se trouve être à l'origine du réveil des peurs du nucléaire, essayons d'actualiser les arguments défavorables et favorables à cette énergie, aux regards de l'écologie, de l'économie et du risque.

QUELQUES ARGUMENTS DEFAVORABLES :

1. 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 et par la contamination radioactive des sols, condamnant des villages et des surfaces agricoles pendant des années.**

²⁴ Ceci concerne aussi des zones plus éloignées (jusqu'à 50 km), contaminées en taches de léopard.

²⁵ Dont on doit rappeler qu'il s'agissait d'un des plus anciens types de réacteurs (BWR mark 1), pourtant 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.

L'évacuation préventive et temporaire des populations, qui a été correctement conduite à Fukushima et a protégé la population du risque de contamination importante, reste de toute manière mal vécue. Cette contrainte constitue le reproche principal aux yeux du public, car à Tchernobyl la plus grande part de la morbidité a été due à ce traumatisme social causé par les déplacements de population.

Ce risque est très réduit dans les réacteurs du parc français du type à eau pressurisée (PWR), régulièrement améliorés et rajeunis par des modifications prenant en compte les retours d'expérience internationaux. On devrait par ailleurs parvenir à une gestion plus rationnelle de l'évacuation provisoire des populations²⁶.

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

La contamination radioactive des sols et des eaux a été un problème majeur dans l'accident de Tchernobyl où le réacteur de type ouvert a laissé échapper de grandes quantités de produits radioactifs à haute altitude transportés à des centaines de kilomètres au gré des vents, activé par l'incendie du graphite (modérateur du réacteur) pendant une semaine. A Fukushima, sans explosion du réacteur lui-même, et par 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 césium²⁷ 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 radioactives²⁸.

Ce problème ne se pose pas pour les nouveaux réacteurs du type EPR qui confinent strictement la radioactivité à l'intérieur du réacteur.

2. L'évolution des événements post-accidents est mal prévisible,

- **La diversité des événements pouvant se greffer sur l'accident**, les difficultés du refroidissement qui évite la réactivation de réactions nucléaires locales, prêtent aux fantasmes,
- **Les effets retardés possibles de la radioactivité sont anxiogènes.**

- *En France, une des retombées de Fukushima est la demande de l'ASN de mettre sur pied un "noyau dur" d'experts en intervention rapide sur incident, capable de maîtriser la complexité des situations possibles.*
- *Les effets retardés ? Aucune victime à ce jour pour Fukushima? A ce jour! voilà un boulevard de possibilités de désinformation sur les effets des radiations sur la santé. On a même pu lire sur certains médias: "les victimes de Fukushima ne sont pas encore nées".*
- *Quel pourcentage des citoyens savent ce qu'est un becquerel, un gray, une curie ou un sievert ? Pour ceux qui font l'effort de se renseigner sur les différents degrés du risque associé aux différents degrés d'irradiation (exprimés en Sievert), il subsiste des doutes dans leur esprit par la confusion entre les doses tolérables sans effet pathologique observable (<100mSv/an), et les limites de dose fixées par les normes de radioprotection avec une prudence extrême (<1mSv/an) qui ménagent des marges de plusieurs ordres de grandeur entre les deux.*

La radioactivité, est un phénomène physique trop mal connu du public, contrairement aux sources d'énergie plus classiques. Le public doit prendre conscience que la radioactivité est un phénomène

²⁶ Faut-il revoir les conditions d'évacuation à la suite d'un accident nucléaire ? Hervé Nifenecker, site Internet SLC 20 mai 2011.

²⁷ 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.

²⁸ Césium : le Japon avance dans le traitement des sols et des eaux contaminées

<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/69209.htm>

naturel qui n'a pas été inventé par l'homme, mais simplement domestiqué comme le feu et l'eau. **Cet aspect exige un effort d'information sur la radioactivité, sa nature, ses risques et ses mesures.**

3. Dans ses filières actuellement utilisées, l'énergie nucléaire accumule des déchets radioactifs issus du combustible usé, qui constituent aussi un sujet de crainte.

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

4. Parmi les éléments contenus dans les combustibles usés, les filières nucléaires actuelles, accumulent du plutonium

*Cet isotope du plutonium est dit "civil", car il est inapte à une utilisation militaire. Stocké soit directement en déchets (comme aux USA et en Finlande), soit séparé par retraitement et partiellement réutilisé dans le combustible MOX (France, Japon). **Le stock de plutonium est géré dans l'attente des réacteurs de la génération IV dont il sera un des combustibles.** Cet aspect se clarifiera aussi dans les années 2020 par une prévision plus précise sur la date d'arrivée des réacteurs de génération IV.*

QUELQUES ARGUMENTS FAVORABLES :

1. L'énergie nucléaire est l'énergie électrique **la moins coûteuse**, ce que vient de confirmer l'analyse détaillée établie par 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 4 et 6 c€/kWh²⁹ 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".
2. Elle **n'émet pas de CO2** au cours de sa production. Seules les émissions en cours de construction et en cours de préparation du combustible (infimes rapportées au nombre de kWh produits pendant la durée de vie d'une centrale) peuvent lui être attribuées.
3. Elle **contribue à assurer une quasi-indépendance³⁰ 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.
4. Elle fournit une **électricité ne dépendant pas des circonstances climatiques courantes, indépendante du vent, de la pluviosité et de l'ensoleillement³¹**, elle échappe aux

²⁹ 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.

³⁰ 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).

³¹ 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.

phénomènes d'intermittence des énergies renouvelables³², et constitue de ce fait une excellente énergie électrique de base³³, facilitant la gestion des réseaux.

5. C'est une énergie concentrée, **consommant très peu de terrain pour une puissance donnée**, contrairement à l'éolien et au solaire (et à l'hydraulique). Son emprise au sol étant la plus faible parmi toutes les sources d'énergie. A noter aussi que, par sa nature concentrée, elle n'a pratiquement pas de conséquence sur l'écosystème (biodiversité).
6. 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 majeure.

Malgré ces comparaisons, beaucoup d'esprits restent imprégnées d'un tabou concernant les nucléaires, hésitant à y appliquer leur pensée rationnelle par crainte de connaissances insuffisantes, et se réfugient dans un émotionnel facile, conforté par une lecture superficielle certaines études économiques affichant des évaluations de coût pharaoniques d'un hypothétique accident nucléaire. A titre d'exemple, un chercheur en économie de l'IRSN vient de produire une étude³⁴, dans l'hypothèse 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, 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.³⁵

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

³² 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.

³³ 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)

³⁴ Conférence de Patrick Monal (IRSN) à l'IHEST : Coût d'un accident nucléaire 21 février 2013

³⁵ Jean-Marc Jancovici Agora SLC 24 février 2013

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, 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 400³⁶.

Les messages relatifs aux coûts 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 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 comparé aux autres risques, et au refus de gérer ce risque.

Notons par exemple 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 dernières années environ 500 TWh, à 30 morts par TWh suivant les calculs d'ExternE, cela fait 15 000 morts prématurées (et 150 000 maladies graves). Cette centrale à lignite aurait aussi produit 1 tCO₂ par MWh, à un coût des dommages de 100 €/MWh. Et *quid* des 45 000 personnes qu'il est envisagé d'évacuer dans les 15 ans pour prolonger les mines de lignite à ciel ouvert³⁷.

EN GUISE DE CONCLUSION

Lorsque les risques associés à une technologie complexe deviennent eux-mêmes complexes, et incomplètement cernés, l'approche logique déterministe usuellement appliquée aux technologies et événements 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.

