

## 5) les accidents dans les réacteurs électro nucléaires

La dangerosité spécifique d'un réacteur est liée à la présence des produits radioactifs qu'il contient et c'est la raison pour laquelle, sur les REP, on les sépare de l'extérieur par 3 barrières.

L'accident de réactivité est dû à une augmentation de la puissance du cœur due à un développement incontrôlé de la réaction en chaîne. Cette augmentation s'arrête toujours spontanément car l'élévation de température ralentit la réaction mais elle peut conduire à un dégagement de chaleur risquant de dégrader le combustible et sa gaine. Les accidents ou incidents nucléaires sont classés par niveaux :

- Accident Majeur Niveau 7 1986 (Tchernobyl URSS) et 2011 (Fukushima JAPON)
- Accident Grave Niveau 6 1957 (explosion à l'usine de retraitement de Kychtym URSS)
- Accident avec risques hors site Niveau 5 1979 (fusion partielle du cœur Three Mile Island USA)
- Accident sans risque hors site Niveau 4 1999 (accident de criticité Tokaimura Japon)
- Incident grave 2005 Niveau 3 (fuite nucléaire Sellafield UK)
- Incident Niveau 2 quelques cas par an en France
- Anomalie Niveau 1 une centaine de cas par an en France
- Ecart Niveau 0 un millier de cas par an en France

Les autorités de Sûreté Nucléaire ont fixé la dose **annuelle** admissible de radioactivité à 10 milli sievert (10 msv) pour la population et à 20 msv pour les travailleurs du nucléaire (la radioactivité naturelle produit une dose annuelle de 2,4 msv en Bretagne). A partir d'une dose reçue de 100 à 200 msv par an les études d'épidémiologie montrent que le risque de cancers est multiplié par 100.

Il faut noter que l'accident le plus grave qui s'est produit en France a eu lieu en 1969 à Saint Laurent sur le réacteur A1 de l'ancienne filière UNGG (uranium naturel graphite gaz) : suite à un défaut de refroidissement, 50 kg d'uranium ont commencé à fondre (accident niveau 4). En 1980 le réacteur A2 a eu un problème de graphite (son modérateur) qui nécessita plus de 3 ans d'arrêt : aucun de ces accidents n'a eu d'impact sanitaire.

Dans l'accident de Three Mile Island les opérateurs font un mauvais diagnostic sur l'état d'une soupape de régulation et réalisent qu'un accident s'est produit ; le défaut de refroidissement du cœur du réacteur a entraîné la fusion du combustible ; les barrières que constitue la cuve du réacteur et l'enclume de béton ont résisté et pratiquement aucune radioactivité ne s'est répandue en dehors du réacteur.

A Tchernobyl l'équipe en charge d'un essai électrique ne respecte pas les procédures de sûreté ; le réacteur est amené dans une situation instable et les moyens d'arrêt sont trop lents suite à des défauts de conception ; la forte puissance nucléaire entraîne une explosion qui soulève la grosse dalle qui recouvre le cœur ; elle provoque un incendie qui propage la radioactivité dans un nuage qui se répand dans toute l'Europe avec des conséquences dramatiques en Ukraine.

Le 11 mars 2011 un séisme d'une ampleur exceptionnelle (magnitude 9) se produit à Fukushima ; les dispositifs de sécurité des 4 tranches du réacteur, situé en bord de mer, ont parfaitement fonctionné et stoppé les 4 tranches alors en fonctionnement ; cependant l'ampleur du **tsunami** qui a suivi ce séisme avait mal été anticipée ; la vague a largement dépassé la digue de protection du réacteur et inondé les 4 tranches et les diesels de secours, provoquant leur arrêt et la coupure de l'alimentation électrique du réacteur ; ceux-ci fournissaient

l'électricité nécessaire au refroidissement du combustible du réacteur et du combustible usagé stocké en piscine; la chaleur due à la radioactivité accumulée dans ces combustibles a entraîné leur fusion partielle, provoqué des incendies et des explosions répandant de la radioactivité dans l'atmosphère (environ 10% de celle émise à Tchernobyl).

Les conséquences de cet accident ont été dramatiques: le 15 mars après 2 explosions successives dans les bâtiments des tranches 2 et 4, les débits de dose dépassent 400 msv/heure au voisinage des réacteurs; le 27 mars, TEPCO, la société exploitant les réacteurs, fait état de plus de 21 travailleurs ayant reçu des doses supérieures à 100 msv. Les conséquences pour la population ont été très lourdes: plus de 110 000 personnes habitant dans un rayon de 20 km ont été confinées dans leur domicile, se sont vu distribuer des pastilles d'iode, pour finalement être évacuées.

