

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

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

INTRODUCTION

Une "transition énergétique", présentée comme l'expression d'un ressenti populaire fait partie des objectifs affichés par les gouvernements. Ce terme 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 particulièrement évoquée depuis l'accident de Fukushima, en passant par un développement très poussé des énergies renouvelables, par le rêve ambitieux d'une réduction drastique des combustibles fossiles, ou de leurs émissions de CO₂, et le développement de l'hydrogène-énergie.

Le cap de cette transition reste toutefois 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

Il est donc nécessaire d'examiner ce qui conduit à un tel éventail de contenus dans le ressenti du public

PREMIER RESENTI GENERAL : LES ENERGIES RENOUVELABLES SONT SEDUISANTES

Elles sont naturelles et leurs sources nous sont familières dans la nature présente sous nos yeux, soleil, vent, fleuves, biomasse. Contrairement aux énergies fossiles qui puisent dans un stock géologique historique en voie d'épuisement, les EnR sont éternelles puisque leurs sources se renouvellent naturellement, soleil, vent, eau des fleuves sont ces énergies renouvelables tant que le soleil, à l'origine de toutes, brillera.

Contrairement aux énergies fossiles primaires (charbon, pétrole, gaz) que l'on ne peut transformer en énergie utile que par une combustion qui émet des gaz à effet de serre dégradant le climat, les EnR présentent l'avantage de se transformer en énergie utile sans passer par cette combustion émettrice de GES (sauf pour la biomasse, mais il y a alors 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 ?

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 par surcroît la cause

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).

principale du réchauffement climatique, dont le danger se confirme d'année en année, dont le GIEC mesure l'accélération.

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 que ces sources continuent à l'être pour les pays en développement. Elles constituent encore environ 80% de la consommation mondiale d'énergie primaire.

Les conséquences sur le climat paraissant encore lointaines, et les avantages économiques et stratégiques des énergies fossiles si importants qu'un espoir est volontiers accepté, celui de la capture et de la séquestration du CO₂ (CSC) émis, qui permettrait la poursuite de leur usage en limitant ses dégâts sur le climat.

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.

Il s'y ajoute que le risque induit sur l'homme par les rayonnements ionisants accompagnant les réactions nucléaires reste chargé de mystère dans l'imaginaire 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 insuffisant pour lui permettre 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 envisageables, supérieure à 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 un réacteur nucléaire 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.

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

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.

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 CSC, 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, dont certains peuvent douter que l'on soit capable de les recenser tous, ce qui fait du nucléaire un sujet tabou où l'émotionnel rend parfois 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 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 flotte de centrales, variables selon les filières anciennement retenues et leur degré de protection, renforcent leur sécurité et hésitent à définir clairement leur mix énergétique 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 réduisant un peu les émissions de CO₂,
- Aux Etats-Unis les ombres du peak-gas et même du peak-oil se sont évanouies pour plusieurs décennies avec l'apparition des gazes 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 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 les risques et les avantages des différentes sources d'énergie ? Le refus de l'énergie nucléaire sur la base de ses risques spécifiques est-il fondé sur les faits et une pensée rationnelle?, ou n'est-il pas dominé par 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.

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)⁴, 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

⁴ 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 1 kW/m^2 dans les conditions les plus favorables, mais les conditions réelles de transformation exigent avec les technologies actuelles environ 2 ha/MW électrique quelque soit le système photovoltaïque ou thermodynamique, ce qui correspond à environ $0.05\text{ kWélectrique/m}^2$.

précision, mais, à la louche, en France où la consommation annuelle d'énergie primaire va être dans cette décennie d'environ 250 à 300 Mtep⁵, 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 ?