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

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

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

***Pour un progrès raisonné, choisi et partagé*³⁸, 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.**

Gilbert Ruelle, Académie des technologies,
V3 raccourcie du 21 mai 2013

³⁶ Hervé Nifenecker Agora SLC 10 février 2013

³⁷ Bertrand Barré Agora SLC 24 février 2013

³⁸ Devise de l'Académie des technologies

ANNEXES (DOXA)

ANNEXE 1 TCHERNOBYL, CAUSES ET CONSEQUENCES

ANNEXE 2 LE DÉVELOPPEMENT DE L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA DAIICHI

ANNEXE 3 LA RADIOACTIVITÉ, SA NATURE, SES RISQUES, SES MESURES

ANNEXE 4 LES DÉCHETS NUCLEAIRES, LEUR GESTION

ANNEXE 5 LES DIVERSES FILIERES NUCLEAIRES

ANNEXE 6 LES AUTRES RISQUES

ANNEXE 8 LES OUTILS D'UNE REFLEXION PROSPECTIVE SUR L'ENERGIE

ANNEXE 9 CONVERSION D'UN ÉCOLOGISTE OPPOSANT AU NUCLÉAIRE

ANNEXE 1 TCHERNOBYL, CAUSES ET CONSEQUENCES

Les causes de l'accident de Tchernobyl

Elles sont claires : un essai de divergence volontairement décidé dans une période creuse de consommation, essai inutile, très imprudent et mal conduit, pour lequel les systèmes de sécurité ont été déconnectés spécialement, a créé un accident nucléaire dont le caractère catastrophique est le résultat de la conception de ce type de réacteurs RBMK :

- **Défauts de conception** : Ce type de réacteur ne respectait pas les principes de sûreté déjà utilisés en occident à l'époque. Son plus gros défaut est l'**absence d'enceinte de confinement**, ce qui a permis la dispersion de radioactivité en haute altitude par l'incendie du graphite. Le choix de cette structure résulte d'un usage mixte civil et militaire de ce type de réacteur, permettant par l'absence d'enceinte de prélever en service du plutonium de qualité militaire (isotope 239) à un stade de faible irradiation de l'uranium.

Les autres défauts :

- Réacteur instable en dessous de 25% de sa puissance, avec tendance à l'emballement, qui aurait du interdire cet essai d'exploration des limites de stabilité avec une telle légèreté.
 - descente trop lente des barres de contrôle (20 s au lieu de 2 s sur les réacteurs REP)
 - effet accélérateur de réaction des embouts de carbone sur les barres de contrôle
 - modérateur graphite inflammable qui a causé l'incendie qui a duré 10 jours et dispersé les produits radioactifs dans l'atmosphère
- **Fautes d'exploitation** mettant en évidence un manque de culture de sûreté chez les opérateurs :
 - 6 fautes : 3 mises hors-circuit volontaires des sécurités sur ordre, 2 violations de consigne, 1 non-respect de procédure d'essai. Une seule de ces erreurs évitée aurait évité l'explosion

Ce grave manque de culture de sûreté s'est manifesté à trois niveaux : celui de la conception, celui de l'exploitation et celui du plan d'intervention après accident grave. l'événement Tchernobyl fut d'abord soviétique, avant d'être nucléaire.

Les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl

Elles ont été analysées et continuent à l'être, par les agences internationales regroupées au sein du "forum tchernobyl" organisé par l'ONU et L'AIEA. Tous les rapports sont sur Internet.

L'essentiel a été rappelé en note de bas de page 1.

Même en faisant des hypothèses pessimistes sur le nombre de décès par irradiation pouvant survenir plus tardivement, il n'est pas possible d'atteindre les chiffres très exagérés propagés sur les médias, et les conséquences de l'accident de Tchernobyl restent très en deçà de celles de beaucoup d'accidents industriels qui n'ont pas soulevé autant de polémiques.

Et les autres RBMK

Avec l'aide des occidentaux les réacteurs RBMK ont bénéficié depuis 1986, d'améliorations de conception (barres d'arrêt d'urgence, stabilité du cœur...). Mais l'absence d'enceinte de confinement demeure et constitue une faiblesse inacceptable. **Une nouvelle explosion type Tchernobyl sur l'un des 13 RBMK encore en fonctionnement est ainsi devenue très peu probable.** Cependant, dans le contexte des niveaux très élevés de sûreté auxquels sont accoutumés les pays développés, la situation actuelle ne peut être considérée comme totalement acceptable.

ANNEXE 2 LE DÉVELOPPEMENT DE L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA DAIICHI

La conséquence de la perte des moyens de refroidissement fut une montée en température et en pression des cuves des trois réacteurs en service et 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 des produits de fission résiduels en maintient une fraction, décroissante avec la décroissance de ces PF pendant quelques semaines, obligeant à mettre en œuvre des moyens externes de refroidissement moins efficaces (arrosage par les pompiers) ; l'échauffement du combustible conduit à une fusion partielle des crayons d'uranium et des gaines en zirconium, oxydé par la vapeur d'eau et dégageant de l'hydrogène occasionnant quelques explosions destructrices des structures du toit, obligeant TEPCO à procéder à des décompressions en lâchant volontairement des bouffées de vapeur mélangée d'hydrogène et de produits radioactifs volatils, essentiellement iode 131 et césium 137, après évacuation de dans un rayon de 10 km, puis 20 km (~80.000 personnes) après les explosions d'hydrogène, et confinement jusqu'à 30 km. Arrosage à l'eau de mer par les pompiers, entraînement de radioactivité par ruissellement de cette eau contaminée dans les parties basses de la centrale, fuites d'eau contaminée vers l'océan voisin.

Après quelques jours, restauration d'une ligne électrique détruite par le tremblement de terre, reprise progressive de la connaissance des températures et pressions, mais beaucoup de 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 pratiquement rien au bout de 2 mois, et l'océan étant très profond à courte distance de la côte, la dispersion jointe à la décroissance conduit à estimer qu'il n'y a pas lieu de restreindre les conditions de pêche locale, car une personne qui ne mangerait que du poisson et des algues locales 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 résiduelle des cœurs, un remplissage d'azote de l'enceinte de confinement évite de nouvelles explosions d'hydrogène, des fuites sont 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 contraint par le travail limité en zone très irradiée pour la mise au point du procédé de décontamination et 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" sur environ 10 ans sont en cours d'évaluation.

Une carte dressée par l'ISRN 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), mais il ne présente que peu d'affinités avec les autres éléments. 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. Son infiltration dans le sol est très lente. Il n'est pas repris par les systèmes racinaires à l'exception des champignons.

(cf. les fiches de l'IRSN)

ANNEXE 3 LA RADIOACTIVITÉ, SA NATURE, SES RISQUES, SES MESURES.

Son origine : 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. Comme Mars est plus petit que la Terre, il contenait à l'origine moins d'éléments radioactifs et s'est donc refroidi plus vite, d'où la différence d'évolution. Sur la Terre, la radioactivité a facilité l'éclosion de la vie, sans elle la température moyenne serait 16°C plus basse. L'uranium 235, l'uranium 238 et le thorium 232 sont les noyaux les plus lourds existant encore depuis la dernière explosion de supernova précédant la formation du système solaire. Grâce à leur très longue période de désintégration, (de l'ordre du milliard d'années), ils sont encore présents sur Terre.

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

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

font souci actuellement, et dont la nature locale a su limiter la migration, alors qu'ils n'étaient pourtant pas enfermés dans des conteneurs sophistiqués.

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

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

Cette radioactivité ambiante vient de plusieurs sources; sur la moyenne française de 2,4 mS/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.