## **6) L'après Fukushima**

Dans le monde entier il y a eu une prise de conscience générale des coûts humains et financiers d'un accident nucléaire: plus de 100 000 personnes déplacées pour de longues durées et des opérations de décontamination du site à mener pendant des années pour un coût global estimé par certains en centaines de milliards d'euros.

Au Japon, outre la fermeture définitive des 4 tranches de Fukushima, il faut noter aussi de forts impacts sanitaires sur la nourriture produite dans la région (légumes, lait, riz poissons); dès la mi-mars 2011 les 44 réacteurs nucléaires japonais ont été arrêtés puis, devant la pénurie d'électricité, deux tranches OHI ont été remises en service très peu de temps après l'accident; par ailleurs, compte tenu de l'avenir très incertain du nucléaire au Japon, les constructions de 2 nouveaux réacteurs ont été interrompues; à ce jour TEPCO est obligé d'inonder chaque jour le réacteur de Fukushima pour empêcher une montée de température et de pomper une partie de l'eau puis de la stocker dans des réservoirs tampon pour limiter la contamination de l'océan.

En Allemagne cet accident a précipité la sortie du nucléaire amorcée en 2002 : le 30 mai 2011 le gouvernement a décidé de fermer d'ici 2022 tous les réacteurs nucléaires allemands qui fournissent plus de 30% de l'électricité du pays.

La Belgique a annoncé sa sortie du nucléaire à une date à déterminer; l'Italie suite à une consultation populaire a décidé de ne pas utiliser le nucléaire; l'Espagne s'interroge.

En France, malgré une proportion d'opposants qui était passé de 50 à 66 % dans les sondages, le gouvernement a fermement rejeté en 2012 l'idée de sortir du nucléaire et manifesté sa volonté de garantir l'indépendance énergétique du pays; un réexamen de sûreté a été lancé par le premier ministre et a été confié à l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire, organisme indépendant) pour intégrer le retour d'expérience de l'accident de Fukushima et renforcer la sûreté sur nos réacteurs; dans les conclusions de cet audit il a été recommandé :

- d'installer sur chaque centrale une deuxième source de refroidissement (action menée par EDF actuellement pour un montant de 1 milliard d'euros)
- de supprimer les sous traitances en cascade pour les opérations de maintenance menée par EDF
- de créer une force d'action rapide pour intervenir en cas d'accident nucléaire.

## 6) Les énergies renouvelables: une alternative au nucléaire ?

### L'hydroélectricité

L'hydroélectricité est la principale contributrice des énergies renouvelables (17 % sur un total de 19 %) avec une production mondiale de 3000 TWh en 2010 (valeur AIE : Agence Internationale de l'Energie). La plus grosse centrale hydroélectrique du monde est celle du barrage des 3 Gorges, en Chine, avec 18 000 MW soit l'équivalent d'une douzaine de gros réacteurs du type European Pressurized Reactor (EPR). Des sites sont encore à exploiter en Afrique, en Asie et en Amérique du Sud.

### L'éolien

L'éolien représentait 1,3 % de la production électrique mondiale avec 248 TWh en 2010 (valeur AIE). Aux USA, après l'accident nucléaire de Three Mile Island en 1979, plus aucun réacteur n'a été mis en service ce qui a favorisé le développement de l'éolien qui pèse pour 25% de la production électrique avec celui des centrales thermiques; en Allemagne l'éolien pèse pour 23 %, en France il représente 4 %. Il faut noter, compte tenu de sa croissance et de ses besoins nouveaux en énergie que la capacité éolienne chinoise a été multipliée par 50 ces 5 dernières années avec une contribution de 19% de l'éolien dans la production électrique.