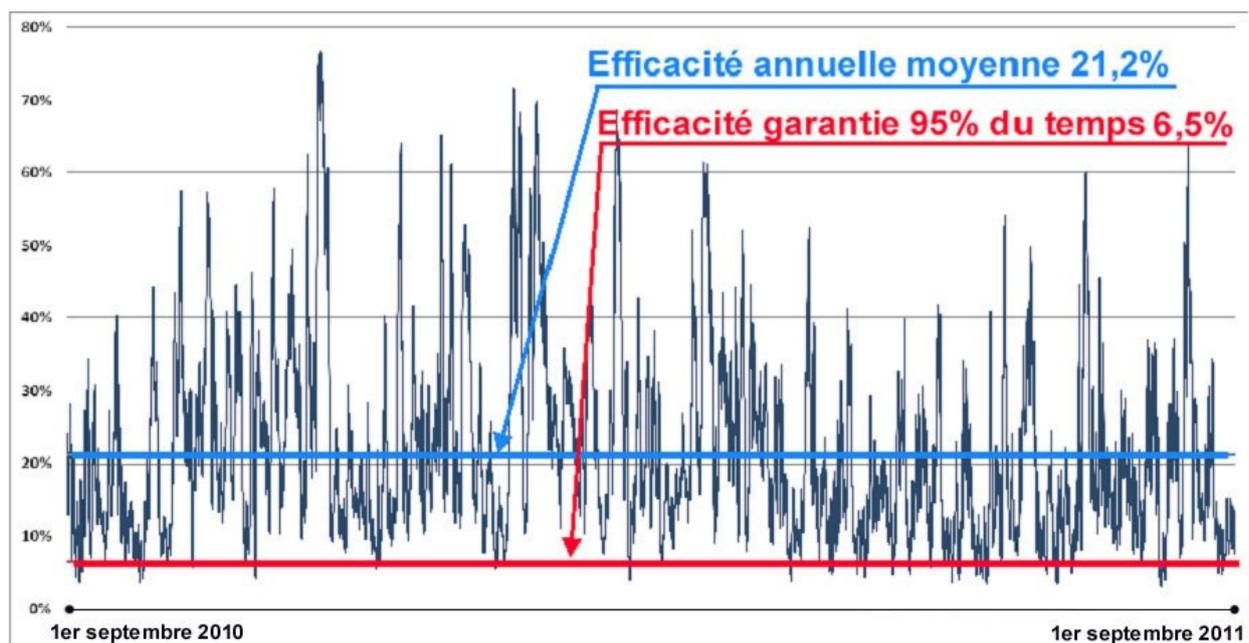
Les deux énergies renouvelables qui disposent du plus grand potentiel de développement, l'éolien et le solaire sont des énergies intermittentes.

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.

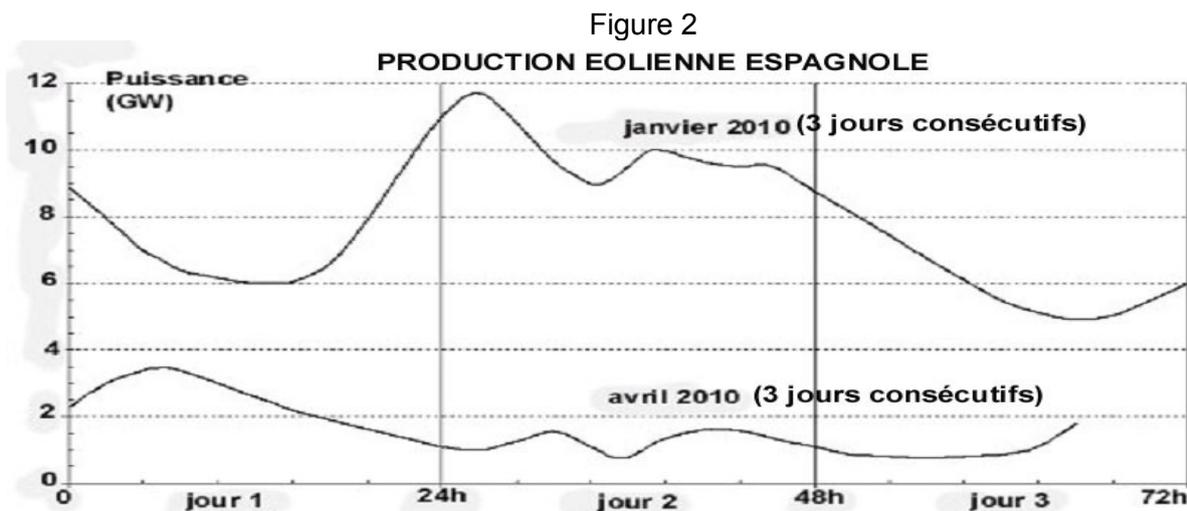
Par contre, l'intermittence de l'éolien est beaucoup plus préoccupante, car particulièrement élevée comme le montre la figure 1, et mal prévisible. La raison en est qu'une éolienne n'est performante que pour des vents compris entre 40 et 95 km/h, car sa puissance variant à peu près comme le cube de la 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