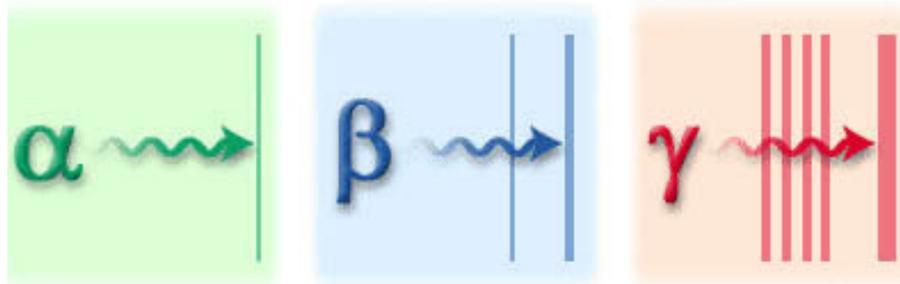
Le rayonnement β est une émission d'électrons; il est plus pénétrant que le rayonnement α , avec un parcours dans l'air de quelques mètres, il peut traverser les couches superficielles de la peau.

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 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 longue 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 100/200 mSv/an), aucune étude n'a jamais mis en évidence une 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. Au-delà de 200 mSv, des cancers de la thyroïde peuvent commencer à apparaître par exemple chez l'enfant qui est le plus sensible. Une forte dose de l'ordre de 10 000 mSv reçue en un temps court est rapidement létale.

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 trop petite quand on songe qu'un homme présente une radioactivité d'environ 8000 Bq, 1 m³ de granite de ~4 millions de Bq, et 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

Utilisés pour l'analyse des effets pathologiques des radiations et la radioprotection, 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 ?

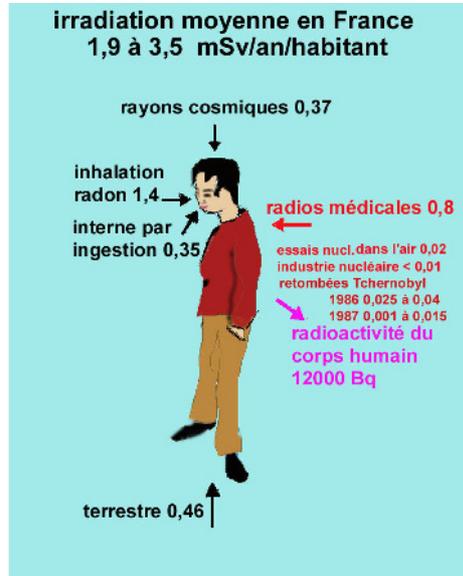
Les effets sur l'organisme dépendent bien sûr de la dose reçue mais aussi de la durée pendant laquelle cette dose a été reçue.

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

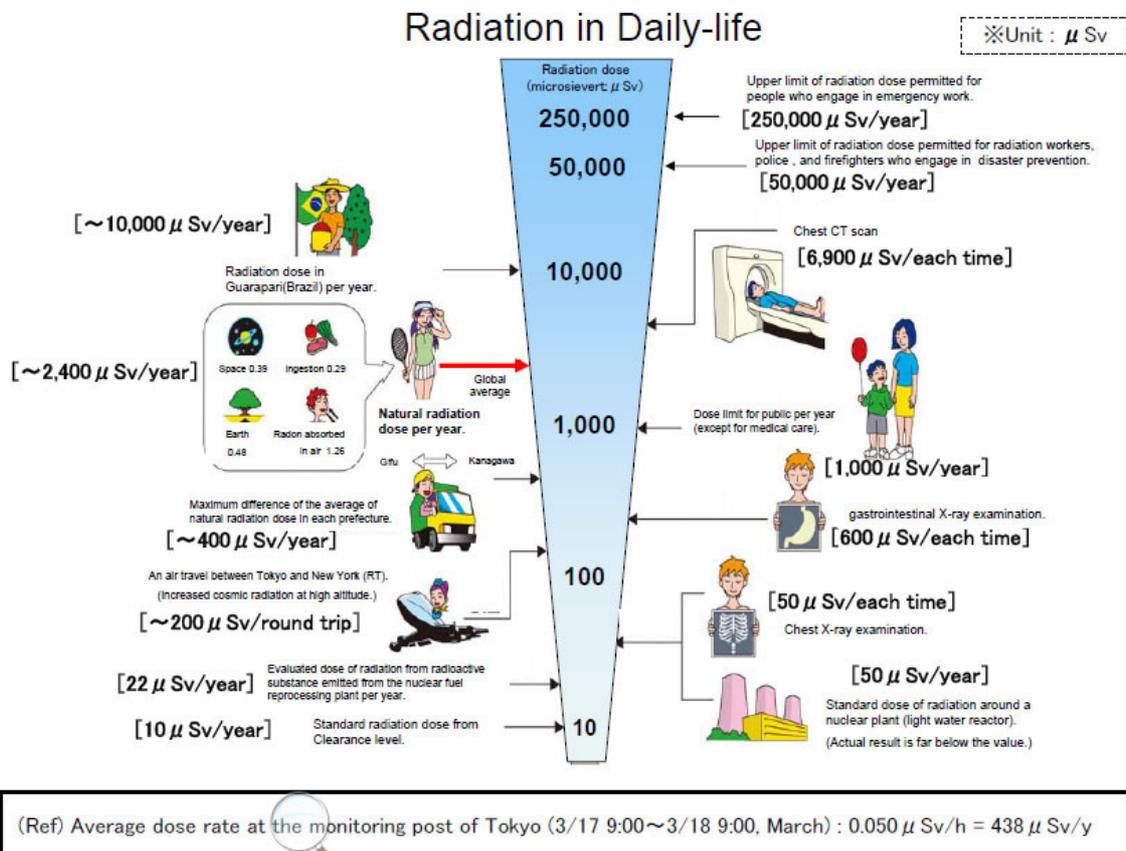
Pour les faibles doses, les effets biologiques ne peuvent être mesurés. La CIPR (Commission Internationale de Protection Radiologique) suppose une loi linéaire par rapport à la dose (le risque croît linéairement avec la dose ; la pente de cette droite est déterminée là où les effets sont mesurables,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

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 réaliste. Certaines de personnes 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



PRINCIPAUX ELEMENTS RADIOACTIFS? DUREE DE VIE? USAGES?

Période, radioactivité et utilisation des principaux isotopes

Half-life, radioactivity and applications of the principal isotopes

Z	Élément	État	Période	Alpha (MeV)	Bêta (MeV)	Gamma (MeV)	X (MeV)	Utilisation
0	n	1	F		0,7824			diverses
1	H	3	F		0,01860			fusion, traceur
4	Be	7	F			0,4776		datation, traceur
6	C	14	F		0,1565			datation, traceur
11	Na	22	F		0,545	1,275		médecine
11	Na	24	F		1,389	1,369		traceur
						2,754		
19	K	40	F		1,312	1,461		datation
26	Fe	55	F				0,006	fluorescence X
26	Fe	59	F		0,273	1,099		traceur
					0,475	1,292		
27	Co	58	F			0,8108		traceur
27	Co	60	F		0,315	1,173		irradiation, médecine
						1,333		
36	Kr	85	F		0,15	0,5140		traceur, jauges
38	Sr	90	F		0,546			jauges
43	Tc	99	M			0,1405	0,02	médecine
						0,1426		
53	I	125	F			0,0355	0,03	médecine
53	I	131	F		0,606	0,3645		médecine
54	Xe	133	F		0,346	0,08100	0,031	médecine
54	Xe	133	M			0,2333	0,030	
55	Cs	134	F		0,658	0,6047		sans utilisation
						0,7958		
55	Cs	137	F		0,514	0,6616		jauges
63	Eu	152	F		0,69	0,3443		sans utilisation
					1,47	1,408		
77	Ir	192	F		0,672	0,3165		brachythérapie
						0,4681		radiographie γ
79	Au	198	F		0,961	0,4118		médecine, traceur
81	Tl	201	F			0,1674	0,071	médecine
81	Tl	208	F		1,796	0,5830	0,071	sans utilisation
						2,615		
86	Rn	222	F	5,490		0,510		sans utilisation
88	Ra	226	F	1 600 a	4,784	0,1861		sans utilisation
						0,2624		
90	Th	232	F	1,4.10 ¹⁰ a	4,010	0,0590		datation, traceur
92	U	235	F	7,04.10 ⁸ a	4,494	0,1857		combustible
92	U	238	F	4,46.10 ⁹ a	4,196	0,04354		datation, traceur.
								Fertile*
93	Np	237	F	2,14.10 ⁶ a	4,788	0,08653		sans utilisation
94	Pu	239	F	2,411.10 ⁴ a	5,156	0,4137	0,02	combustible
95	Am	241	F	432,2 a	5,486	0,05954	0,02	jauges
98	Cf	252	F	2,64 a	6,118			diagraphie
						fission spontanée		

ANNEXE 4 LES DÉCHETS NUCLEAIRES, LEUR GESTION

Le volume des déchets: On doit d'abord noter les ordres de grandeurs des volumes de 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 retraite (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 Pu241 > Am241 > Np 237).