En ce qui concerne la réponse à la question : serait-il possible de remplacer, en France, le nucléaire par de l'éolien ? Un simple calcul d'ingénieur amène des éléments de réponse :

Une tranche de réacteur nucléaire de 1500 MW, disponible 68 % du temps (ce chiffre est très minoré par rapport à celui annoncé par EDF pour prendre en compte toutes les interventions de sûreté qui seront nécessaires suite à Fukushima ainsi que le vieillissement des centrales françaises) fournit 9TWh par an; une éolienne de 2 MW disponible 17 % du temps (1500 heures par an) fournirait 3 GWh par an; il faudrait donc 3000 éoliennes pour remplacer une tranche de réacteur nucléaire. En terme de cout ces 3000 éoliennes (cout unitaire 1.3 millions € sur terre et 2 millions € en mer ) reviendraient à 4 Milliards € ce qui correspond au double du prix d'un REP ou à celui du prix cible d'un EPR de série; au niveau encombrement, avec 5 éoliennes au km<sup>2</sup>, ces 3000 éoliennes couvriraient une surface de 600 km<sup>2</sup>: pour remplacer les 58 tranches nucléaires françaises et produire 370 TWh les 160 000 éoliennes occuperaient 24 000 km<sup>2</sup> soit 4 départements ou 4% de la surface de la France et cela pour un cout d'investissement de 208 Milliards €.

### L'énergie photovoltaïque

Le solaire représentait 0,11% de la production électrique mondiale avec 20,5 TWh en 2010 (valeur AIE). La puissance installée a été multipliée par 6 entre 2005 et 2010; durant cette même période elle a été multipliée par 50 en Chine; le solaire gagne du terrain si on compte les investissements dans les projets de petite taille (rapport 2011 du Programme des Nations Unies pour l'Environnement).

En ce qui concerne la comparaison avec le nucléaire, là encore, les chiffres parlent d'eux même !

Le soleil dépose 1 kW par m<sup>2</sup> et les cellules photovoltaïques actuelles convertissent en électricité 14 % environ de cette puissance soit 140 W par m<sup>2</sup> dans les régions ensoleillées; si l'on prend l'exemple d'une ferme voltaïque récente implantée dans les Landes pour un cout d'installation de 250 millions €, on espère une production annuelle de 84 GWh pour une surface occupée de 300 ha (3 km<sup>2</sup>).

Sur cette base, il faudrait 4400 fermes pour produire 370 TWh ; elles couvriraient 13200 km<sup>2</sup> (2.6 % de la surface de la France) pour un cout de 1000 Milliards € soit 250 EPR à 4 Milliards € l'unité.

Cependant des innovations françaises sont en cours dans ce domaine pour obtenir des rendements supérieurs à ceux d'aujourd'hui: les cellules de demain pourront, à l'horizon proche de 2015, convertir 19 à 20 % des photons émis par le soleil contre 14 % pour le made in China actuel; cette amélioration aura un cout (+50 % par rapport aux cellules asiatiques) mais les constructeurs espèrent compenser un partie de ce surcoût par des économies sur la conception des panneaux et sur les procédés de production; à l'opposé l'Institut de Recherche et de Développement sur l'Energie Photovoltaïque (IRDEP) travaille sur des panneaux flexibles constitué de couches microscopiques de CIGS déposées sur des films plastiques (cout très faible au détriment du rendement).

### **Les centrales thermiques solaires**

De nouvelles techniques parviennent à mieux concentrer les rayons du soleil avec des rendements très importants; plusieurs installations ont montré la voie à commencer par le four d'Odeillo (Pyrénées Orientales) installation pionnière dès 1970; aux USA, la centrale de Kramer Junction fonctionne depuis 1980 sur le principe de concentrateurs –réflecteurs (miroirs cylindriques de 100 à 200 m<sup>2</sup>) concentrant le soleil (Concentrating Solar Power Plant CSPP) sur un tube rempli de fluide caloporteur à base de sel fondu; la chaleur produit de la vapeur d'eau à 400° sous 100 bars ou plus et actionne une turbine. En Espagne deux centrales à tour ont été mises en service ces dernières années (centrale ANDASOL); les rayons captés par plus de 600 miroirs mobiles sont focalisés sur le sommet d'une tour de 125m de hauteur accueillant la chaudière: la centrale Andasol 1 dispose d'une puissance installée de 50 MW et, compte tenu de sa disponibilité de 30 % (3600 h/an), produit 180 GWh par an; l'avantage de la concentration consiste dans les rendements obtenus par des cellules très performantes mais très onéreuses; autre inconvénient majeur, le bon fonctionnement de la centrale nécessite l'utilisation d'une très grosse quantité de sel fondu : 28 000 tonnes et donc impose de classer le site SEVESO; enfin une centrale thermique solaire doit utiliser un combustible fossile pour maintenir la température du fluide caloporteur supérieure à 12° C en absence de soleil.

