

Semaine de la Science
Thème : idées reçues et esprit critique

*

Le dessous des cartes de l'industrie nucléaire

De la puissance à la crise en France et dans le Monde

*

Bernard Laponche
Bourg-en-Bresse – 7 octobre 2017

*

Présentation de Bernard LAPONCHE par la Présidente de l'association SDN Bugey

Ingénieur de l'École Polytechnique de Paris, Docteur ès sciences en physique des réacteurs nucléaires, vous avez travaillé à la conception des centrales nucléaires au CEA. Dès les années 1970, dans le cadre de votre engagement syndical, vous découvrez à La Hague les conditions de travail des salariés, vous prenez vraiment conscience des dangers de l'atome. Après ce passage dans le monde de l'énergie nucléaire, vous devenez directeur général de l'ADEME au début des années 1980, puis consultant international dans le domaine de l'énergie et cofondateur des associations Global Chance et Energie Partagée. Vous êtes l'auteur, avec Benjamin Dessus, de « En finir avec le nucléaire, pourquoi et comment »¹.

Intervention de B. Laponche

Bonjour

L'association Global Chance est une association d'experts critiques sur l'énergie, le climat et le nucléaire, domaines dans lesquels la plupart de ses membres travaillent ou ont travaillé² De nombreux articles sont à consulter sur les sujets traités dans la présentation qui va suivre.

Je sais que cette région, que je ne connais pas, a abrité Superphénix, et encore aujourd'hui la centrale du Bugey, sujets auxquels je me suis intéressé.

A propos du thème « Idées reçues et esprit critique » : je n'ai pas de secrets d'alcôve à vous révéler, mais mon objectif est plutôt de placer la situation actuelle de l'électronucléaire en perspective, à la fois en perspective dans le temps, comment on en est arrivé là, et quelle est la situation de la France dans ce domaine, et aussi dans l'espace, c'est-à-dire qu'est-ce qui se passe dans le monde, quelle est la situation du nucléaire dans le monde ? De façon à sortir un peu des situations trop hexagonales, trop influencées par les promoteurs qui sont des gens extrêmement puissants et qui disent souvent des mensonges, soit par omission, soit par volonté.

Donc, et je m'en excuse aussi auprès de ceux de cette assemblée qui connaissent très bien le sujet, je m'adresse plutôt à l'autre partie, en supposant que beaucoup de choses restent encore méconnues ou mal connues. Donc je commencerai par des choses relativement simples et auxquelles on ne pense pas toujours.

En ce qui concerne la situation mondiale de l'industrie électronucléaire, je tiens à remercier Mycle Schneider, Antony Froggatt et leurs collègues pour leur excellent rapport « *World Nuclear Industry Status Report 2017* »³ auquel j'ai fait plusieurs emprunts dans cette présentation.

¹ Editions du Seuil, octobre 2011.

² Global Chance : www.global-chance.org

³ <https://www.worldnuclearreport.org/-2017-.html>

1. La production d'électricité

La question de la production d'électricité, c'est assez amusant, parce que souvent, en France, on a pris l'habitude, dès qu'on parle d'énergie, on pense électricité et on oublie tout le reste.

Alors, il faut se rendre compte que dans tous les produits que nous consommons : les carburants, les moyens de chauffage, etc., tout ça vient de ressources naturelles.. La plupart sont des sources que l'on consomme directement: le pétrole, on voit bien ce que c'est, le charbon, le bois. La production de chaleur existe depuis 700 000 ans quand on a découvert le feu. Alors que l'électricité que l'on connaît dans les éclairs, on n'a jamais réussi à la domestiquer à partir de là, ou alors très peu. Et la production industrielle d'électricité est assez nouvelle

C'est à la fin de XIXème siècle que l'on a commencé à faire des machines. L'électricité est un produit secondaire, c'est-à-dire que l'on commence à faire autre chose, et puis on obtient de l'électricité. Et c'est intéressant de connaître ces différents moyens.

A partir de l'énergie lumineuse : photovoltaïque

C'est le moyen le plus simple, qui est même très récent du point de vue de la découverte scientifique. C'est-à-dire que la source primaire est directement l'énergie lumineuse envoyée par le soleil et, en tapant sur du silicium, ça produit de l'électricité.

C'est assez miraculeux, mais jusqu'à maintenant cela n'a pas été beaucoup utilisé.

A partir de l'énergie mécanique : hydraulique, éolien

Le deuxième moyen, qui date déjà un peu plus, est l'énergie mécanique. Vous avez l'hydraulique, les barrages ou le fil de l'eau : le courant fait tourner des turbines qui entraîne un turboalternateur et cela produit de l'électricité.

A partir de l'énergie thermique : production de chaleur puis de vapeur (énergies fossiles, biomasse, géothermie, **nucléaire**). A partir de la production de chaleur, on produit de la vapeur, puis ça passe dans une turbine et un alternateur et on produit de l'électricité.

Et pour produire cette chaleur on a beaucoup de moyens : le bois ou la biomasse ; on peut faire brûler les énergies fossiles, le gaz, le charbon, le pétrole... la géothermie, puisqu'on trouve de la chaleur dans la terre, on la récupère et, si elle est à assez haute température, on peut faire de l'électricité et... le nucléaire. C'est actuellement, au niveau mondial, la production la plus importante d'électricité.

2. Utiliser l'énergie nucléaire : la fission et la réaction en chaîne

La production d'électricité d'origine nucléaire n'est pas une production directe. On peut imaginer que dans ces centrales il y a une machine extraordinaire qui fait de l'électricité. Pas du tout ! On a trouvé un nouveau moyen de produire de la chaleur. C'est relativement simple, c'est ce qu'on va expliquer maintenant.

Cette énergie nucléaire, de quand date sa découverte, comment elle a été utilisée et quels sont les problèmes qu'elle pose ?

L'énergie nucléaire, pas question d'être pour ou contre, elle existe. C'est l'énergie de liaison des protons et des neutrons qui constituent les noyaux des atomes. Les forces qui permettent de maintenir ensemble les protons et les neutrons sont extrêmement puissantes.

Est-ce que cette énergie peut être prélevée, utilisée ?

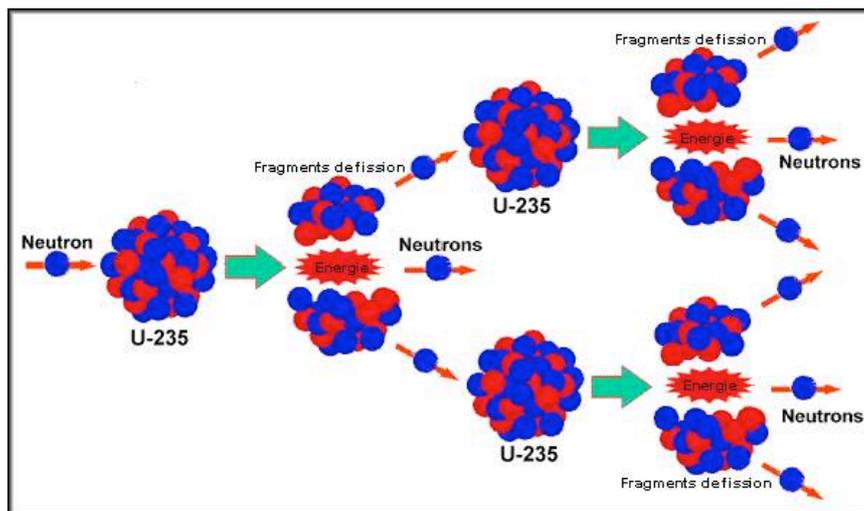
Oui : production de chaleur (pour électricité) ou explosion (bombes)

Un peu avant le milieu du XX^{ème} siècle on a découvert qu'il était possible d'utiliser cette énergie concentrée dans le noyau des atomes du fait de la propriété particulière d'un atome : l'uranium 235 ou U235.

L'uranium existe dans la nature et a été exploité depuis sa découverte à la fin du XVII^{ème} siècle. Au Commissariat à l'énergie atomique, le CEA on conserve un document datant de la Convention, en 1792, qui autorisait l'exploitation d'uranium. Ça ne s'appelait pas uranium à l'époque, on connaissait son minerai, la pechblende et ça a servi très longtemps pour les peintures jaunes, faites à partir de sels d'uranium.

Donc ça existait, mais on ne connaissait pas ses propriétés autres que celles pour la peinture.

Figure 1 : Fission et réaction en chaîne



L'uranium a deux isotopes : l'uranium 235 et l'uranium 238. L'uranium 235 est un peu plus léger que le 238, donc il a 92 protons, la différence en neutrons ($235-92=143$) et l'uranium 238 a un peu plus de neutrons. Donc puisqu'ils ont le même nombre de protons, ils ont le même nom, c'est le même élément chimique, l'uranium, mais les noyaux sont différents.

Dans l'uranium naturel, métal que l'on extrait de la croûte terrestre sous forme de minerai, il y a 0,7 % de U235 et 99,3 % de U238.

On a découvert que si un neutron, par exemple émis par un autre noyau (d'uranium 238), pénètre dans un noyau d'uranium 235, paf ! Il le fait exploser.

Donc vous avez une libération d'énergie, l'énergie nucléaire qui enserrait les noyaux. Ça explose et le noyau est cassé en deux morceaux, avec en plus 2 ou 3 neutrons. Le phénomène va produire de la chaleur, car les morceaux vont partir à des vitesses extraordinaires, taper dans les suivants et il va y avoir agitation des noyaux et cela va aboutir au réchauffement de ce milieu.

Donc à partir de l'explosion il y a augmentation de chaleur et ces 2 ou 3 neutrons. C'est la fission. La **fission**,

c'est lorsqu'un neutron arrive et paf ! ça explose. La **réaction en chaîne**, c'est que les neutrons qui s'échappent de cette explosion vont taper dans d'autres noyaux, s'il y en a suffisamment autour, et cela va multiplier le nombre de fissions et l'augmentation de température.

Alors on imagine deux choses : ou on a suffisamment de noyaux d'uranium 235 et la réaction est tellement rapide que ça fait une explosion que l'on ne peut pas contrôler et de bons esprits ont imaginé qu'on pouvait faire une bombe atomique par ce phénomène-là. C'est-à-dire que si on dispose d'une certaine quantité, quelques kilos, d'uranium contenant une très forte proportion d'atomes d'uranium 235 (on parle alors d'uranium « très enrichi ») pour atteindre ce que l'on appelle la « masse critique », on peut déclencher une formidable explosion.

Dans le deuxième cas, si l'on n'a pas trop de noyaux d'uranium 235 (uranium naturel ou faiblement enrichi) et que l'on peut contrôler la réaction en chaîne, que ça ne se multiplie pas trop vite, on utilisera la chaleur produite dans ce milieu. Cette chaleur va permettre de produire de la vapeur et avec cette vapeur produire de l'électricité.