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

PRINCIPES DE LA GESTION DES DÉCHETS

La gestion 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).

Pour atteindre cet objectif, il y a un large consensus autour du principe de confinement des radionucléides. Les rares exceptions à ce principe concernent des 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 de ces caractéristiques). 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), destinés à être 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 α à vie longue (déchets B (de l'ordre 100000 m³) ; ces déchets ne dégagent pas de chaleur.

Les déchets de forte radioactivité initiale (donc dégagant de la chaleur) et comportant des radionucléides à vie longue (déchets C – de l'ordre de 10000m³).

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 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 utilisé, 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 provenance de l'usine de retraitement.

D'augmenter, dans le combustible recyclé utilisé, 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 utilisé 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 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 décaï.

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, 1200 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), 12 tonnes de plutonium, une tonne d'actinides mineurs et 50 tonnes de produits de fission.

Ce combustible utilisé 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** pendant 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 radiotoxicité est essentiellement celle des actinides mineurs (et du plutonium s'il est incorporé en cas du 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 ^{129}I si ce dernier n'était pas rejeté lors du retraitement (*parmi les AM, il reste essentiellement le ^{237}Np 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 se chiffrent en fractions de celles dues à la radioactivité naturelle).*

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 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 5 LES DIVERSES FILIERES NUCLEAIRES

1. LES REACTEURS EPROUVES

Trois familles de réacteurs ont acquis une expérience d'exploitation significative :

Une très large expérience pour les réacteurs à neutrons thermiques (essentiellement les réacteurs à eau de 1000 MWe), brûlant ^{235}U avec vocation à la production d'énergie. Ces réacteurs utilisent mal les ressources d'uranium naturel car ils ne brûlent qu'une partie des 0,7% de ^{235}U de l'uranium naturel après enrichissement (sauf la filière CANDU). Ils produisent du plutonium civil (Pu) et des déchets, produits de fission et actinides mineurs (américium, curium, neptunium). Le parc mondial de ces réacteurs commerciaux (réacteurs expérimentaux exclus) est **d'environ** 440, dont plus de 400 de génération II, à modérateur eau parmi lesquels une large majorité de réacteurs à eau pressurisée REP. La plupart de ces réacteurs de génération II, prévus initialement pour une exploitation pendant 30 ans, resteront en activité plus longtemps (40, voire 60 ans) Quelques réacteurs utilisant du combustible MOX (oxyde mixte d'uranium et de plutonium) brûlent ^{239}Pu et ^{241}Pu .

Une expérience beaucoup plus modeste pour :

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) à sodium, qui valorisent les ressources d'uranium naturel en brûlant ^{238}U qui en constitue 99,3%, ce que ne savent pas faire les réacteurs à neutrons thermiques. **La réserve de combustible nucléaire pour de tels réacteurs se compte alors en milliers d'années**

Les réacteurs à neutrons thermiques à haute température refroidis à l'hélium (HTR 8 à 900°C), de puissances plus modestes (100 à 300 MWe), pouvant brûler du plutonium accumulé. Certaines versions à très haute température (VHTR) pourraient produire de l'hydrogène par dissociation thermo-chimique de l'eau

D'autres familles sont à un stade beaucoup moins avancé, on peut les qualifier de concepts : Ce sont les RNR à gaz, les RNR hybrides assistés par accélérateur de particules, les réacteurs à neutrons thermiques à sels fondus qui pourraient utiliser du thorium comme combustible. On les classe en Génération IV.

EVOLUTION DES 3 FAMILLES DE REACTEURS

On distingue les réacteurs à eau modernes, accessibles aujourd'hui, et les RNR à métal liquide et HTR, accessibles demain.

Les réacteurs à eau modernes (génération III) tels que l'EPR et d'autres réacteurs américains, japonais, coréens, canadiens.

Le réacteur européen EPR 1600 MW

C'est le prolongement des réacteurs REP actuels dont il bénéficie de la large expérience, il innove sur quelques points essentiels, sans introduire d'incertitudes techniques ou économiques majeures :

Sécurité accrue :

- Une fusion accidentelle du cœur devient un accident sans conséquence durable extérieure au site
- Une résistance renforcée de l'enceinte de confinement vis-à-vis des chutes d'avion
- Une résistance aux séismes encore accrue (les réacteurs REP du parc actuel étaient déjà conçus pour une intensité sismique double de celle historiquement observée en leur lieu d'implantation)

Efficacité augmentée :

- Meilleure utilisation du combustible UO_2 ou MOX (70GWj / t)
- Coût du kWh : 3 à 4 c€ initialement prévu, selon les conditions financières¹, va probablement être sensiblement augmenté pour les têtes de série qui ont rencontré des difficultés de génie civil sous-estimées et donc des retards pénalisants.
- Durée de vie 60 ans

Déchets réduits : il peut fonctionner avec 50% de MOX, au lieu de 30% , ce qui réduit les déchets à vie longue de 15 %.

¹ Notamment le taux de retour sur investissement

Les RNR et HTR

Les RNR

Leur intérêt majeur est de mieux utiliser la ressource en uranium naturel. Un autre intérêt est de brûler tous les isotopes du plutonium et certains actinides mineurs. Ils ouvrent donc la perspective d'une utilisation durable de l'énergie nucléaire en augmentant la réserve de combustible nucléaire.

En France, la démonstration de faisabilité a été faite à Phénix et Superphénix.

Ils concourent à la réduction de la quantité de plutonium issu des réacteurs actuels par le besoin qu'ils ont de disposer initialement d'une charge d'environ 10 tonnes de plutonium par GWé installé pour ensuite s'auto-alimenter.

Ils ne sont toutefois pas nécessaires aujourd'hui vu l'abondance et le faible prix de l'uranium, mais leur réapparition, avec une technologie mise à jour, semble inévitable dans l'hypothèse d'un développement général du nucléaire dans la seconde moitié de ce siècle.

Les HTR

Ces réacteurs à haute température peuvent brûler le plutonium civil et militaire. Leur puissance plus faible (100 à 300 MWé) pourrait constituer un avantage économique par le moindre investissement initial, dans une économie de marché qui pénalise les investissements à long temps de retour. Ces puissances plus réduites permettraient de viser le marché des puissances moyennes. Deux projets actifs sont en cours, différant essentiellement par la forme du combustible : PBMR 110 MWe (RSA ESKOM, UK BNFL)

GT-MHR 285 Mwe (USA Général Atomics, Russie, Framatome)

Le combustible, fortement enrichi en plutonium, est fait de particules enrobées de plusieurs couches dont une de carbure de silicium, tolère une température de 1600°C, ce qui rend impossible la fusion du cœur, et constitue la première barrière de confinement.

Le refroidissement est assuré par de l'hélium comprimé entraînant une turbine à gaz. La cuve à hélium constitue la seconde barrière, la troisième étant le bâtiment lui-même. La puissance résiduelle en cas d'incident est évacuée passivement par convection.