source RTE



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 variées⁶.

• 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

⁶ 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](http://www.sauvonsleclimat.org)); cette étude confirme la très grande variabilité de l'éolien au niveau européen.

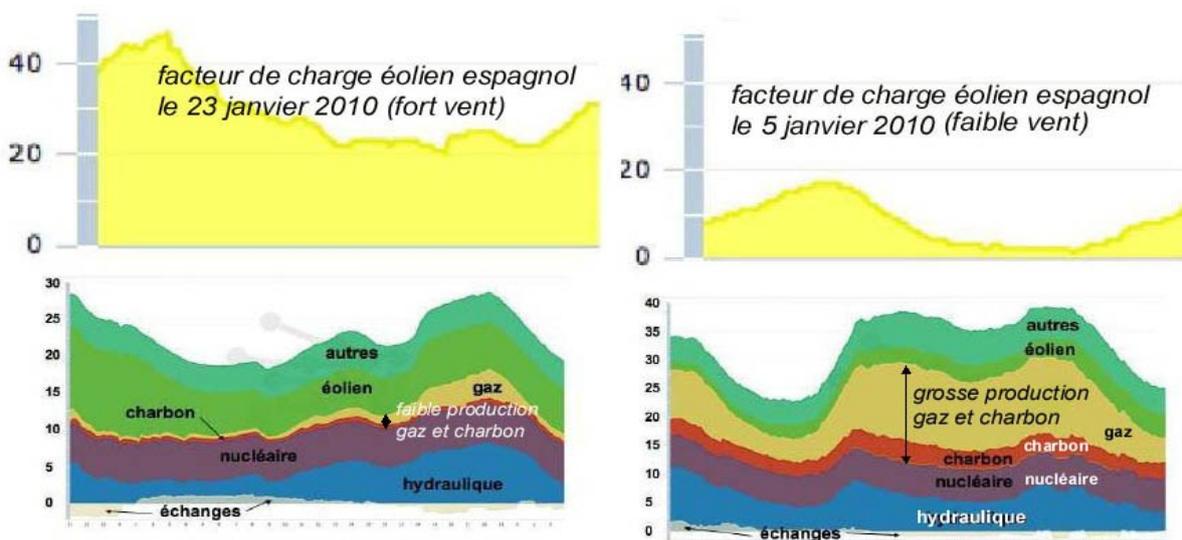
moyens sont insuffisants, l'importance et la rapidité des fluctuations de l'éolien et du solaire limitent de facto leur contribution à la production d'électricité, qui ne peut être que minoritaire.