C'est relativement simple. L'explication de tout ça du point de vue de la physique est compliqué, mais c'est une constatation. C'est comme le feu : tout le monde connaît le feu, mais si on vous demande de l'expliquer, pas grand monde dans la salle, y compris moi, n'est capable de l'expliquer. Mais on le connaît depuis tellement longtemps que c'est devenu banal.

Là c'est pareil, c'est-à-dire que l'on constate que si un neutron tape dans un uranium 235 on peut soit faire une bombe, soit produire de la chaleur.

Pour le moment, on va laisser de côté la bombe, et on va s'occuper de savoir qu'est-ce qu'on fait de cette chaleur.

3. A l'origine du développement de l'électronucléaire

Electronucléaire : production d'électricité en utilisant la fission et la réaction en chaîne.

Découverte scientifique : 1938-1939

La découverte scientifique date de 1938-1939. Joliot-Curie a découvert la radioactivité artificielle, c'est-à-dire des noyaux créés de façon artificielle qui émettaient de la radioactivité et c'est un couple d'allemands, Otto et Lise Meitner qui a découvert la fission. Cela s'est passé à l'aube de la deuxième guerre mondiale. Donc très grande activité scientifique dans tous les pays qui avaient à l'époque une activité scientifique développée, c'est-à-dire la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Italie, les États-Unis, la Suède, le Danemark, l'URSS. ...

Première « pile atomique » (première appellation du réacteur nucléaire) : 1942

Et la première fois qu'on a testé que la réaction en chaîne pouvait fonctionner comme je l'ai décrit, c'est-à-dire pouvait fonctionner et être constatée, cela s'appelait la pile atomique à cette époque, c'est en 1942, à Chicago, par Enrico Fermi, qui était un savant italien qui avait émigré aux USA.

Donc ça y est, on a trouvé le moyen de construire une machine qui va produire cette chaleur. Mais quand vous faites marcher cette fission et cette réaction en chaîne, vous avez un certain nombre de réactions nucléaires à côté. On a surtout du 238 qui apparaît dans l'histoire comme complètement inutile. Il se trouve qu'il est là. Et dans un réacteur nucléaire, l'uranium 238 qui capture un neutron devient du plutonium 239. Et formidable ! Si on peut dire... Le plutonium 239 est lui aussi fissile comme l'uranium 235. Mais la différence avec l'uranium 235 c'est qu'il n'existe pas dans la nature, on ne peut pas creuser pour le trouver, heureusement, mais on le fabrique dans un réacteur nucléaire. Et EUREKA ! Puisqu'il est fissile, on peut faire, aussi, une bombe atomique.

Effort industriel militaire colossal : Projet Manhattan

Et dès 1942, le gouvernement américain entre dans la guerre ; avec le Japon d'un côté et l'Allemagne nazie de l'autre, les USA développent un programme colossal pour arriver à fabriquer des bombes atomiques.

Les trois techniques de base

Et qu'est-ce que cela veut dire comme développement des techniques:

- Des réacteurs qui vont permettre de produire du plutonium dans le réacteur. Ce plutonium va être contenu dans les éléments combustibles où se sont produites les fissions et la réaction en chaîne ; ces combustibles dits « irradiés » vont ensuite être retirés du réacteur.
- Des usines de retraitement des combustibles irradiés issus des réacteurs qui vont extraire le plutonium.
- Des usines d'enrichissement pour produire de l'uranium 235 presque pur (uranium « enrichi » à 95% d'U235) à partir de l'uranium naturel.

Le programme militaire met au point à très grande échelle, avec des moyens colossaux : l'enrichissement de l'uranium, les réacteurs pour produire en particulier le plutonium et les usines de retraitement. Ce sont également les trois techniques de base du nucléaire civil.

Lien entre civil et militaire

Le Projet Manhattan a abouti à lâcher une bombe à uranium enrichi sur Hiroshima et une bombe au plutonium sur Nagasaki, les 6 et 9 août 1945, rasant les deux villes et faisant des centaines de milliers de victimes.

Ensuite, le programme militaire continue aux États-Unis et en particulier avec les moteurs de sous-marins. Comme les sous-marins sont des espaces réduits, il faut qu'on trouve des réacteurs qui ont des volumes plus faibles que les précédents, ceux qui avaient servi à produire du plutonium dans le projet Manhattan.

Donc on invente le réacteur à eau ordinaire, dans lequel on utilise de l'uranium un peu enrichi, pas très enrichi comme celui de la bombe, mais enrichi à 3,5 %.

Donc vous avez un développement impeccable, vous avez des réacteurs producteurs de plutonium, vous avez des réacteurs moteurs de sous-marins, vous avez des usines d'enrichissement, des usines de retraitement, qui vont continuer à fonctionner parce qu'il y a des besoins militaires, mais qui sont surtout à leur sommet dans les années 1940 et 1950.

Qu'en faire ? Mais c'est bien sûr, de l'électricité ! Puisqu'on a trouvé tous les moyens pour faire marcher des réacteurs et que ces réacteurs produisent de la chaleur.

Donc, on va développer un programme civil de production de chaleur et donc de production d'électricité dont les techniques de base sont les mêmes : réacteur, enrichissement et retraitement.

Nucléaire civil (électronucléaire) : « Atom for peace » (1953)

Les grands programmes civils sont lancés en 1953 par un grand discours de Eisenhower, le Président des Etats-Unis de l'époque, aux Nations Unies, « *Atom for peace* » (L'atome pour la paix), une offensive politique, mais aussi industrielle américaine en faveur de la production d'électricité d'origine nucléaire, basée sur la puissance américaine qui utilisait toutes les techniques mises au point pour les utilisations militaires.

Et c'est de là qu'est parti dans les différents pays, le développement des techniques qui ont commencé par les usages militaires, mais qui ont très vite mis en place les usages de production d'électricité avec différents types de réacteurs, ce qu'on appelle les filières nucléaires.

Le développement de la production d'électricité d'origine nucléaire a été fortement soutenu par un certain nombre de gouvernements :

- Aux Etats-Unis, par la loi de 1957, le Price-Anderson Act (*Price-Anderson Nuclear Industries Indemnity Act*) qui a fixé un plafond de responsabilités de l'industrie privée (les compagnies d'électricité) en cas d'accident nucléaire, au delà duquel les indemnisations seraient couvertes par le budget fédéral. Cette décision a été renouvelée en 2005 pour vingt ans. Cette loi fut décisive pour l'électronucléaire aux Etats-Unis. Son principe a été repris dans la plupart des pays (en Allemagne en particulier où les entreprises productrices d'électricité sont en grande majorité privées). Cela a moins joué dans un pays comme la France où EDF était un organisme public.

- Au niveau international par la création en 1957 également de l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (AIEA), exemple unique d'une agence des Nations Unies consacrée à la promotion d'une technique industrielle particulière.

Ce n'est qu'en 1968, après la signature du Traité de Non Prolifération (TNP) que l'AIEA a été également chargée du contrôle de l'application de ce traité. D'où l'extrême ambiguïté de ses interventions du fait du lien évident entre civil et militaire.

L'emprise de l'AIEA dans le domaine nucléaire s'est accentuée par la signature en mai 1959 d'un accord (WHA12-40) entre l'AIEA et l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé, dépendant également des Nations Unies, accord qui implique de fait la soumission de l'OMS à l'AIEA et à sa politique en faveur de l'utilisation civile de l'énergie nucléaire, comme l'a illustré le comportement de l'AIEA sur les conséquences de la catastrophe de Tchernobyl.

- En Europe, le traité Euratom instituant la « Communauté européenne de l'énergie atomique » a été signé à Rome en 1957, en même temps que le traité de Rome instituant la Communauté économique européenne, mais indépendamment de celui-ci. De ce fait, le traité Euratom échappe encore aujourd'hui au contrôle du Parlement européen. Le traité Euratom a facilité en particulier l'implantation dans les pays membres des réacteurs américains à uranium enrichi et eau ordinaire.

4. Les filières de réacteurs nucléaires

Dans les années 1950 et 1960, plusieurs « filières » de réacteurs nucléaires pour la production d'électricité ont été développées.

Curieusement, on pourrait penser que si un neutron arrive avec une grande puissance dans le noyau, ça le fait exploser encore plus. Au contraire, si le neutron est plus lent, ça marche mieux, il y a plus de fissions. Donc les réacteurs, surtout ceux du début qui fonctionnaient à l'uranium naturel, ont trois composants :

- le combustible, c'est-à-dire la matière radioactive, l'uranium naturel ou légèrement enrichi,
- un modérateur, c'est-à-dire un matériau qui ralentit les neutrons,
- et le caloporteur, c'est-à-dire le fluide qui récupère la chaleur.(pour faire de la vapeur et produire de l'électricité).

La filière est définie par le type de réacteur, c'est à dire par la combinaison de ses trois principaux constituants : la nature du combustible, celle du modérateur et celle du fluide caloporteur. C'est ce trio qui distingue les filières entre elles, comme l'illustre le tableau suivant.

Les filières de réacteurs

Filière	Combustible – Modérateur - Caloporteur	Nombre réacteurs	Puissance électrique (1000 MW)
PWR (REP)	UO2 enrichi (3 à 5%)–Eau–Eau sous pression (possible MOX)	282	264
BWR (REB)	UO2 enrichi (3 à 5%)–Eau–Eau bouillante	78	75
PHWR	UO2 naturel ou enrichi–Eau lourde–Eau lourde sous pression	49	25
LWGR (RBMK)	UO2 enrichi–Graphite–Eau bouillante***	15	10
GCR (UNGG)	U naturel, UO2 enrichi–Graphite–CO2 (Hélium)	14	8
FBR (surgénérateur)	UO2 enrichi, PuO2- pas modérateur–Sodium	3**	1,4
Total		441 (403*)	

* 1er juillet 2017 - ** 2 Russie, 1 (20 MW) Chine –

*** 1^{er} réacteur sur réseau (6 MW - juin 1954 Obninsk URSS) et accident Tchernobyl (1986)

Par exemple :

EL : réacteurs à eau lourde, qui ont été développés au Canada en particulier. Le combustible est l'uranium naturel, extrait des mines d'uranium, le modérateur est l'eau lourde et le caloporteur peut être soit de l'eau, soit du gaz carbonique.

UNGG : Uranium Naturel Graphite Gaz, le combustible est l'uranium naturel, le modérateur est le graphite et le caloporteur le gaz carbonique. Bugey 1 est un UNGG.

REP (PWR) : Bugey, 2, 3, 4 et 5, comme tous les 58 réacteurs français sont des REP (réacteurs à eau sous pression, uranium enrichi de 3,5% à 5% sous forme d'oxyde d'uranium, UO2). Ces réacteurs, fabriqués en France sous licence Westinghouse sont issus du modèle des moteurs de sous-marins atomiques, en plus gros, mais ce sont les mêmes : le modérateur, l'eau ordinaire, et comme caloporteur, l'eau aussi. L'eau fait à la fois office de modérateur et de caloporteur.