LE COÛT DU KWH NUCLÉAIRE AVEC LES FILIÈRES ASSISES SUR L'EXPÉRIENCE

REP de 1 à 1,6 GW : coût total 3 à 4 c€/kWh (y compris tous les coûts externes, dont la gestion des déchets et le démantèlement, chiffre DGEMP conforté par l'étude finlandaise récente²). La part du combustible uranium dans ce coût est très faible, de l'ordre de 0,6 c€/kWh (le prix de l'uranium avait chuté de moitié entre les années 80 et le début des années 2000, mais vient de remonter rapidement par suite de l'accroissement de la demande, sans toutefois handicaper sérieusement la compétitivité du nucléaire; la production de l'uranium ne pose aucun problème géopolitique, les sources étant bien réparties sur la planète. Actuellement seules les mines de plus haute teneur sont exploitées, et la recherche minière avait été stoppée pendant 20 ans lorsque les investissements nucléaires ont connu une pause.

RNR de 1 à 1,5 GW environ 4 à 5 c€/kWh

HTR de 200 à 300 MW environ 4 à 5 c€/kWh

A comparer au cycle combiné gaz : coût interne de 5 à 6 c€/kWh³ (+ coût externe CO₂ de 1 à 2,5 c€/kWh, soit un coût total de 5 à 7,5 c€/kWh)

Le ministère de l'industrie publie périodiquement les "coûts de référence" des différentes énergies, en ayant soin, pour le nucléaire, d'y incorporer les coûts "externes" ; l'OPECST a contrôlé dans un rapport public le bien fondé des hypothèses de ces coûts de référence, notamment les ordres de grandeur des provisions constituées pour financer le démantèlement des installations (0,14 c€/kWh) et le stockage des

² les coûts de référence de la DGEMP, comme les coûts calculés par les économistes finlandais, le sont avec des taux d'actualisation de 5 et de 8 %, et aboutissent à des coûts de kWh compris entre 3 et 3,3 c€. Le coût de 4 c€ correspond à un taux de retour sur investissement compris entre 12 et 15 %, valeurs souvent citées par les financiers.

³ Avec un gaz à 5 \$/MBTU, soit 2 c€/kWh thermique

déchets (0,15 c€/kWh). Malgré cela, ces coûts restent contestés par une partie du public qui a du mal à comprendre les mécanismes financiers de ces provisions.

La question des assurances est également l'objet de contestations, certains ayant en tête les conséquences d'un accident tel que ceux de Tchernobyl et Fukushima. En fait, les conséquences à l'extérieur du site d'un accident de fusion de cœur affectant un réacteur de type occidental ont été nulles à Three Miles Island, et seraient en tout état de cause largement plus faibles qu'à Tchernobyl et Fukushima; il en résulte que le coût, pour l'essentiel, serait celui lié à la perte de l'installation et à son démantèlement, soit quelques milliards d'euros. La probabilité d'un tel événement étant très faible, l'incidence en termes d'assurance resterait faible.

Certains reprochent également au nucléaire de ne pas entrer dans ses coûts les dépenses de recherche auquel il a donné lieu. Cet argument est en partie vrai, mais en partie seulement. En effet, outre l'achat de la licence à Westinghouse, entièrement supporté par le prix du kWh, EDF et Framatome ont largement contribué au financement de la recherche et développement, financements également pris en compte dans le prix du kWh. Pour le reste, il serait souhaitable de dresser un bilan complet des coûts de la part de la recherche financée par les contribuables et des bénéfices apportés par le programme nucléaire en termes de balance des paiements et d'emploi ? Il serait aussi utile de comparer cette participation du contribuable à d'autres, à travers les prix de rachat de diverses autres sources d'énergie.

LES SYSTÈMES NUCLÉAIRES

On constate que chacune des filières nucléaires passées en revue a un objectif prioritaire, soit produire de l'énergie électrique au moindre coût, soit mieux valoriser les ressources d'uranium, soit contribuer à la diminution du stock de Pu. Chaque filière privilégie seulement un ou deux de ces objectifs. Une association de plusieurs de ces filières, nommée **système nucléaire**, est nécessaire pour satisfaire l'ensemble des objectifs, dans une proportion qui est fonction de la hiérarchie des objectifs retenue :

- production d'énergie électrique et/ou thermique,
- valorisation des ressources naturelles,
- destruction de plutonium et/ou d'actinides mineurs

Quels pourraient être d'éventuels systèmes nucléaires futurs ?

On peut imaginer que les REP actuels, brûlant déjà une partie du Pu dans le MOX, seraient complétés à moyen terme par des EPR à sûreté et performances encore accrues, puis à plus long terme par des RNR pour mieux utiliser les ressources d'uranium et brûler le plutonium, éventuellement complétés ensuite par des réacteurs hybrides pour réduire les déchets d'actinides mineurs, selon l'état de développement de ces nouvelles filières.

Les HTR seraient utilisés dans l'hypothèse d'une limitation nécessaire des stocks de plutonium, et/ou pour servir des marchés de puissance unitaire plus faible. Les VHTR pourraient éventuellement ouvrir de nouveaux marchés dans le domaine des carburants de synthèse pour remplacer progressivement le pétrole.

LES RÉACTEURS DE GÉNÉRATION IV ?

Les concepts Génération IV résultent d'un réexamen international de l'ensemble des technologies imaginables (et pour la plupart peu ou prou développées dans les années cinquante). Ils visent, à l'exception du VHTR, à intégrer dans une même filière la production d'électricité, la valorisation des ressources et une réduction significative des déchets à vie longue.

- **Les RNR à gaz** sont inspirés des HTR, mais à neutrons rapides ou intermédiaires. Le combustible très enrichi est complexe et l'exploitation plus délicate.
- **Les RNR à métaux liquides (sodium ou plomb)** sont inspirés des expériences acquises, en essayant de simplifier les réacteurs, d'exclure un certain nombre de risques d'accidents et de faciliter l'inspection en service.
- **Les RNR à eau supercritique** tentent de bénéficier de l'expérience mondiale des réacteurs à eau, tout en jouant sur les caractéristiques particulières de l'eau supercritique

- **Réacteurs à sels fondus** : à combustible liquide servant aussi de caloporteur, dont les produits de fission neutrophages sont extraits en continu, ce qui augmente le nombre de neutrons disponibles. Ces réacteurs, pour des raisons de physique et de sûreté, sont à neutrons thermiques ; de ce fait, ils sont particulièrement bien adaptés au cycle thorium/uranium 233, la fission de l'uranium 233 par des neutrons thermiques permettant d'envisager des systèmes surgénérateurs. En outre, l'inventaire en matière fissile est beaucoup plus faible que dans les RNR à cycle uranium/plutonium, ce qui faciliterait un taux de croissance du nucléaire beaucoup plus rapide. Enfin, ils génèrent peu d'actinides mineurs à vie courte ou moyenne, ce qui réduit la charge thermique des déchets à stocker. Mais ce système présente également des inconvénients dont certains ont conduit, il y a 40 ans, à son abandon : la filière thorium/uranium 233 doit être amorcée par de l'uranium 235 (lui-même accompagné d'uranium 238) ou par du plutonium ; la filière sera donc moins "propre" qu'il n'y paraît. Par ailleurs le traitement en ligne du combustible pour en extraire les produits de fission est complexe et coûteux, les PF piégés dans le graphite augmentent considérablement le volume de déchets à haute activité, la radioactivité des actinides à très long terme est supérieure à celle des actinides du cycle U – Pu (mais dans un cas comme dans l'autre, la radioactivité des actinides susceptible de revenir en surface est faible). Le confinement de la radioactivité, notamment du tritium, est délicate, du fait de la suppression de la première barrière. Globalement, ce cycle thorium présente un attrait limité tant que des besoins massifs en matière fertile n'existent pas.
- Les **VHTR**, réacteurs à gaz à très haute température, ont pour cible les procédés thermo-chimiques, notamment la production d'hydrogène.