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)

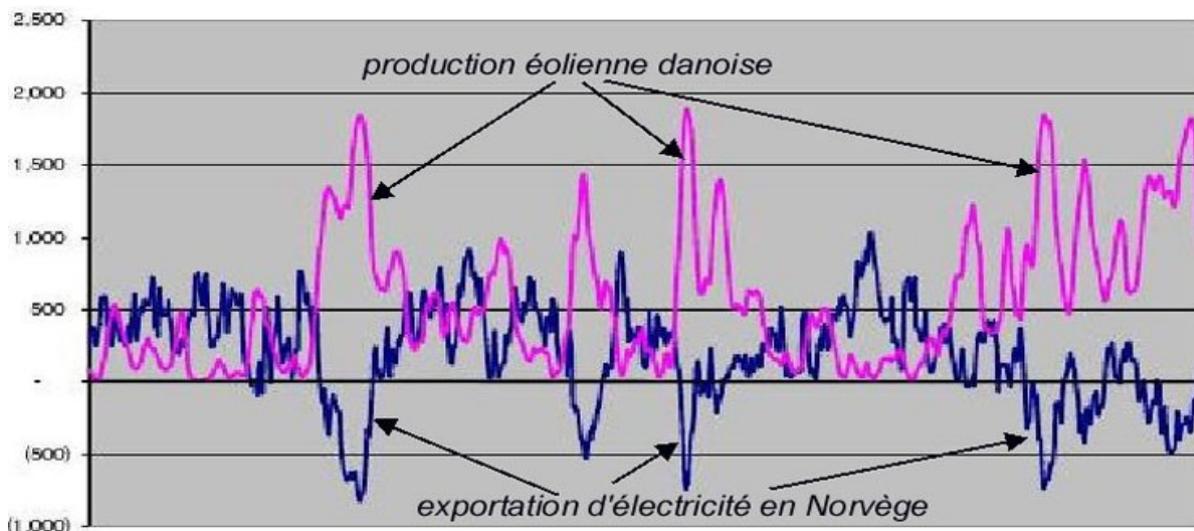


Figure 4 Stockage exporté du Danemark (source F. Livet)

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).

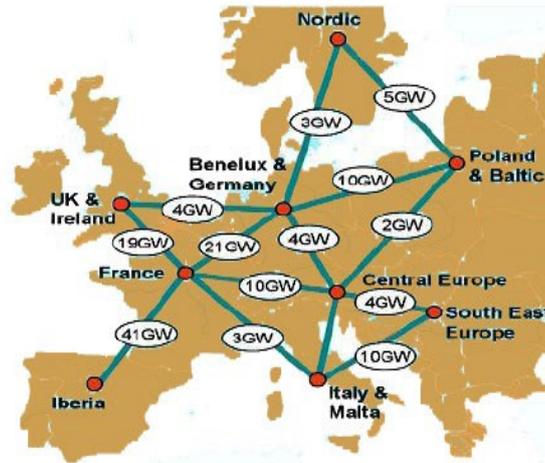
Le projet le plus populaire est *Désertec*, exploitant le solaire de l'Afrique du nord pour alimenter l'Europe. Outre un coût qui, vu d'aujourd'hui, semble irréaliste, que devient le souci d'indépendance énergétique de l'Europe si elle doit dépendre du soleil du sud de la Méditerranée?

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 CSPE⁷ 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.

⁷ 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, mobiles⁸.

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'années⁹.

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.

⁸ 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.

⁹ L'IEA (international energy agency) en suit son évolution dans 113 pays à travers sa revue dédiée "Greenhouse News".

- **Entre ces deux classes extrêmes d'émetteurs** se situent quelques industries moyennement émettrices de CO₂. En attendant que ces espoirs se précisent, les industriels 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 €/tCO₂¹⁰ 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 démontrée¹¹, compte tenu de l'acidification du milieu en présence d'eau pouvant initier des fissurations¹² ; 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.

¹⁰ Ce sont des Euros 2009

¹¹ 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)

¹² 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)

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

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 site¹³ et sur celui du CSLF¹⁴ (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.