On remarque dans le tableau la filière **LWGR ou RBMK** qui est celle du réacteur accidenté de Tchernobyl. Cette filière avait une longue expérience de fonctionnement : c'est le réacteur Obnisk en URSS qui a été le premier au monde connecté au réseau électrique, en 1954.

La dernière filière, **FBR** (*Fast breeder reactor* ou RNR, réacteur à neutrons rapides en français), est différente des autres : ce sont les réacteurs à neutrons rapides (Phénix et Superphénix en France), dans lequel le combustible est le plutonium. Il n'y a pas de modérateur, parce que le plutonium peut fonctionner avec des neutrons plus rapides et le fluide qui récupère la chaleur est le sodium. Cette filière a connu de nombreux déboires dans les pays l'ayant développée (Etats-Unis, Royaume-Uni, Allemagne, France, Japon), à l'exception de la Russie. Le plutonium est l'élément le plus dangereux que l'on connaisse et le sodium

liquide s'enflamme à l'air et explose à l'eau. Ce choix était effectivement périlleux...

Nous allons surtout parler des réacteurs REP puisque c'est tous ceux d'EDF actuellement en fonctionnement.

Cette filière est celle de 60% des réacteurs reliés au réseau électrique au monde.

Certains de ces réacteurs, essentiellement en France, peuvent utiliser un combustible au plutonium, le MOX (en anglais « Mixed Oxyde » car le combustible est un mélange d'oxyde d'uranium UO_2 et d'oxyde de plutonium PuO_2).

5. Centrale nucléaire à réacteur REP

La figure suivante montre un réacteur REP classique (les 58 français sont sur ce modèle).

On identifie en bas à gauche le réacteur contenant les combustibles, là où se produisent les fissions et la réaction en chaîne. Ce n'est pas un « combustible » au sens où ça ne brûle pas, mais c'est par comparaison au charbon ou autre combustible que cette dénomination a été conservée. Dans une centrale à charbon, vous produisez la chaleur avec le charbon, et ici c'est avec la fission de l'uranium.

Les combustibles sont dans des crayons d'oxyde d'uranium UO_2 de 4 ou 5 mètres de long avec une gaine en zircaloy. Les crayons sont organisés en assemblages et vous mettez suffisamment d'assemblages pour atteindre la puissance que vous voulez. Les réacteurs français en fonctionnement vont de 900 MW à 1450 MW de puissance électrique de la « tranche nucléaire » (réacteur plus turboalternateur).

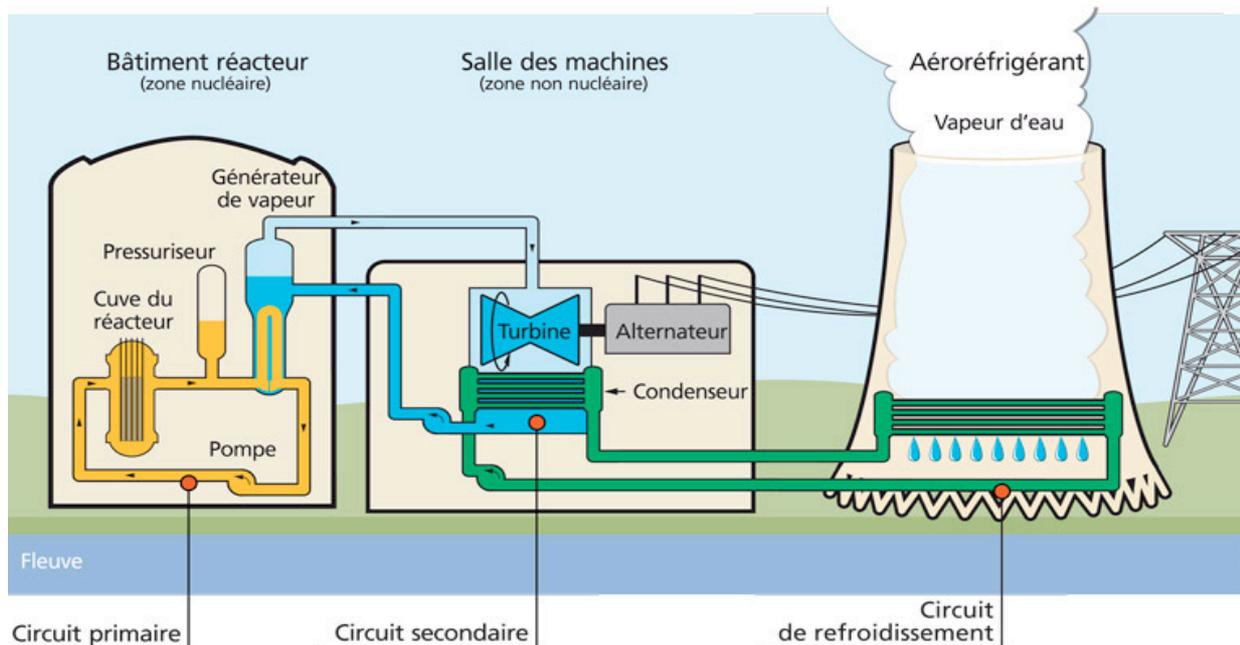
Dans ce « cœur du réacteur » vous produisez de la chaleur. Tout ça est rempli d'eau, c'est l'eau qui ralentit les neutrons et qui en même temps se chauffe. Elle n'est pas chauffée tellement, c'est pour ça que le rendement n'est pas terrible, car la température à laquelle on monte est à peu près de 330° , ce qui n'est pas extraordinaire.

En jaune, c'est le circuit primaire, c'est le circuit qui se chauffe. Il transmet la chaleur dans un générateur de vapeur qui, comme son nom l'indique, produit de la vapeur qui va aller faire tourner la turbine. Il faut une pression de 150 bars à l'intérieur du réacteur pour arriver à une température de 330° , la cuve en acier qui contient le cœur du réacteur a à peu près 20 cm d'épaisseur. Il y a un pressuriseur qui maintient le circuit primaire sous pression et des pompes qui font circuler l'eau.

Et comme vous pouvez avoir des fuites car cette zone est très radioactive, vous avez une enceinte de confinement en béton qui recouvre l'ensemble et protège le réacteur. Voilà la partie réacteur.

Ce pourrait être une chaudière à charbon : d'ailleurs on l'appelait jadis « chaudière nucléaire ».

Figure 2 – Centrale nucléaire à réacteur REP



Le circuit secondaire est celui de la vapeur. La vapeur passe dans la turbine, puis elle est refroidie pour redevenir liquide de façon à boucler le cycle de Carnot.

Donc vous avez un circuit de refroidissement, un condenseur et une pompe pour faire revenir l'eau dans le générateur de vapeur où elle va se transformer en vapeur grâce à la chaleur apportée par le circuit primaire.

Donc vous avez le circuit primaire dans le bâtiment réacteur, le circuit secondaire qui en sort, passe par la turbine et le condenseur pour revenir dans le générateur de vapeur et enfin le circuit de refroidissement pour

refroidir la vapeur dans le condenseur. Quand c'est au bord de la mer, l'eau de la mer suffit. Au bord d'une rivière, en général ça ne suffit pas parce qu'on chaufferait trop l'eau de la rivière, donc il y a des tours de refroidissement qui permettent de refroidir l'eau par évaporation. Puis ça reboucle vers le circuit secondaire.

Installés soit en bord de mer, soit en rive d'un fleuve, les 58 réacteurs français en fonctionnement sont de la filière REP : combustible: uranium enrichi, modérateur : eau, fluide caloporteur : eau. Ils sont situés dans 19 centrales. Il y a de 2 à 6 réacteurs par centrale et des paliers de 900 MW, 1200MW, 1450 MW et l'EPR (1650 MW) en construction à Flamanville.

Comment en est-on arrivé là ?

6. L'électronucléaire en France – Trois phases

1. *Écllosion et développement*

La première période démarre à peu près comme dans les autres pays. En France, de Gaulle crée le Commissariat à l'Énergie Atomique en 1945, avec pour objectif le développement civil et développement militaire du nucléaire.

1945 : de Gaulle – indépendance nationale – création du CEA

De Gaulle parti, la partie scientifique civile domine, parce que Joliot-Curie, qui était le savant le plus important dans cette affaire était contre le développement de la bombe atomique. Ces savants, dont une partie avaient travaillé au Canada, ont travaillé sur l'eau lourde, et le premier réacteur français qui s'appelait Zoé a été un réacteur à eau lourde.

Années 1950 : le militaire prend le pas

Mais dès le début des années 1950, la partie militaire a été développée, elle a été confirmée en 1954 et à peu près tout le monde a été d'accord là-dessus mais dans des conditions plus ou moins secrètes.. Donc le militaire a démarré avec de l'uranium naturel, car la France avait des mines d'uranium, mais n'avait pas d'usine d'enrichissement et ne voulait pas dépendre des américains pour les combustibles. Et si on fait la bombe, il faut les moyens de la faire et donc, la France construit des réacteurs « graphite-gaz », des petits réacteurs « graphite-gaz » à Marcoule : G1, G2, G3 dont l'objectif était la production de plutonium, clairement !

Après ça, on met aussi en place à cette époque le retraitement du combustible, pour la production de plutonium. Le programme militaire s'est déroulé à partir de là, puis il y a eu plus tard les explosions dans le Sahara, puis dans le Pacifique. De Gaulle, revenu au pouvoir confirmera la politique nucléaire militaire. L'atome, dans la République Gaullienne (1958-1969) sera essentiellement militaire. Le nucléaire civil suivra.

Années 1960 : filière UNGG + production de plutonium

A la fin des années 1950 et dans les années 1960, on a fait la même conversion qu'aux États-Unis, on a développé parallèlement au nucléaire militaire le nucléaire civil: c'est la construction de centrales « graphite-gaz », pour EDF et avec EDF, Chinon 1, 2 et 3, St Laurent 1 et 2 sur la Loire et Bugey 1. Donc 9 réacteurs « graphite-gaz » qui continuaient à produire du plutonium. C'est pas très net la façon dont le plutonium des « graphite-gaz » était utilisé à des fins militaires. Mais ça a débouché sur un programme civil des centrales dont je vous ai parlé. C'était la filière dite « graphite-gaz », filière française, filière de Gaulle. D'ailleurs les réacteurs de Fessenheim devaient être construits avec la filière « graphite- gaz ».