### **Autres sources d'énergie renouvelables**

La biomasse contribue pour 1,21 % et la géothermie pour 0,33% dans la production électrique mondiale; la mer contribue, quant à elle, à 0,003 %; la géothermie exige de gros investissements mais produit de la chaleur in situ et peut être utilisée pour le chauffage central; en ce qui concerne la mer on peut exploiter l'énergie des marées (usine marémotrice de la Rance), celle des courants marins (captée par des hydroliennes analogues aux éoliennes), celle des vagues... Des marges de progression existent donc.

### **Conclusion**

Malgré les efforts qui sont ou vont être entrepris par les pays riches pour diminuer les consommations en énergies, par exemple par une meilleure isolation des maisons et bâtiments, les besoins mondiaux en énergie ne feront que croître dans les années à venir, spécialement en ce qui concerne l'énergie électrique si les voitures électriques se généralisent pour remplacer les moteurs thermiques.

Dans ce contexte tout ce qui pourra être entrepris pour développer des sources d'énergies renouvelables sera important mais beaucoup d'obstacles sont à surmonter. Le premier est le caractère intermittent de certaines sources d'énergies renouvelables : le soleil ne brille pas la nuit et le vent ne souffle pas en permanence.

**En voulant renoncer au nucléaire les allemands doivent multiplier les centrales thermiques au charbon ou au gaz pour remplacer l'éolien et le solaire pendant 80 % du temps aggravant ainsi la pollution et l'effet de serre.** Actuellement 1200 projets de centrales à charbon sont lancés de par le monde, avec comme conséquence de doubler les émissions de CO<sub>2</sub> actuelles d'un des pays déjà le plus pollueur: la Chine. Par ailleurs quand les parcs éoliens du nord de l'Allemagne tournent il faut consommer l'énergie car le pays ne dispose pas d'un stockage à grande échelle de l'électricité qui permettrait de constituer des réserves utilisables lors des pics de consommation (ce stockage n'est possible que sur les barrages sur lesquels on peut remonter l'eau avec de l'énergie non consommée utilisée pour alimenter les Stations de Transfert Eau ou STEP ); enfin il faut noter que les champs éoliens et solaires étant clairsemés, il faut rajouter au cout de construction des appareils le cout d'installation de nouveaux réseaux électriques. Notons enfin que pour obtenir une production équivalente à celle d'une centrale, l'éolien et le solaire nécessitent de grandes surfaces au sol.

Donc il est nécessaire de développer les énergies renouvelables au bon rythme et en les couplant à de l'énergie nucléaire et non à des centrales thermiques.

En ce qui concerne l'énergie nucléaire, les différents accidents et plus particulièrement ceux de Tchernobyl et de Fukushima nous montrent que cette énergie peut être très dangereuse si elle n'est pas mise en œuvre dans un strict respect des procédures de sureté et de sécurité; par ailleurs les coûts de démantèlement des centrales et celui du conditionnement des déchets doivent être intégrés dans le coût du kWh, ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui .

Pour la France, suivre l'exemple de l'Allemagne serait catastrophique !

La solution à envisager consisterait à prolonger la durée de vie des centrales nucléaire à 50 ans en les remettant à niveau pour répondre aux exigences de l'Autorité de Sureté; en effet l'âge moyen du parc électronucléaire français est de 27 ans alors qu'il est de 47 ans en Grande Bretagne.

Il faudrait ensuite remplacer progressivement ces centrales par des EPR encore plus sûrs que les REP avec une double enceinte susceptible de résister à la chute d'un gros avion, un réservoir d'eau interne au réacteur et 4 zones indépendantes pour les principaux systèmes de sauvegarde qui prolongeraient notre autonomie jusqu'à la fin du siècle.

Par ailleurs il faudrait continuer à explorer la filière des réacteurs à neutrons rapides (génération 4) permettant de réutiliser les combustibles usagés et de diminuer la quantité de déchets nucléaires à forte activité.

Enfin il faut continuer de mener à bien le projet ITER (voir visite de Cadarache, revue AVSANE 81) pour évaluer la faisabilité d'une centrale à fusion nucléaire d'ici 2050, ce qui permettrait de disposer des premières centrales à fusion pour produire de l'énergie au siècle prochain.

## Remerciements

J'adresse mes remerciements chaleureux à Mr R. Isnard directeur en retraite (CEA), à Mr D Soucherou pour les échanges intéressants dans le cadre de l'Université du Temps Disponible Atelier Affaires Internationales de la ville d'Hyères (Var) ainsi qu'à MM. A. de Lepinois et T. Dauta-Gaxotte de la Fondation Méditerranéenne d'Etudes Stratégiques (Toulon).