À ces six concepts de réacteurs du Forum Génération IV, dont cinq sont surgénérateurs, il convient d'ajouter les recherches sur les **systèmes hybrides** (Systèmes Pilotés par Accélérateur ou SPA⁴). Ce sont des réacteurs sous-critiques à neutrons rapides, ne fonctionnant qu'avec une source extérieure de neutrons de haute énergie injectés par un accélérateur. Leur avantage est de pouvoir brûler les actinides mineurs, ce que ne peuvent pas faire les réacteurs critiques, même lorsqu'ils sont à spectre rapide, limités qu'ils sont par la pénurie de neutrons et, surtout, par la très faible proportion de neutrons retardés essentiels pour assurer la stabilité des réacteurs critiques. Leur coût est inconnu, mais il serait nécessairement plus élevé que celui des RNR critiques. Une estimation le met à plus du double de celui des EPR.

La recherche française est particulièrement orientée sur deux filières à neutrons rapides : le RNR sodium et le RNR à gaz à haute température, et une filière à neutrons thermiques à très haute température (projet Antarès).

Les technologies stratégiques concernent les procédés de recyclage du combustible, la constitution des combustibles avancés et les matériaux du cœur et de la chaudière exposés à un flux intense de neutrons rapides. On peut penser que les premiers réacteurs commerciaux de génération IV entreront en service à partir de 2040/2050.

On peut certes évoquer la **fusion nucléaire contrôlée**, qui dans la filière par confinement magnétique, a subi une accélération avec la décision de construire ITER, mais pendant les première et seconde périodes, seuls des Tokamaks expérimentaux seront réalisés et essayés: ce n'est qu'en fin de troisième période que l'on pourrait, si ces essais sont concluants, voir apparaître les premiers MWh significatifs sur les réseaux. on sera donc encore loin de l'exploitation industrielle courante même en fin de siècle. Seule une réussite inattendue dans les recherches sur le confinement inertiel pourrait accélérer l'arrivée de la fusion sous cette autre forme. Ce n'est que vers 2012/2013 que l'on aura une perception plus claire de cette possibilité après les premières tentatives de fusion sur le LMJ (Laser MégaJoule)

LA QUESTION DU PLUTONIUM

Une question est fondamentale : le plutonium est-il un déchet ou une matière précieuse ?

⁴ également appelés par leur acronyme américain ADS (Accelerator Driven System)

Dans une perspective d'abandon du nucléaire, c'est un déchet dont l'élimination entraîne un coût externe, (de 100 à 700 M€/ t Pu, selon les moyens d'élimination)

Dans une perspective de développement du nucléaire durable, c'est au contraire une matière énergétique de tout premier ordre puisqu'il est le combustible de choix des RNR, son coût n'est alors que de 0 à 15 M€/ t Pu)

Dans un cas comme dans l'autre, il apparaît nécessaire de définir de façon précise le devenir de cet élément en intégrant tous les aspects (retraitement, transport, recyclage, déchets associés, stockages ultimes) dans un " plan plutonium".

ANNEXE 6 LES AUTRES RISQUES

Le public a trois frayeurs principales:

- La crainte des radiations (débattu en annexe 3)
- La crainte des déchets (débattu en annexe 4)
- La craintes des accidents (largement évoqué dans le corps de ce rapport, avec compléments de stratégie en fin de cette annexe)

Outre ces trois frayeurs, d'autres, moins souvent évoquées, sont discutées ci-dessous.

LES RISQUES DE PROLIFÉRATION

Le nucléaire civil est souvent associé, dans l'esprit du public, avec les armes nucléaires. De fait, il n'est pas techniquement impossible d'utiliser les matières fissiles du nucléaire civil pour fabriquer des armes nucléaires. Mais il est très difficile de le faire en cachette, et il existe d'autres moyens d'en fabriquer autrement plus faciles, notamment en enrichissant l'uranium naturel en uranium 235 par centrifugation dans de petites installations fort discrètes.

Il est avéré que tous les détenteurs de l'arme nucléaire (8 pays : USA, Russie, France, Grande Bretagne, Chine, Israël, Inde, Pakistan) l'ont construite avant d'avoir une industrie électronucléaire civile. Depuis 60 ans que l'arme nucléaire existe et 50 que le nucléaire civil existe, jamais une arme nucléaire n'a été réalisée à l'aide du nucléaire civil, où que ce soit dans le monde, et cette situation a de bonnes raisons de perdurer. La vigilance s'impose toutefois dans les transferts de technologies nucléaires en ce qui concerne l'enrichissement de l'uranium, les types de réacteurs permettant un chargement et un déchargement fréquents, et le traitement des combustibles nucléaires usés.

LE RISQUE DE PERTE DE COMPÉTENCE

Certains dirigeants politiques de mouvement écologiste antinucléaire avancent l'idée que les risques à moyen et long terme du nucléaire ne sont pas compatibles avec les inconnues pesant sur l'évolution des sociétés humaines. Ils prennent en exemple quelques pays qui ont récemment subi une crise majeure ayant amené un délabrement de la structure nationale accompagné de désordres sociaux, facteurs possibles de perte de compétence mettant en avant le risque humain dans la gestion de l'énergie nucléaire.

Quels sont les catégories de risques humains possibles? :

- Les risques liés à des réactions humaines déficientes et dangereuses dans la commande manuelle des centrales. Ce problème n'est pas propre aux centrales nucléaires, mais à toutes les commandes sophistiquées exigeant une très grande rigueur et des réactions précises et immédiates face à de nombreux paramètres évoluant rapidement, on le retrouve dans le pilotage des avions, des métros à haute densité de circulation et dans beaucoup d'autres applications. Outre la formation poussée du personnel chargé de ces équipements, qui n'a aucune raison de perdre de sa qualité, la robotique s'est développée et continuera à se développer pour répondre à ces situations où elle réagit de manière plus sûre que les hommes : peu de passagers du métro parisien savent qu'ils sont conduits par un automate pendant toutes les heures de forte circulation où l'intervalle réduit entre rames ne serait pas tenable de manière fiable avec une conduite humaine. Le développement de la robotique est tel qu'il ne semble pas qu'il y ait du souci à se faire de ce côté. Si un robot avait géré la conduite de Tchernobyl, il n'aurait pas enfreint les règles de sécurité.
- Les risques liés à une délinquance criminelle croissante, associée ou non au terrorisme politique. Il y a peu de lieux aussi sécurisés qu'une centrale nucléaire, et ce type de délinquance a tellement d'autres cibles plus faciles que cet argument ne semble pas de grand poids. Il est beaucoup moins difficile de se procurer des matières radioactives pour la préparation de bombes sales dans le milieu hospitalier que dans une centrale ou dans un centre de retraitement. Le plus grave accident civil (non criminel) du à la dispersion de matières radioactives a eu lieu au Brésil à Goiania où une source radioactive médicale a été jetée dans une décharge, dispersant du césium radioactif.

Les risques liés à une perte générale de compétence par une baisse du niveau des élèves formés aux différents niveaux de l'enseignement. On peut penser que les problèmes qui font débat actuellement dans la plupart des pays développés en ce qui concerne la désaffection vis à vis des sciences n'auront pas de permanence et que ce n'est qu'une phase transitoire dans l'évolution de nos sociétés. Il faut d'ailleurs remarquer qu'une fraction suffisante de diplômés de haute qualité existe toujours.