2. *Programme massif et surcapacité*

De Gaulle s'en va, il meurt peu après, le gouvernement change, il y a une pression d'un certain nombre de milieux plutôt pro-américains, il y a toute une affaire politico-lutte de pouvoir entre EDF et le CEA, la pression américaine, une partie considérait que l'indépendance vis-à-vis des Etats-Unis, finalement, ce n'était pas si important que ça... Finalement, la solution était de se mettre dans le même camp que les américains qui, avec Westinghouse et General Electric, commençaient à développer un peu partout des centrales à eau ordinaire, dont j'ai parlé tout à l'heure. L'objectif était clairement : les REP dans le monde entier. Donc EDF a dit : « Continuer de faire du « graphite-gaz » nous isole, il faut prendre le train de l'eau ordinaire en marche. »

Années 1970 : Programme Messmer (REP) – Enrichissement de l'uranium – Superphénix -

Donc on a pris le train en marche et on a décidé à ce moment-là de faire Fessenheim1 et 2, Bugey 2 et 3, mais c'était à un rythme, disons... raisonnable, si l'on considérait que le nucléaire était une bonne chose.

Arrive le choc pétrolier. Formidable ! La crise, panique à bord, etc. Alors qu'il fallait absolument diminuer la consommation de pétrole et que ce qui consommait le plus de pétrole, déjà, c'était les transports, on n'a rien fait sur les transports puisqu'on a développé les autoroutes, mais on a mis le paquet sur l'électricité, puisque, du fait d'une erreur précédente d'EDF, l'électricité était passée au pétrole (fuel lourd). Il n'y avait

pratiquement plus de charbon, c'était hydraulique et pétrole.

Donc les prix ont augmenté, donc un programme massif qui devait faire de la France le premier pays nucléaire au monde, c'était le programme Messmer en 1974 de construction de six réacteurs par an. Absolument colossal ! Et la construction d'une usine d'enrichissement, puisqu'on avait modifié le combustible, c'était plus l'uranium naturel, c'était l'uranium enrichi. Et nous voilà partis !

Ce programme a été réussi, il faut le reconnaître, d'un point de vue industriel, mais a drainé l'investissement français. Le programme annoncé était d'ailleurs de six réacteurs par an pour la France, mais ensuite quatre pour la France et deux qu'on vendrait à l'étranger, puis deux pour la France et quatre qu'on vendrait à l'étranger, l'argument étant que l'industrie française allait devenir tellement puissante qu'on allait baser nos exportations en grande partie sur l'exportation de réacteurs, pas d'électricité !

Années 1980 : Démarrage de 41 réacteurs - baisse des commandes - 58 réacteurs dans 19 centrales en 2000. Tout ce programme a été basé sur des prévisions outrageusement gonflées de consommation d'électricité, mises sur la table par EDF essentiellement. On était un certain nombre à dire que c'était complètement débile, mais on était très minoritaires. On consommait 175 milliards de kWh à l'époque, et on devait en consommer 1000 en 2000. En découlait le programme nucléaire qu'il fallait faire par an. On a consommé 400 TWh environ en 2000. Donc on devait aller de 175 à 1000 et on est allé de 175 à 400. A un moment donné on s'est rendu compte que ça faisait trop de réacteurs.

On a quand même continué. Dans les années 1980 on a un peu ralenti, mais on a construit finalement, entre le début des années 1970 et le milieu des années 1990, 58 réacteurs.

Et on a évidemment constaté qu'on en avait trop et on a exporté l'électricité de cette surproduction. L'exportation d'électricité dont EDF se vante aujourd'hui, c'est parce qu'on en avait trop. Jamais on n'a décidé de construire des réacteurs pour exporter de l'électricité.

Pourquoi ? D'une part parce que ça ne rapporte pas grand chose, d'autre part, parce qu'on garde chez nous les déchets et le risque d'accident. Un jour on a interrogé un ministre belge qui était anti-nucléaire en lui disant « quand même, c'est scandaleux, vous êtes anti-nucléaire et vous importez de l'électricité nucléaire de France ». Il était ministre de l'énergie. Il a dit : « Ecoutez! Si les Français sont assez bêtes pour vendre de l'électricité qu'ils fabriquent chez eux avec tous les risques qu'ils prennent et les déchets qu'ils gardent, nous, on achète, voilà ! » .

On arrive dans les années 2000, les quatre dernières tranches ont été faites sous licence française, mais toutes les autres ont été construites sous licence Westinghouse avec des modifications à la marge, essentiellement des augmentations de puissance. Les 34 premières sont exactement les mêmes que les centrales américaines dont celle de Three Mile Island (un réacteur détruit totalement avec fusion du cœur en 1979).

3. Le temps des troubles

On arrive à la fin de cette deuxième phase qui est celle de la puissance. On commence à avoir des problèmes de surcapacité, mais on ne s'en rend pas tellement compte.

Dans les années 1990, ça commence à être un peu vaseux, parce qu'il n'y a plus de commandes, parce qu'il y a déjà trop de centrales et il n'y a pas de commandes de l'étranger : 9 réacteurs vendus en 40 ans (3 en Belgique, 2 en Afrique du Sud, 2 en Corée du Sud et 2 en Chine) : la grande stratégie n'a pas marché.

Superphénix avait été lancé en 1976 malgré de très fortes oppositions qui ont été balayées... Superphénix est arrêté définitivement en 1998, donc toute l'affaire retraitement, plutonium, c'est dans l'eau !

Mais il faut maintenir la gloire nucléaire française et on commande le réacteur EPR en 2006.

Le réacteur EPR est lui aussi un réacteur de la filière REP mais plus gros que les autres, 1600 MW au lieu de 1450. E comme Europe car c'était *European Pressurised Reactor*, puisque c'était fait par Areva et Siemens, donc c'était un réacteur franco-allemand, donc européen, puisque vous savez que le couple franco-allemand est le père et la mère de l'Europe.

Donc on lance ce réacteur qui était la combinaison des « meilleurs » français et des « meilleurs » allemands. Donc c'était très complexe : on prend des réacteurs qui sont tous des réacteurs sous pression, mais avec des tas de machins différents des précédents. Alors qu'il n'existait que sur le papier, Areva vend un EPR en Finlande en 2005, la France le décide pour elle-même en 2006, à Flamanville, et en vend deux en Chine.

Alors, pourquoi la commande de l'EPR ? Pas parce qu'on en avait besoin pour l'électricité, parce qu'on avait déjà des surplus, mais parce qu'il fallait maintenir l'industrie nucléaire française. Et c'est là qu'on commence

à se rendre compte combien la puissance de l'État est déterminante, parce que il n'y avait nul besoin de construire de réacteurs en France, mais il fallait maintenir la compétence. C'est comme si pour sauver Usinor, on avait décidé de mettre une tour Eiffel dans chacune des 36 000 communes françaises.

La construction de l'EPR, ça ne marche pas bien. D'abord, du côté des Allemands, comme ils ont décidé en 1998 et confirmé en 2000 de sortir du nucléaire, Siemens, dit : « dans cette affaire, je ne suis plus dans le coup ». Donc ça reste EPR, tout le monde l'appelle encore *European Pressurised Reactor*, mais ça devient E pour « *Evolutionary* », toujours en anglais alors que la France reste seule à le construire.

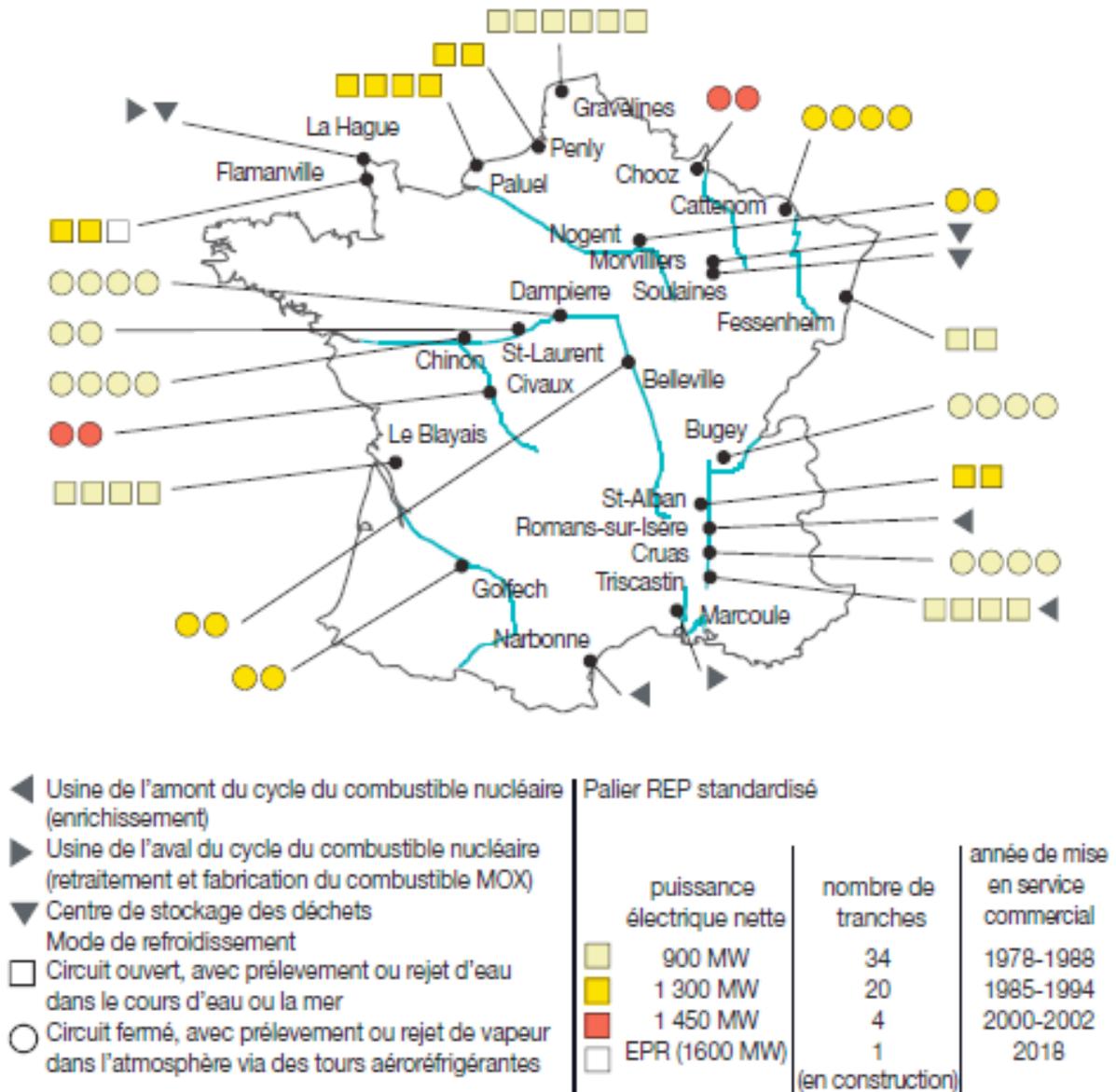
En parallèle, on construit le réacteur en Finlande : il devait démarrer beaucoup plus vite que les autres, on devait le construire en 4 ans, donc il devait démarrer en 2009. Il n'a toujours pas démarré en 2017! Les bons esprits pensent qu'il démarrera l'an prochain. Bon, enfin, moi je n'en sais rien ! L'EPR français décidé en 2006, construit en 2007, devait démarrer en 2012 : il n'a toujours pas démarré ! Donc, vous voyez, la question devient délicate.