¹³ <http://www.ieaghg.org/>

¹⁴ www.csforum.org

PARTIE 3 : RISQUES COMPARES DES DIFFERENTES ENERGIES. LE REJET DE L'ENERGIE NUCLEAIRE, EST-IL JUSTIFIE 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 année¹⁵, 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 !

¹⁵ "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'UNSCEAR¹⁶ régulièrement mises à jour¹⁷, avaient ramené les évaluations fantaisistes initiales à moins de 100 morts¹⁸, et à une possibilité de décès prématurés attribuables à l'accident pouvant atteindre 4000¹⁹ 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'enceinte 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 instable²⁰.

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

¹⁶ United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiations.

¹⁷ Voir *Fukushima : quels risques sanitaires* par Roland Masse dans *Risques* n° 86 de juin 2011

¹⁸ 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.

¹⁹ 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.

²⁰ B. Lerouge « Un « nuage » passe... » - annexe III : « événements ayant conduit à l'accident ».

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; 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 défaillants; 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'accident²¹,

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 connu²², 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.

²¹ 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.

²² 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.

- Réacteurs 2 et 3 fusion partielle du cœur, percement cuve encore incertain, par contre perte d'étanchéité de l'enceinte de confinement du réacteur 2, ce qui peut entraîner quelques rejets diffus de radioactivité.

L'état froid stable est une assurance contre une remise en fusion du corium et de nouvelles émissions de vapeur radioactive.

- Le combustible entreposé dans la piscine du réacteur 4 est intact, la piscine a été renforcée. Dans les parties de la zone d'exclusion de rayon 20 km²³, où la radioactivité est en dessous de 20 mSv/an, le gouvernement japonais entreprend les réparations des dommages causés par le séisme et le tsunami, pour y autoriser le retour de la population.

Fukushima vient d'établir un constat : un événement naturel imprévisible dans son ampleur, hors du répertoire connu des catastrophes naturelles à cet endroit de la planète, a causé environ 20.000 morts et détruit entre autres une centrale nucléaire²⁴, 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.

²³ Ceci concerne aussi des zones plus éloignées (jusqu'à 50 km), contaminées en taches de léopard.

²⁴ 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.

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.**

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 populations²⁵.

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 césium²⁶ 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 radioactives²⁷.

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.**

²⁵ *Faut-il revoir les conditions d'évacuation à la suite d'un accident nucléaire ?* Hervé Nifenecker, site Internet SLC 20 mai 2011.

²⁶ 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.

²⁷ Césium : le Japon avance dans le traitement des sols et des eaux contaminées

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

- *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 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. Un résumé en est donné en annexe 1, ainsi que le minimum que l'on doit savoir sur ses risques.

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.

L'annexe 2 fait un point plus détaillé sur cette question des déchets.

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.

La même annexe 2 traite de ce sujet.

5. Doit-on enfin prendre en considération un argument philosophique globalisant? dont Paul Ariès, chantre de la décroissance, a exprimé la quintessence et sur lequel il appartient à chacun de se faire une opinion: «L'industrie nucléaire concentre tout ce contre quoi les antiproductivistes se dressent. Le mythe d'une croissance folle, la confiscation de la parole, l'irresponsabilité techno-industrielle contre laquelle aucun principe de précaution n'est efficace, l'idée que tout soit possible, la foi aveugle dans la technoscience, le mépris des citoyens, etc. En finir avec le nucléaire c'est ouvrir aussi la porte à une espérance, celle du bien vivre, celle d'une société conviviale, celle du moins mais mieux, celle d'un surcroît de démocratie.»

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€/kWh²⁸ 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-indépendance²⁹ 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'ensoleillement³⁰**, elle échappe aux phénomènes d'intermittence des énergies renouvelables³¹, et constitue de ce fait une excellente énergie électrique de base³², 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.

²⁸ 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.

²⁹ 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).

³⁰ 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.

³¹ 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.