STRATEGIE FACE AU RISQUE D'ACCIDENT

Principes de sûreté limitant les conséquences des accidents

Outre les analyses de sûreté de la conception visant à se prémunir contre toutes les causes

imaginables pouvant être initiatrices d'accident, les principes suivants visent à en limiter les

conséquences:

Le principe de base est une défense en profondeur sur 3 postes-clés, basée sur plusieurs lignes de défense indépendantes sur chacun d'eux :

- Contrôle de la réaction en chaîne, par plusieurs moyens indépendants d'arrêter cette réaction
- Evacuation de l'énergie du cœur après arrêt, par plusieurs systèmes redondants et diversifiés d'évacuation de puissance résiduelle
- Confinement de la radioactivité, par plusieurs barrières entre produits radioactifs et environnement

Ces concepts de défense en profondeur confèrent en même temps aux centrales nucléaires une résistance notable face aux risques d'attentats et en limiteraient les conséquences potentielles tant matérielles qu'environnementales.

Les risques d'attentat se prêtent certes mal à un débat public pour des raisons évidentes de discrétion sur les contre-mesures, ce qui ne permet pas de donner des indications précises sur les modes de protection. On peut cependant donner quelques indications générales : par exemple, une étude publiée dans la revue américaine SCIENCE explique pourquoi l'enceinte de confinement heurtée de plein fouet par un avion de ligne serait certes endommagée mais empêcherait que la chaudière nucléaire soit affectée.

Un rapport publié par WISE en 2002 avait annoncé qu'un attentat du style "11 septembre" sur La Hague ferait autant de dégâts que « 67 Tchernobyl ». Il est relativement aisé de montrer qu'une telle affirmation est absurde pour plusieurs raisons : impossibilité de provoquer une réaction en chaîne avec des combustibles usés, or c'est elle qui a été à l'origine de la forte dispersion de produits de fission à Tchernobyl ; absence d'iode 131, responsable des seuls cancers avérés à Tchernobyl ; et, argument le plus simple et le plus convaincant, la présence de milliers de m³ d'eau dans la piscine alors que la combustion de 30 tonnes de kérosène ne permet d'évaporer que 600 tonnes d'eau !. De fait, la principale arme des auteurs d'attentat est la peur de tout ce qui est radioactif, et il est essentiel de tout mettre en œuvre pour que le public ait une plus juste appréciation de ces risques. Les exercices de crise peuvent y contribuer, mais un travail de fond est à effectuer dès l'école.

ANNEXE 7 LES SCÉNARIOS DU NUCLÉAIRE

On peut en simplifiant envisager trois scénarios pour l'avenir du nucléaire :

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

Quelles seraient les conséquences probables de chacun de ces scénarios en matière d'énergie fournie, de gestion des ressources et des déchets, et en termes d'environnement et d'économie ?

Scénario n° 1 : arrêt du nucléaire

- L'arrêt du nucléaire entraînerait un accroissement de la demande sur les combustibles fossiles, surtout sur le gaz naturel, induisant un épuisement accéléré de ceux-ci et une hausse de leur prix et du prix de l'électricité.
- Ce scénario ne participe pas à la réduction, même modeste, des rejets de CO₂, et bien au contraire les accroît.
- Ce scénario détruit l'espoir d'une réduction des quantités de plutonium et des déchets nucléaires existants au moment de l'arrêt.

Scénario n° 2 : relance limitée du nucléaire

Ce serait le cas où la relance aurait lieu seulement en Asie et en Europe. Cette relance limitée ne créerait pas de problème majeur sur les ressources d'uranium, les réacteurs à eau suffiraient. Cela ne contribuerait que modérément à la réduction du CO₂, et la problématique du plutonium resterait sensiblement la même que dans le cas d'arrêt du nucléaire. Cette relance limitée aiderait toutefois l'Europe et le Japon à respecter leurs engagements "Kyoto".

Scénario n° 3 : relance forte du nucléaire

Ce serait le cas d'une relance aux Etats-Unis entraînant le reste du monde. Ce scénario :

- Entraînerait un choix de systèmes nucléaires exigeant d'optimiser la production d'énergie, la gestion des ressources et celle des déchets (*ex. REP, RNR*) et ouvrirait de nouveaux débouchés (*HTR*)
- Permettrait une limitation du coût de l'électricité
- Permettrait une forte réduction des rejets de CO₂

La réflexion sur ces scénarios doit s'exercer dans le cadre d'une analyse élargie à l'ensemble des énergies primaires, en tenant compte des risques et avantages de chacune d'elles. Les éléments de cette réflexion sont abordés dans les chapitres qui suivent.

ANNEXE 8 LES OUTILS D'UNE REFLEXION PROSPECTIVE SUR L'ENERGIE

Dans les démocraties, les décisions sont prises au cours d'un processus participatif qui exige qu'une majorité du public soit convaincue du bien-fondé de ces décisions. Il importe donc que le public soit convenablement informé et instruit pour exercer sa réflexion préparatoire aux décisions démocratiques. Deux outils sont utiles pour exercer cette réflexion et permettre de choisir les bouquets énergétiques du futur :

- ❖ **Une conception équilibrée du risque**
- ❖ **Une pensée éthique**

UNE CONCEPTION ÉQUILIBRÉE DU RISQUE

Une conception équilibrée du risque se résume en deux phrases :

- **Il n'est pas raisonnable d'exiger des certitudes sur l'existence d'un dommage pour commencer à prendre des mesures préventives.**
- **Il n'est pas plus raisonnable d'exiger des certitudes sur l'absence d'un dommage avant d'autoriser une activité.**

Cette conception équilibrée d'un risque géré par le "principe de précaution proportionnée" impose d'agir dans la transparence, ce qui exige de mettre les idées à l'épreuve de la contestation par le débat public, sous la condition de compétence et pertinence suffisantes des opinions émises. La diffusion de l'information et le débat public peuvent contribuer à transformer les risques subis et mal estimés, provoquant le rejet, en risques mieux mesurés et choisis lorsqu'ils ont des contreparties positives suffisantes.

L'acquisition d'une conception équilibrée du risque, ainsi que des ordres de grandeur des coûts, devrait permettre au public de comparer de manière plus objective les différentes sources d'énergie.

Cette objectivité doit aussi être recherchée avec le souci de mettre en perspective historique l'évolution des risques, car dans l'exploitation de toutes les sources d'énergie, les risques se sont progressivement réduits avec le progrès technique et continueront à se réduire par la généralisation rapide de la culture de sûreté.

On doit aussi veiller à l'éthique, en vérifiant l'exactitude et la pertinence des informations sur les avantages et les inconvénients, et particulièrement sur les risques ou les incidents, éviter de confondre ceux survenus sur des lieux de stockage de déchets nucléaires militaires russes et américains très anciens, n'ayant pas bénéficié des technologies actuelles de sûreté, ou plus récemment ceux survenus dans quelques laboratoires de recherche, avec des incidents de centrales nucléaires.

UNE PENSEE ETHIQUE

L'éthique est sous-jacente dans les choix énergétiques :

- Par une prise de conscience que **l'environnement planétaire (le climat) est un bien commun que personne ne peut s'octroyer le droit de dégrader** (le CO₂ émis en Amérique, en Chine ou en Europe a le même effet sur la planète)
- Par un objectif d'équité visant un **développement solidaire pour tous, clé d'un apaisement de conflits dus aux trop grandes inégalités, et de l'amélioration de la santé publique.**
- Par le souci de **transmettre aux générations à venir un monde vivable durablement, sans compromettre la santé publique de la génération actuelle.**

Ce sont des questions éthiques "classiques", auxquelles on peut ajouter :

- **Un devoir éthique des médias de délivrer des informations de bonne foi et non déformées.**
- **Le devoir du citoyen de rechercher une information objective afin de ne pas être manipulé par certains lobbies ou médias.**

Une conception équilibrée du risque et une information respectant l'éthique devraient permettre de considérer les risques des sources d'énergie sur le même plan que les autres risques industriels, et d'établir progressivement un consensus confiant suffisamment robuste pour

prendre des décisions raisonnées et pour résister dans la durée aux inévitables accidents de parcours communs à tous les développements industriels et énergétiques.