En plus Superphénix est arrêté, c'est quand même une grande tristesse, et on commence à s'occuper des déchets radioactifs. Jusque-là on n'en avait pas beaucoup parlé (on trouverait une solution...). Où on va les mettre ? On va entrer dans le processus de CIGEO sur lequel je reviendrai.

A partir des années 2010, montée de la crise du système électronucléaire français que je vais vous présenter par la suite. Je vous ai parlé beaucoup des réacteurs et c'est vrai qu'on parle surtout des réacteurs parce que c'est la partie la plus visible de l'iceberg : on a 19 centrales, 58 réacteurs. Les CLI (Commission locale d'information), qui existent auprès de chaque centrale nucléaire, avec des gens qui sont proches des centrales, certains sont contents parce qu'il y a beaucoup d'argent distribué, d'autres sont mécontents parce que c'est dangereux.

7. Centrales et usines nucléaires en France

Figure 3 – Centrales et usines nucléaires en France



8. Le «combustible» nucléaire : de la mine aux déchets

Toutes les industries du combustible nucléaire sont importantes pour obtenir cette production d'électricité d'origine nucléaire. Un réacteur nucléaire, c'est du béton, de la sidérurgie et de la métallurgie, de la mécanique, de l'électronique... Mais le cœur du réacteur ce sont les éléments combustibles à l'uranium : l'élément indispensable qui produit de l'énergie, c'est l'uranium.

Extraction et conversion de l'uranium

On trouve dans le sous-sol du minerai d'uranium d'une teneur de quelques pour cent.

Dans les années 1950 et 1960, l'uranium utilisé en France était extrait en territoire métropolitain. Il existe 250 mines d'uranium répertoriées en France, qui posent d'ailleurs des problèmes de résidus, de traces de contaminations radioactives éventuelles dans l'environnement. vous pouvez en parler à la CRIIRAD, c'est leur cauchemar.

Maintenant l'uranium utilisé en France est totalement importé. C'est important pour cette « indépendance énergétique » dont on nous dit qu'elle est assurée par le nucléaire.

Au niveau mondial, les principaux pays producteurs sont le Kazakhstan (41%), le Canada (16%), l'Australie (9%), le Niger (7%)... Qui va s'inquiéter des conditions de travail au Kazakhstan ?

Ensuite vous avez la conversion qui est faite dans des usines du sud de la France (Malvesi , Pierrelatte) on reçoit un concentré du minerai on le transforme pour enfin obtenir un gaz l'hexafluorure d'uranium qui va dans l'usine d'enrichissement, à Pierrelatte.

Enrichissement de l'uranium en uranium 235

Un mot sur l'enrichissement. Alors vous avez ce gaz, hexafluorure d'uranium, avec des atomes 238 et 235 que vous ne pouvez pas séparer chimiquement parce que c'est le même élément, donc il faut une séparation physique.

Il y a deux méthodes : la méthode qui a été appliquée en France et aussi aux États-Unis, c'est la diffusion gazeuse. Vous faites des parois poreuses dans lesquelles il y a des tout petits, petits, petits trous. Vous envoyez le gaz d'uranium sous pression. Les atomes d'uranium 235 sont un peu plus petits, un peu plus légers que les atomes d'uranium 238. Donc à travers ces tout petits trous, il passe un peu plus d'uranium 235 que d'uranium 238. Après la première paroi, l'uranium est un peu enrichi, un tout petit peu. Et ensuite il passe à travers des parois, des parois, des parois et à chaque fois on comprime le gaz, on le pousse etc. On a ainsi une « cascade » de parois : le gaz d'uranium est introduit au centre de la cascade, le flux de gaz enrichi en uranium 235 est attiré vers une extrémité et le flux appauvri vers l'autre.

L'usine d'enrichissement de Pierrelatte consommait la production des quatre réacteurs de Tricastin qui avaient été construits à côté pour faire fonctionner cette usine. Au bout d'un certain nombre d'années, on s'aperçoit que ça consomme beaucoup d'électricité, que c'est très cher, et on achète la licence au Pays-Bas de l'autre méthode de fabrication : la centrifugation.

Les centrifugeuses, c'est l'appareil pour essorer pour la salade. Les parties les plus lourdes vont vers l'extérieur et au centre restent les parties les plus légères ; c'est la même technique, première centrifugeuse, on a un peu d'uranium 238 qui va à l'extérieur et un peu plus de 235 qui reste au centre, alors on passe à la deuxième centrifugeuse, puis la troisième, etc. Quand on a des milliers de centrifugeuses, on enrichit peu à peu l'uranium.

L'enrichissement nécessaire pour les réacteurs c'est 3,5 à 5%, donc il faut, disons 10000 centrifugeuses. Si je veux de l'uranium pour les réacteurs de recherche il faut 20%, donc il faut, disons, 30 000 centrifugeuses. Si on veut aller au-delà, il faut plus de centrifugeuses. Pour 95%, pour faire la bombe, il en faut 100 000.

D'où les accords avec l'Iran, qui a les centrifugeuses, on exige qu'il ne dépasse pas tant de centrifugeuses. Alors il y a une bagarre : si vous dites « je veux faire du nucléaire civil, de l'électricité », alors il faut arrêter à 5%, mais si vous dites « oui, mais je veux faire de la recherche » ! C'est dur d'empêcher un pays de faire de la recherche ! Donc on va à 20%. Je crois que l'accord porte sur 20%. Voyez comme c'est tordu, et vous avez toujours, ce lien civil et militaire. D'ailleurs les nouveaux pays qui veulent faire du nucléaire maintenant, ce n'est pas pour des raisons économiques, c'est parce qu'il veulent avoir les techniques, c'est-à-dire qu'ils veulent avoir le retraitement, l'enrichissement, pour des fins civiles, bien entendu, mais qui leur permettent, s'ils le veulent, de faire le militaire.

L'enrichissement de l'uranium produit donc de l'uranium enrichi mais aussi de l'uranium appauvri qui est

stocké comme déchet radioactif.

Fabrication du combustible

Les réacteurs REP utilisent des combustibles d'oxyde d'uranium légèrement enrichi, UO₂. On fabrique des pastilles d'uranium cylindrique d'un cm environ de diamètre qui sont contenues dans des « crayons » (gainés de zircaloy). Ces crayons sont groupés en assemblages. Le cœur d'un réacteur REP de 900 MW de puissance électrique contient 157 assemblages correspondant à 72,5 tonnes d'uranium réparties en 41 500 crayons. La fabrication du combustible c'est les usines de Romans et Pierrelatte au bord du Rhône.

Le combustible dans le réacteur

Ces combustibles vont dans le réacteur. Dans le réacteur, le combustible subit les fissions entretenues par la réaction en chaîne. Les fissions produisent ce qu'on appelle les fragments de fission ou produits de fission qui ne sont pas dans leur situation la plus stable. Ils sont radioactifs et émettent tous les rayons radioactifs que vous pouvez imaginer, alpha, bêta, gamma et vous avez à peu près tous les éléments qui sont dans la nature. Vous trouvez ceux qui sont connus parce qu'ils sont très radioactifs, le strontium, le césium, l'iode, le tritium, etc, mais vous avez toutes sortes d'éléments instables, tout ça est radioactif quand vous sortez le combustible irradié, parce qu'on change de combustible, par tiers du chargement chaque année.

Combustibles irradiés

Les combustibles irradiés sortis du réacteur sont très chauds et très radioactifs., Ainsi, au lieu d'avoir des cendres inertes, vous avez des produits extrêmement radioactifs que vous mettez dans les piscines qui sont au bord des réacteurs pour plusieurs mois ou plusieurs années.

Retraitement des combustibles irradiés et production de plutonium

Dans la plupart des pays, il n'y a pas de retraitement, ils arrêtent l'histoire au combustible irradié et ils le stockent dans les piscines. On verra ce qu'ils en font par la suite.. En France, du fait qu'on voulait d'abord du plutonium pour la bombe et ensuite comme combustible des surgénérateurs, on a les usines de « retraitement ». A Marcoule c'était UP 1, à La Hague, c'est UP2 et UP3. UP, c'est Usine Plutonium. Quand on vous dit qu'on fait La Hague pour les déchets, c'est faux, La Hague est faite pour produire du plutonium.

Déchets radioactifs, uranium appauvri, plutonium

Donc on produit le plutonium à La Hague et en produisant ce plutonium on produit plein de déchets. D'une part de l'uranium de retraitement (plus faible en uranium 235 que le combustible initial mais plus fort en proportion que l'uranium naturel). D'autre part les produits de fission et les produits plus lourds que le plutonium (actinides mineurs) qui sont stockés sous forme de verre à La Hague. Mais aussi toutes les choses de moyenne et basse activité, les gants, les chaussettes, les outils, tout le matériel qu'on remplace, etc. : tout ça est radioactif et devient des déchets. Donc à chaque étape, vous avez des déchets..

Une partie du plutonium reste sur place et une autre partie, puisque le plutonium est lui-même fissile, est utilisé comme combustible (le MOX) dans les réacteurs à eau ordinaire. A son tour, le MOX irradié n'est pas retraité et est stocké en piscine (près des réacteurs puis à La Hague). De son côté, une partie du plutonium produit s'empile sur les étagères.

Hors combustible : démantèlement des centrales et des usines nucléaires

Les options : démantèlement ou non

Démantèlement : Démolir et nettoyer afin de libérer le site pour d'autres usages.

- Démantèlement immédiat (« *Decon* » aux Etats-Unis) : début dès l'arrêt définitif, plusieurs étapes, durée 20 à 30 ans, « retour à l'herbe » : site propre à un autre usage.
- Démantèlement différé ou Fermeture sécurisée (« *Safstor* ») : extraction du combustible et du fluide caloporteur, installation protégée, démolition complète après 40 à 60 ans pour profiter de la décroissance de la radioactivité des éléments restants.

Non démantèlement (« *Entombment* ») : extraction combustible et fluide caloporteur, autres équipements radioactifs maintenus sur site, enfermement de l'installation dans une structure de protection pendant une période suffisante (?) pour une décroissance de la radioactivité permettant d'affirmer que le lieu est « sans

danger ».

En France, l'option choisie est le démantèlement immédiat : expérience catastrophique avec Brennilis, démantèlement difficile (à cause du sodium liquide comme fluide caloporteur) en cours de Superphénix, opération pilote sur REP de petite puissance à Chooz A, démantèlement différé demandé par EDF pour les six réacteurs à modérateur graphite (UNGG).

Deux questions fondamentales : a) Que fait-on de la quantité considérable des déchets du démantèlement et, b) Les coûts seront certainement très importants : 1 à 1,5 milliard d'euros par réacteur d'après l'expérience récente en Allemagne et aux Etats-Unis.