³² 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)

Malgré ces comparaisons, beaucoup d'esprits restent imprégnées d'un tabou concernant le 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 étude³³, dans l'hypothèse gratuite d'un accident survenant en France sur un site d'un 900 MW PWR de la classe Fessenheim avec fusion du cœur, en deux degrés de gravité, l'un (grave) avec relâchement radioactif limité (type Fukushima), l'autre (majeur) avec relâchement important, prolongé et non contrôlé (type Tchernobyl), dans 100 conditions météo différentes.

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

Si on échappe un instant au choc émotionnel provoqué par ces chiffres, on peut noter qu'une probabilité d'accident majeur de 10^{-5} par an et par réacteur génère un coût de 4 millions par réacteur et par an, soit 0,5 €/MWh produit. On peut aussi calculer qu'un accident à 200 G€ tous les 20 ans représente 5 euros du MWh ramené au parc en place, soit moins que la CSPE.³⁴

Mais il est certainement inacceptable de ne pas prendre en compte l'émotionnel, et intéressons-nous plutôt à la variabilité de ces estimations, en notant que tous ces coûts sont très fortement liés aux normes d'évacuation retenues. Dans le rapport Monal, la norme d'évacuation conduisant à évacuer 100.000 personnes est de 20 mSv/an, alors qu'il est bien reconnu des milieux scientifiques qu'aucun effet sur la santé n'a jamais été observé en dessous de 100 mSv/an. Si on retient 40 mSv/an comme norme, lieu de 20 et si l'on conserve la loi très pessimiste d'une relation linéaire sans seuil entre irradiation et effet sanitaire, une décision de ne pas évacuer ces 100 000 personnes conduirait à une probabilité de perte de durée de vie par habitant de moins de 1 an, et à un coût économique 50 à 100 fois plus faible, plutôt de l'ordre de 10 G€ que de 400³⁵.

Les messages relatifs aux coûts possibles des accidents sont donc brouillés par le contraste saisissant entre des évaluations largement dépendantes des choix de mode de gestion des évacuations. Ce qu'on paierait n'est-il pas le prix de la paranoïa nucléaire? Ces 400 milliards, pour leur plus grande part liés à l'évacuation et à "l'image" sont "psychologiques", car dues à une insuffisante information sur le risque réel et au refus de gérer ce risque.

Notons enfin que le coût des dommages que le choix du nucléaire permet d'éviter est largement supérieur aux évaluations de coûts d'accidents hypothétiques. Si on ne refuse pas de comparer des conséquences bien réelles d'un autre choix de mode de production avec des conséquences probabilistes liées à l'hypothèse d'un accident, on peut estimer que si le nucléaire remplace une centrale à lignite, à puissance équivalente, celle-ci aurait produit sur les 30 dernières années environ 500 TWh, à 30 morts par TWh suivant les calculs d'ExternE, cela fait 15 000 morts prématurées (et 150 000 maladies graves). Cette centrale à lignite aurait aussi produit 1 tCO2 par MWh, soit un coût des dommages de 100 €/MWh. Et *quid* des 45 000 personnes qu'il est envisagé d'évacuer dans les 15 ans pour prolonger les mines de lignite à ciel ouvert³⁶.

³³ Conférence de Patrick Monal (IRSN) à l'IHEST : Coût d'un accident nucléaire 21 février 2013

³⁴ Jean-Marc Jancovici Agora SLC 24 février 2013

³⁵ Hervé Nifenecker Agora SLC 10 février 2013

³⁶ Bertrand Barré Agora SLC 24 février 2013

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 par l'élection, certains 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, la question étant alors d'en évaluer et limiter les conséquences.

Le problème est d'éviter que cette crainte confuse ne rende l'approche rationnelle inaudible de façon durable, et de retrouver au plus vite 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 partagé³⁷, 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,
ancien président de la commission énergie (2000-2008)

V3 raccourcie du 8 avril 2013

³⁷ Devise de l'Académie des technologies