APRES LA REFLEXION, LA DECISION

Etre muni d'une appréciation du risque étayée par une analyse sérieuse, et imprégné de pensée éthique conduit-il automatiquement à de bonnes décisions quant aux choix énergétiques futurs?

- Probablement si ces choix étaient faits au sein d'une gouvernance mondiale où tous les pays auraient la même attitude vis à vis des mesures à prendre contre le réchauffement climatique,
- mais pas forcément lorsque ces décisions sont prises dans un pays donné à un moment donné, fatalement influencé par ses caractères propres (existence ou non de réserves fossiles, état de développement), par la position des autres pays sur ce point, et aussi par le système économique dominant.

Le classement par ordre de mérite des diverses sources d'énergie sera fortement influencé par le niveau atteint par le prix de la tonne de CO₂ évitée, que ce prix résulte d'un marché mondial du carbone ou de décisions de taxation des émissions de carbone, et par l'internalisation de ce coût externe dans le prix de l'énergie produite.

Ce classement sera également influencé par le régime politique de la démocratie qui exige un consensus public, et par le régime économique dominant du libéralisme. Les investissements portant sur des fortes puissances indivisibles comme le nucléaire, le grand transport du gaz naturel, ou les grandes centrales "propres" brûlant du charbon, sont très capitalistiques, à longs délais et demandent un long temps de retour de l'investissement, ce qui n'est guère apprécié du marché des capitaux qui privilégie les investissements à temps de retour rapide et préfère s'investir dans des centrales à cycle combiné au gaz à 500 €/kW constructibles en 3 ans plutôt que dans une centrale nucléaire à 1500 €/kW à construire en 6 ans. Le coût "interne" (hors taxe CO₂) du kWh final est du même ordre, mais dans le premier cas, le gaz entre pour 70% dans ce coût interne, et il y a émission de CO₂ qui ne restera pas longtemps gratuite. Les règles du marché de l'économie libérale jouent contre l'environnement et contre l'éthique, sauf si elles sont adaptées pour prendre en compte les coûts dits "externes".

Le courage nécessaire pour s'écarter un peu du strict libéralisme au profit de l'éthique dans les décisions à prendre sur les choix énergétiques sera un révélateur :

- du degré de prise au sérieux de la dérive climatique et des engagements "Kyoto" par les gouvernements.
- de leur degré d'engagement dans l'éthique d'un développement durable.

On doit souligner que la France s'est dotée en 2005 d'une loi dite "facteur 4" fixant l'objectif de diviser par 4 les émissions de CO₂ d'ici 2050 par rapport à leur niveau de 1990, objectif qui va donc très au delà des premiers engagements de Kyoto, alors que la France est déjà en Europe le pays ayant les plus faibles émissions grâce à son parc nucléaire existant.

ANNEXE 9 CONVERSION D'UN ÉCOLOGISTE OPPOSANT AU NUCLÉAIRE

Fukushima, la meilleure pub pour le nucléaire ([The Guardian](#) Londres 22 mars 2011)

Certes, l'accident de la centrale de Fukushima a montré les limites de l'industrie nucléaire. Mais il a aussi démontré qu'elle n'est pas si dangereuse. Et en l'absence d'alternative crédible, l'atome reste l'énergie la plus raisonnable. Telle est l'opinion provocatrice du journaliste écologiste vedette George Monbiot.

"Vous ne serez pas surpris d'apprendre que les événements au Japon ont modifié la vision que j'avais de l'énergie nucléaire. Mais vous risquez d'être surpris par le changement en question. A la suite de la catastrophe de Fukushima, je ne suis plus neutre vis-à-vis du nucléaire. J'en suis un partisan.

Une vieille centrale pourrie dotée d'une sécurité inadaptée a été frappée par un séisme monstrueux et un violent tsunami. Elle s'est retrouvée privée d'électricité, ce qui a mis le système de refroidissement hors service. Les réacteurs ont commencé à exploser et à entrer en fusion.

Ce désastre a révélé au grand jour le résultat d'une conception défailante et d'économies réalisées à la va-vite. Pourtant, pour ce que l'on en sait, personne n'a encore été victime d'une dose mortelle de radiations.

Des écologistes ont grossièrement exagéré les dangers de pollution radioactive. Si d'autres formes de production de l'énergie ne causaient pas de dégâts, l'impact de Fukushima serait plus fort. Mais l'énergie, c'est comme les médicaments : s'il n'y a pas d'effets secondaires, il y a de grandes chances que ça ne marche pas.

Les énergies renouvelables dégradent le paysage

Comme la plupart des écologistes, je suis en faveur d'un développement sans précédent des énergies renouvelables. Mais je peux comprendre de quoi se plaignent leurs adversaires.

Il n'y a pas que les éoliennes qui inquiètent les gens, mais aussi les nouvelles connexions au réseau (les pylônes et les câbles d'alimentation). Plus la proportion que représente l'électricité renouvelable augmentera, plus il faudra de systèmes de stockage pour que l'on puisse continuer à s'éclairer.

Comme d'autres, j'ai appelé à ce que les énergies renouvelables servent à la fois à remplacer l'électricité produite grâce aux combustibles fossiles et à augmenter le volume de production, afin de supplanter le pétrole utilisé pour les transports et le gaz de chauffage.

Mais faut-il également que nous exigions qu'elles se substituent à la capacité nucléaire actuelle ? Plus nous imposerons de missions aux énergies renouvelables, plus leur impact sera grand sur le paysage, plus il sera difficile de convaincre l'opinion publique.

Peu de rendement des capteurs solaires

Sous nos latitudes, la production d'énergie ambiante à petite échelle est une perte de temps. La production d'énergie solaire au Royaume-Uni implique un gaspillage spectaculaire de ressources déjà rares. Elle est d'une inefficacité désespérante et ne parvient que misérablement à satisfaire la demande.

L'énergie éolienne est plus ou moins sans intérêt dans les zones peuplées. Cela tient en partie au fait que nous nous sommes installés dans des endroits abrités du vent, en partie au fait que les turbulences engendrées par les bâtiments interfèrent avec l'écoulement de l'air et perturbent le mécanisme.

Et avec quoi ferions-nous tourner nos filatures, nos fours à briques, nos hauts-fourneaux et nos chemins de fer électriques — pour ne rien dire de technologies industrielles avancées ? Des panneaux solaires sur les toits ?

C'est quand on s'intéresse aux besoins de l'ensemble de l'économie que l'on cesse d'être amoureux du principe de la production locale. Un réseau national (ou, mieux encore, international) est une condition indispensable à une alimentation en énergie essentiellement renouvelable.

Le nucléaire préférable aux énergies vertes

Même avec une population nettement moindre que celle d'aujourd'hui, les produits manufacturés, dans une économie agricole, étaient réservés à une élite. Une production énergétique 100 % verte —

décentralisée, fondée sur les produits de la terre — serait bien plus dommageable pour l'humanité qu'une fusion du cœur d'un réacteur nucléaire.

Mais la source d'énergie à laquelle vont revenir la plupart des économies si elles renoncent au nucléaire, ce n'est pas le bois, l'eau, le vent ou le soleil, mais les carburants fossiles.

A tout point de vue (changement climatique, impact des mines, pollution locale, dommages et morts liés à l'industrie, et même émissions radioactives), le charbon est cent fois pire que l'énergie nucléaire. Avec l'expansion de la production de gaz de schiste, l'extraction du gaz naturel devient tout aussi dommageable.

Je n'en exècre pas moins les menteurs qui s'occupent de nucléaire. Oui, je préférerais que tout le secteur cesse ses activités s'il existait des solutions de rechange sans danger.

Toutes les technologies énergétiques ont un coût ; l'absence de technologies énergétiques également. L'énergie atomique vient d'être mise à très rude épreuve, et l'impact sur la population et sur la planète a été limité. La crise de Fukushima a fait de moi un partisan de l'énergie nucléaire.