Chaque étape produit des rejets et des déchets radioactifs

Chacune de ces étapes produit des déchets qui vont de la faible activité, c'est-à-dire peu radioactifs, mais quand même si le milieu où vous vivez a des mines d'uranium, il faut faire attention, jusqu'à des déchets extrêmement dangereux, non seulement par une très grande quantité d'éléments radioactifs, mais également par la longueur de leur vie. Ce qu'on appelle la période ou la demi-vie, c'est le temps au bout duquel, comme il se transforme du fait de sa radioactivité, sa quantité a été divisée par deux.

Alors vous avez toutes les valeurs possibles : l'uranium 235, c'est 700 000 ans, l'uranium 238, c'est pour ça qu'il y en a encore beaucoup, c'est 4 milliards d'années, le plutonium 239, c'est 29 000 ans, le césium 137, c'est 30 ans, l'iode c'est quelques jours, un autre c'est 3 secondes. Vous avez tous les éléments, avec à chaque fois, une période différente et un type de radioactivité différent. Les rayons alpha, c'est très lourd, donc ils ne vont pas loin, donc si vous avez du plutonium à portée de main, ce n'est pas dangereux, mais c'est dangereux si vous en inhalez un microgramme car il se fixe sur un organe et vous aurez un cancer. Donc vous avez toute cette variété d'éléments, de type de radioactivité et de type de risques selon que c'est irradié, contaminé, etc, On a produit de la chaleur et de l'électricité d'un côté, et on produit des déchets radioactifs de l'autre.

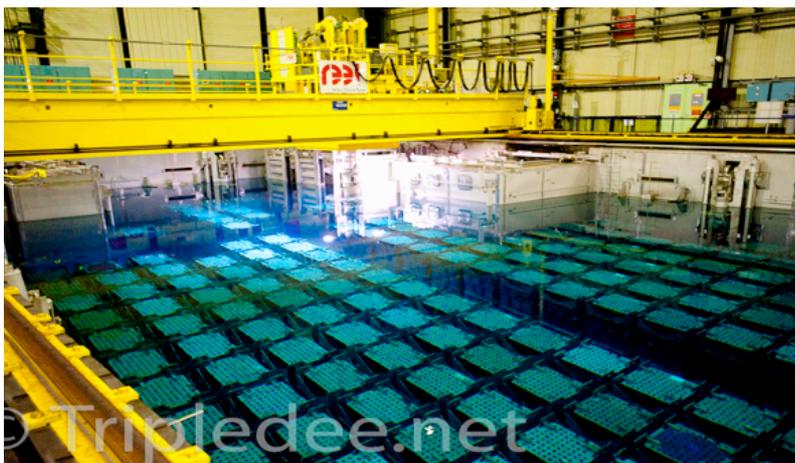
Grosso-modo, dans le monde, c'est les réacteurs à eau, soit sous pression, soit bouillante qui dominent, mais pas le retraitement. Le retraitement c'est Royaume-Uni et France pour des raisons historiques.

Demi-vie de quelques isotopes dans les combustibles irradiés

Elément	Iode	Césium	Krypton	Tritium	Strontium	Césium	Carbone	Pu*	Iode	Pu*	U**	U***
Isotope	I131	Cs134	Kr85	H3	Sr90	Cs137	C14	Pu239	I129	Pu144	U235	U238
Demi-vie	8 j	2,1 ans	11 ans	12 ans	29 ans	30 ans	5730 a	24 ka	16Ma	81Ma	704Ma	4,5Mda

* Pu : Plutonium ** et *** U : Uranium – a : année, ka : 1000 années, Ma : million d'années, Mda : milliard d'années.

Figure 4 - Les piscines de La Hague d'entreposage des combustibles irradiés



9. L'exception française

L'exception française est réelle, à plusieurs titres, et elle est d'ailleurs difficile à comprendre sans bien connaître l'histoire que je vous ai racontée.

Premier pour la part du nucléaire dans la production d'électricité

La part du nucléaire dans la production d'électricité est de 75%. Dans les autres pays nucléaires que j'ai cités c'est au maximum 30% : États-Unis 19%, Russie 15%, au Japon c'était 30% avant Fukushima, en Allemagne, avant la décision de sortir du nucléaire c'était 30%. Dans tous les pays qui l'ont développé pour des raisons historiques, c'est resté beaucoup plus faible. En France, on a dépassé de loin ce qui était raisonnable par rapport à la consommation française.

Second en nombre de réacteurs :

En 2017 : 58 contre 99 aux États-Unis.

Premier de loin en nombre de réacteurs par habitant :

Evidemment, puisque c'est 58 réacteurs pour 65 millions d'habitants en France, 99 pour 326 millions aux États-Unis.

Retraitement et production du plutonium (avec Royaume-Uni)

Originalité : le retraitement et la production de plutonium sont pratiqués par le Royaume-Uni et la France, alors que les États-Unis, la Corée, l'Allemagne, la Suède, enfin tous les autres, les occidentaux, les mettent dans les piscines.

Cette exception française est essentiellement liée à l'idée fallacieuse que l'on va un jour relancer la filière des réacteurs « surgénérateurs » au plutonium.

Contribution du nucléaire à la consommation énergétique finale : 17% (Monde : 2,5%)

Si vous regardez la consommation énergétique finale, c'est-à-dire ce que vous consommez, les uns et les autres comme produits énergétiques, l'industrie, le transport, le tertiaire et les ménages, la consommation d'électricité là-dedans, c'est 18% au niveau mondial et 25% en France, c'est-à-dire qu'un quart de notre consommation finale. En tête et de loin de cette consommation énergétique finale, ce sont les produits pétroliers (38% et 41%).

Et bien qu'on soit au top de notre énergie nucléaire, comme on a 75% de la production, mais pas 75% de la consommation, puisqu'on en exporte, la contribution du nucléaire à la consommation énergétique finale, c'est 17%, dans le pays le plus nucléarisé du monde. Au niveau mondial, c'est 2,5%.

Le nucléaire est un problème majeur au niveau mondial, non pas à cause de son importance énergétique mais à cause du problème des déchets nucléaires et du risque d'accident majeur mis en évidence par Tchernobyl et Fukushima. Si demain on arrêta le nucléaire partout (ça suffit !), par exemple à la suite d'une nouvelle catastrophe nucléaire, il y a un seul pays qui en souffrirait vraiment, c'est la France. Regardez le Japon, Fukushima s'est produit, plus de nucléaire ! Cela pose des problèmes pour les gens, mais l'économie n'a pas été mise à genoux, loin de là ! C'est en ce sens que la France a une position tout à fait particulière, et l'ennui, c'est qu'elle s'obstine dans cette position. On pourra y revenir.

Tableau - Contribution du nucléaire dans la production d'électricité en 2010

	Etats-Unis	France	Japon	Russie	Royaume -Uni	Corée du Sud	Allemagne
TWh	839	428	298	179	162	147	141
Part	19%	75%	28%	16%	16%	30%	22%

10. La raison d'État

Stratégie constante : nucléaire civil et militaire, « indépendance de la France ».

Ce qui explique le mieux l'exception française, c'est d'abord depuis le début, ce couple militaire-civil qui fait que le nucléaire est devenu quelque chose de sacré, c'est l'indépendance de la France. Vous essayez de parler de la bombe, malgré le prix Nobel de la Paix, la bombe c'est fondamental, on est une grande nation, Les deux choses ont été mélangées, le nucléaire militaire et civil, c'est vraiment le mythe la grandeur de la France.

Pratique du secret; exclusion de fait du débat démocratique

Nucléaire et CEA, cette alliance fait que la pratique du secret, qui est normale au niveau militaire, s'est étendue au civil. Les activités nucléaires sont très compartimentées. La sûreté et les déchets, on n'en parlait pas ! J'y ai travaillé et je peux vous dire que je ne connaissais rien à la question de la sûreté et des déchets : je travaillais sur la physique des réacteurs.

Pouvoir d'un État excessivement centralisé et des grands organismes publics (CEA, EDF, Cogema puis Areva depuis 2004)

La France est un pays très centralisé avec un pouvoir d'État très puissant, et comme par hasard, EDF, le CEA, AREVA dépendent de l'État, donc vous avez un bloc puissant et influent dans les hautes sphères. La haute administration est aussi pro-nucléaire, corps des Mines, ENA, tout ça... Le nucléaire n'est pas un lobby, il est dans l'État. Les conseillers du Président ou du Premier ministre sont tous pro-nucléaires, etc.

Moyens colossaux de propagande

Des moyens de propagande colossaux, la publicité dans les journaux, les interventions dans les écoles, les voyages des journalistes, les villages autour arrosés d'argent, enfin vous le savez très bien puisque vous avez Bugey ! Ce qui fait que vous avez une espèce d'asphyxie. Et puis il y a une habitude, puisque enfin les centrales sont là, des accidents il y aurait pu y en avoir, mais enfin, il n'y en a pas eu, le Blayais certes mais finalement ce n'était pas grave... La radioactivité et ses victimes : on exagère beaucoup... Cette propagande est très présente partout. Dans beaucoup de conseils municipaux vous avez un actif ou un retraité d'EDF, si vous lui posez la question, il vous explique que les énergies renouvelables c'est de la blague. Ce qui est sérieux, c'est le nucléaire.

L'opposition au nucléaire est considérée comme une atteinte à la grandeur de la France.

11. Pollutions, déchets et risques d'accident de l'industrie électronucléaire

Pour les risques, en fonctionnement normal, si vous considérez que tout marche bien, vous produisez tous les jours des rejets radioactifs.

En fonctionnement normal : rejets et déchets

Même si tout marche à la perfection, toutes les étapes des activités nucléaires produisent en permanence des rejets et des déchets radioactifs.

Les centrales, mais surtout La Hague, rejettent dans l'atmosphère et dans les courants des produits radioactifs. La Hague a été mise là parce qu'il y a un très fort courant, ils envoient les rejets dans le Nord de l'Atlantique. Donc vous avez cette production permanente de déchets, qui tous les jours s'accumulent à La Hague, dans les centres de stockage permanent des déchets de faible activité, des déchets du démantèlement qui s'accumuleront peut-être un jour à ICEDA sur le site du Bugey, etc. C'est ce fonctionnement normal qui produit tous ces déchets extrêmement dangereux, dont on ne sait que faire. Ce qui a touché un peu les dirigeants français, mais pas tellement, c'est l'Allemagne, qui a dit : nous décidons de sortir du nucléaire pour trois raisons : l'accident, les déchets, la prolifération. C'est vrai partout.

En France, les déchets c'est un des arguments pour en finir avec le nucléaire : « on produit de l'électricité, c'est bien, mais on produit en même temps des déchets qui sont hyper-dangereux .

Accidents nucléaires

Cause majeure d'accident grave ou majeur d'un réacteur REP est la perte du refroidissement.

Qu'est-ce qui peut se passer ? Vous avez là le réacteur avec cette température très forte, qui nécessite qu'on fasse circuler de l'eau pour évacuer la chaleur. S'il se trouve qu'il y a un truc bizarre qui se passe quelque part ou qu'on a peur de je ne sais pas quoi, on doit arrêter le réacteur. On baisse les barres de contrôle, la réaction en chaîne et les fissions s'arrêtent, mais il faut continuer à refroidir, car du fait de la radioactivité contenue dans les combustibles, ça continue à chauffer.

Donc il faut que le circuit de refroidissement fonctionne. Ce circuit est alimenté par des pompes, ces pompes ont des moteurs électriques, alimentés par l'électricité qui vient du réseau électrique. Si vous avez une tempête le réseau saute. Mais, c'est prévu, on a mis des diesels ! Mais la tempête s'accroît et on a une inondation, ça noie les diesels ! Je ne peux plus refroidir !

La température en temps normal, c'est 2000° à l'intérieur du combustible. Si on ne refroidit pas, la température monte à l'intérieur du combustible, les gaines craquent, des produits de fission gazeux ou volatils foutent le camp, et surtout se produit une réaction entre la gaine en zircaloy et l'eau avec production d'hydrogène. L'hydrogène, ça explose, et la vapeur d'eau aussi peut exploser !

Ce récit est tout à fait vraisemblable, il peut avoir explosion d'hydrogène ou explosion de vapeur d'eau, ou les deux. La suite : le cœur qui fond, qui perce la cuve, qui traverse le radier en béton et qui pollue la nappe phréatique. Voilà l'accident que je vous ai décrit en deux mots.

Il peut y avoir de multiples causes qui amènent à cette perte du refroidissement du cœur du réacteur.

12. Les multiples causes possibles d'accident

Ce dont j'ai parlé, c'est l'agression externe naturelle : la perte de refroidissement du fait d'une tempête et d'une inondation. Il peut y avoir bien d'autres causes.

Défaut ou rupture de pièces

Il y a les causes techniques internes : une vanne qui tombe en panne, d'autant plus avec le vieillissement, puisque les réacteurs, maintenant ils vont avoir 40 ans.

Il y a une pièce, on pensait qu'elle était en bonne santé, en fait elle ne l'est pas parce qu'il peut y avoir eu des défauts de conception ou des défauts de fabrication, ou bien la corrosion est allée plus loin que prévu. Il peut y avoir des fissures non détectées qui affaiblissent la résistance des pièces, etc.

Faute d'exploitation ou de conduite. Combinaison des causes.

Vous avez un signal d'alerte, c'est trois heures du matin ! Vous savez, si vous prenez votre quart à trois heures du matin sur un bateau c'est le moment le plus périlleux ! Dans une centrale nucléaire, c'est pareil ! Le truc s'allume, on ne sait pas très bien pourquoi... Souvent on pense qu'il ne marche pas, on appuie dessus, ça déclenche ailleurs.

Donc il y a, dans les accidents, des causes techniques, des causes humaines, c'est normal. C'est la combinaison des causes qui produit un accident en général.

Agresions externes naturelles

La tempête plus l'inondation. Avec le changement climatique et tout ça, on peut avoir quelques craintes. En Floride ils ont arrêté les réacteurs quand il y a eu l'ouragan Irma, il y a quelques temps.

Agresions externes malveillantes : en particulier piscines des combustibles irradiés.

Une cause potentielle est particulièrement présente en permanence : c'est la vulnérabilité des piscines situées auprès des réacteurs qui contiennent les combustibles irradiés sortis de ces réacteurs, donc des matières radioactives extrêmement dangereuses. En France, les piscines ne sont pas « bunkerisées ». Vous avez l'enceinte de confinement qui est une enveloppe en béton, qui protège le réacteur, mais ce n'est pas le cas pour les piscines. Le risque est majeur pour les piscines de La Hague qui contiennent les combustibles irradiés de plus d'une centaine de chargements d'un réacteur et qui ne sont pas protégées.

Donc vous avez des causes multiples d'accident, combinant des causes techniques, des causes humaines, des agressions naturelles, des agressions externes ... Et ça s'est produit.

13. Accidents graves et accidents majeurs

Pendant longtemps, on nous a expliqué que la probabilité était tellement faible qu'on pouvait considérer l'accident comme impossible. D'ailleurs un accident grave, c'est-à-dire une fusion du cœur mais sans explosion de l'enveloppe de confinement, et encore moins un accident majeur avec propulsion de matières radioactives dans l'environnement ne sont pas prévus dans les études de sûreté.

Occurrences d'accident grave ou majeur de réacteurs

Réacteurs à uranium naturel, graphite, gaz :
Windscale (1957) au Royaume-Uni
en France c'est St-Laurent 1 (1969), St-Laurent 2 (1980)

Réacteur à uranium enrichi et eau sous pression : Three Mile Island (1979)

Three Mile Island, c'est exactement le même réacteur que les 34 premiers réacteurs français.
Accident grave causé par la combinaison d'une défaillance technique et d'une mauvaise réaction d'exploitation : une vanne ne s'est pas fermée, un bouton qui s'est allumé, c'était pas le bon ! Et il y a un employé qui est arrivé à trois heures du matin, qui s'en est aperçu, qui a appuyé sur un bouton, mais le cœur avait déjà fondu, et avait commencé à creuser la cuve et ça s'est arrêté. C'est un **accident grave** car il n'y a pas eu de rejets importants de radioactivité dans l'environnement.

Tchernobyl (1986)

Tchernobyl, c'est un autre type de réacteur, donc c'est un type d'accident différent, mais c'est un problème technique et d'exploitation, car ils étaient en train de faire une expérience, de sûreté nucléaire d'ailleurs, qui a foiré et donc a amené à une explosion et c'est un **accident majeur**. Avec des rejets très importants de matières radioactives dans l'environnement.

Fukushima (2011)

Fukushima, qui est le même type de réacteur à eau ordinaire mais bouillante (moindre pression dans le réacteur car on y produit directement la vapeur qui va dans la turbine, sans l'intermédiaire d'un générateur de vapeur). Combinaison d'un tremblement de terre qui a abîmé certains circuits et puis le tsunami qui a fait que le réseau électrique n'alimentait plus et que les diesels inondés ne marchaient plus. Par conséquent, il y a eu les explosions et la fusion du cœur dont je vous ai parlé tout à l'heure. C'est un **accident majeur**.

Des accidents de type Three Mile Island ou Fukushima peuvent se produire en France car ce sont les mêmes types de réacteurs susceptibles des mêmes défaillances.

Accidents précurseurs

Il y a aussi les accidents précurseurs, c'est-à-dire des accidents qui se sont arrêtés à temps ou que les opérateurs ont su arrêter à temps, mais qui, à quelque chose près, pouvaient faire un accident grave ou majeur.

En France, l'accident précurseur le plus grave sur les réacteurs actuellement en fonctionnement est celui de la centrale du Blayais, près de Bordeaux, en décembre 1999.

Il y a eu inondation et marée, ce n'était pas la marée la plus forte, puisque c'était 90 au lieu de 120 ou 130. Il y a eu combinaison de la perte d'électricité du fait de la coupure de l'alimentation par le réseau du fait de la tempête et d'une inondation qui a attaqué les diesels. Il a fallu dix heures à l'équipage pour récupérer le réacteur, ce qui a été facilité par le fait que c'était la nuit du 31 décembre et que tout le monde était « sur le pont » à cause de la crainte du « bug de l'an 2000 ». dans la nuit, le préfet avait téléphoné au maire de Bordeaux pour lui dire qu'il fallait envisager l'évacuation de Bordeaux.

Donc c'était le précurseur d'un accident de type Three Mile Island ou Fukushima. A Three Mile Island, il y avait eu production d'hydrogène, mais l'explosion énorme qu'on a eu à Fukushima n'avait pas eu lieu.

14. Exemple de la centrale du Bugey

Quand vous voulez porter un jugement sur une centrale particulière, vous avez deux choses à regarder : vous avez à regarder le site, où on l'a mise, et vous avez à regarder l'état des réacteurs.

Deux éléments qui vous permettent de juger s'il faut l'arrêter, pas l'arrêter mais avec quelles améliorations éventuelles.

Le choix du site

En juillet 2012, le directeur général de l'IRSN déclarait :

"Tous les sites ne se valent pas. Les sites nucléaires français ont été choisis à l'époque avec deux préoccupations principales. 1) l'aménagement du territoire et 2) la faisabilité technique... Et la sûreté à l'époque était dans le bruit de fond mais ce n'était pas un paramètre central ».

Qu'en est-il de la centrale du Bugey.

Zone sismique : Référence séisme de Belley (1822) – ASN

Fessenheim, Bugey, Tricastin, on n'aurait jamais dû les mettre où ils sont du point de vue du site. Fessenheim, vous avez une zone sismique, vous avez le refroidissement par le canal d'Alsace qui est 9 mètres plus haut que la base de la centrale, donc si le canal est endommagé pour une raison quelconque, la centrale est noyée et enfin vous avez la nappe phréatique qui affleure le radier, dalle en béton sur laquelle est posé le réacteur. Et comme la nappe affleure le radier, dans les autres centrales il fait 4 mètres d'épaisseur, à Fessenheim, il fait 1,5 m. Donc on n'aurait pas dû construire de centrale à Fessenheim.

Bugey n'est pas la pire, mais parmi les plus mauvaises, car vous avez un problème

de zone sismique : l'ASN a dit qu'il faudrait refaire les calculs parce que la référence du séisme n'est pas la bonne, etc.

Inondation

Risques d'inondation qui a été aussi souligné par l'ASN et que vous connaissez tous avec le barrage de Vouglans qui est en amont sur l'Ain. On ne met pas une centrale là.

Population

Saint-Vulbas, commune où est implantée la centrale, se situe à 70 km de Genève et 35 km de Lyon.

Les villages à proximité, on peut penser les évacuer. Si vous avez un million de personnes à évacuer, ça devient problématique !

Donc du point de vue du site : nul ! Bugey n'est pas le seul : il y a le Blayais, Gravelines avec 7 usines SEVESO à côté, deux millions de personnes. Fessenheim, Bugey, Tricastin, Gravelines, le Blayais je crois que ceux-là, ce sont les plus mauvais.

Les réacteurs

Et puis il y a les réacteurs, et là, on peut dire que vous êtes assez gâtés.

Bugey 1 : UNGG – Démantèlement différé?

Outre les quatre réacteurs REP en fonctionnement, la centrale abrite le réacteur Bugey 1, dernier exemplaire de la filière UNGG qui est arrêté depuis 1994 mais pour lequel se pose le problème du démantèlement. EDF devait le démanteler très vite avec un procédé à l'eau et il a dit en 2016 que ce n'était pas possible après avoir dit pendant des années que ça ne posait aucun problème. Il a dit que ce serait reporté à au moins 50 ans. C'est très grave ! Parce que le modérateur est constitué d'un empilement de graphite, qui est radioactif qui peut se dégrader avec le temps. C'est-à-dire que si vous avez un défaut ou un mouvement sismique, même très faible, vous aurez le graphite qui commencera à s'effondrer.

Je trouve que cette affaire est scandaleuse. Pour le moment l'ASN a rouspété, mais, que se passera-t-il ? On n'en sait rien, mais en tout cas Bugey 1 devrait être démantelé de façon urgente. Pour le moment, c'est différé.

Bugey 2, 3, 4, 5, quatre réacteurs REP qui ont des problèmes.

Bugey 2 : le radier du réacteur n'est pas du même type que les réacteurs suivants. Inquiétudes sur le fait que, en cas de fusion du cœur, le « corium » (cœur fondu) puisse percer ce radier et atteindre la nappe phréatique.

Bugey 5 : l'enceinte de confinement a eu des fuites. La qualité de la réparation est contestée.

Bugey 4 : il y a un générateur de vapeur qui fait partie des générateurs de vapeur sur lequel il y a eu des falsifications : la teneur en carbone dans une pièce du générateur est mauvaise. On est obligé de mettre des mesures compensatoires, pour démarrer doucement et ralentir doucement, donc c'est quand même discutable.

Bugey 3 : comme il y a eu des falsifications dans les pièces fabriquées par Creusot Forge-Areva, l'ASN a demandé à EDF de regarder un peu en détail et on a trouvé des centaines de pièces qui ne sont pas bonnes à des degrés divers. Il y a 12 réacteurs qui ont été signalés par EDF comme contenant beaucoup de ces pièces et celui qui en contient le plus, c'est Bugey 3. On ne sait pas pourquoi, on peut penser que c'est le hasard, mais il se trouve que ça tombe à un endroit où je fais une conférence.

Les piscines de combustibles irradiés (agression externe)

Comme pour tous les réacteurs en fonctionnement, la piscine qui contient des combustibles irradiés est très vulnérable aux agressions extérieures.

ICEDA

Et vous avez ensuite ICEDA qui est prévu comme étant un dépôt de déchets radioactifs. Moi je ne connais pas le détail, seulement je trouve que mettre sur le même site des réacteurs en fonctionnement, un réacteur Bugey 1 qui devrait être démantelé, mais ne l'est pas, et en plus un stockage de déchets radioactifs, je pense que l'on accumule les risques...

Entre parenthèses, ICEDA devait être fait pour recueillir les déchets de graphite de Bugey 1 (et des autres réacteurs UNGG de Marcoule et de la Loire. Si on dit que Bugey 1 ne devrait être démantelé que dans 100 ans, ils devraient se donner la peine de réfléchir si vraiment il faut construire ICEDA. Sur un même site avoir un réacteur qui devrait être démantelé et qui pose des problèmes de ce fait, 4 réacteurs en fonctionnement, des transports de combustibles irradiés, des transports de ceci et de cela, un chantier à côté pour construire un ICEDA qui devrait lui aussi avoir des transports de matières radioactives, je trouve ça pas malin du tout d'accumuler toutes ces choses différentes et toutes dangereuses au même endroit. L'Agence de l'environnement s'est interrogée sur le respect des différentes démarches qui devaient être faites en fonction des différentes conventions internationales et donc il y a eu un recours car processus de décision non démocratique. Ils s'en moquent.

15. Probabilités et risques

Monde :

450 réacteurs pendant 30 ans : 14 000 année.réacteur ou réacteur.an

Probabilité théorique d'un accident majeur :

10^{-6} par « réacteur.an »

Quand on prenait les probabilités qu'ils mettaient en avant de 10^{-6} par année x réacteur, on arrivait pour les 400 réacteurs au monde à l'occurrence prévue de 0,014 accident.

Or, 0,014, ce n'est pas beaucoup, donc il n'y aura pas d'accident.

Occurrence observée : 4 réacteurs (1 Tchernobyl, 3 Fukushima)

Faites le calcul avec 4 au lieu de 0,014 et vous trouvez que c'est 300 fois plus.

Donc facteur 300

Conclusion, qui n'est pas dite par moi, mais par le Président de l'ASN en avril 2016 : « ***Un accident majeur, comme ceux de Tchernobyl ou de Fukushima, ne peut être exclu nulle part dans le monde, y compris en Europe*** ».

Union européenne : 134 réacteurs - France : 58 réacteurs

Après ça, il faudrait voir comment les gens jugeraient de l'acceptation ou non d'un tel risque.

Mais on ne le leur dit jamais, donc ils ne peuvent pas se faire une opinion.

16. Les déchets nucléaires

Les déchets radioactifs présents en France proviennent majoritairement des industries de la production d'électricité d'origine nucléaire, mais aussi de la recherche, des usages militaires, des industries non nucléaires et de la médecine nucléaire. C'est à partir de l'extraction de l'uranium, matière première du fonctionnement des réacteurs nucléaires, que se déroulent les différentes étapes des industries électronucléaires, étapes dont chacune, sans exception, donne lieu à la production de déchets radioactifs particulièrement dangereux pour la santé humaine et l'environnement.

Chaque étape de la carrière du combustible nucléaire produit des déchets

- Production d'uranium
- Conversion et enrichissement, uranium appauvri
- Production des « combustibles irradiés dans les réacteurs »
- Retraitement ou non des combustibles irradiés (uranium, plutonium, produits de fission et actinides mineurs)
- Démantèlement des centrales et usines nucléaires

Les différents types de déchets sont regroupés en grandes catégories, principalement selon la durée de vie et le niveau de radioactivité. La classification en vigueur en France, basée sur ces critères et sur les filières correspondantes de gestion des déchets (mises en œuvre, simplement définies ou même seulement envisagées), retient :

- deux seuils de durée de vie, de 100 jours et de 31 ans (vie très courte : moins de 100 jours ; vie courte : entre 100 jours et 31 ans ; vie longue : plus de 31 ans) ;
- quatre niveaux de radioactivité : très faible activité (TFA : moins de 10^2 Bq/g) ; faible activité (FA : entre 10^2 et 10^5 Bq/g) ; moyenne activité (MA : entre 10^5 et 10^8 Bq/g) ; haute activité (HA : plus de 10^8 Bq/g).

L'association de ces deux critères permet de définir les catégories de déchets.

Tableau - Les déchets radioactifs en France

Volume à fin 2013				
	Tous déchets		Déchets HA	
	Total	Electronucléaire	Total	Electronucléaire
1000 m ³	1458	880	3,12	2,70
Activité fin 2013				
	Tous déchets		Déchets HA	
Million de TBq	225,5		220	
Déchets HA: 0,2% du volume et 98 % de l'activité totale				

17. Le stockage des déchets

Le problème majeur de la gestion des déchets issus de l'industrie électronucléaire est celui concernant les déchets de haute activité : les combustibles irradiés eux-mêmes (dans la plupart des pays) ou les déchets vitrifiés issus de l'usine de retraitement, en France.

La solution d'un stockage en couche géologique profonde est étudiée en Finlande et en Suède pour un stockage dans le granite. Aux Etats-Unis, le projet de *Yucca Mountain*, longtemps étudié, a finalement été abandonné pour des raisons géologiques. La pertinence de ce type de stockage a été mise en doute en particulier en Allemagne où le stockage en profondeur dans une ancienne mine de sel à Asse s'est révélé désastreux du fait des infiltrations d'eau (et demandera des milliards d'euros pour récupérer les déchets) et, aux Etats-Unis, un stockage souterrain de déchets militaires de moyenne activité, Wipp, a connu un incendie souterrain.

En France, il y a le projet de CIGEO qui est d'enfouir les déchets à 500 mètres sous terre, dans une couche d'argile. Ce projet, en tant que projet industriel, a été analysé par de nombreux d'experts, y compris les experts officiels, et récemment il y a eu même des experts internationaux qui se sont penchés dessus. Il y a des risques parce que l'opération devrait durer 100 ans, non seulement de creuser le site lui-même, mais aussi de charger les combustibles en même temps.

Il y a des risques d'inondation, des risques d'incendie, enfin les risques sont tels que ce projet, est extrêmement critiqué y compris par des gens qui ne sont pas du tout opposés au nucléaire mais qui pensent que ce projet est nul. En plus il y a pour moi un argument qui est très fort, c'est que la science nucléaire est très récente et que rien ne dit qu'on ne pourra pas un jour agir sur ces déchets et les transformer d'une certaine façon. Si on les met à 500 mètres et que l'on rebouche, c'est irréversible : c'est criminel par rapport aux générations futures, parce qu'elles sauront vaguement qu'il y a en ce lieu quelque chose de très dangereux, ou de très précieux ...

En plus si cette solution est mise en œuvre en France, tout le monde se précipitera pour adopter cette solution y mettra ses déchets nucléaires ou chimiques et n'importe quel pays dira, moi je fais comme la France! Au bout de peu de temps, un ou deux siècles, vous aurez partout des déchets radioactifs et chimiques dans la croûte terrestre. Et la circulation de l'eau ? Donc vous trouverez dans les endroits les plus bizarres, de l'eau radioactive et vous comprendrez qu'il y a eu des saloperies qui ont été enfouies.

Ce projet est inacceptable, et pour l'instant, ce que font les États-Unis, ou l'Allemagne, c'est de garder les combustibles irradiés sans le retraitement, de les mettre dans des conteneurs en acier et en béton et éventuellement de les mettre en sub-surface, c'est-à-dire sous une colline par exemple, de façon à les protéger des agressions extérieures et de les ranger dans un hangar, pendant plusieurs siècles, parce que de toutes façons on est obligé de surveiller pendant 300 à 500 ans, les stockages de produits radioactifs que l'on a déjà mis en surface. Donc on a du temps, on pourrait les mettre dans des conditions qui sont assez sûres et pousser la recherche pour trouver des solutions.

Il faut donc à la fois développer le stockage à sec en sub-surface et accélérer la recherche pour arriver à réduire la nocivité et la durée de vie des éléments radioactifs les plus dangereux.

Il faut aussi s'interroger sur la poursuite d'une technique de production d'électricité qui engendre des déchets radioactifs extrêmement dangereux pendant des centaines de milliers d'années et pour lesquels aucune solution satisfaisante n'a été encore trouvée.

La position de l'Allemagne a été clairement exposée par Wolfgang Renneberg, directeur général chargé de la sûreté nucléaire au ministère de l'Environnement de novembre 1998 à novembre 2009, dans un discours prononcé à Madrid le 24 mai 2001 :

“Comme vous le savez tous, le gouvernement de l'Allemagne a décidé d'éliminer progressivement l'utilisation commerciale de l'énergie nucléaire... Une raison supplémentaire est qu'aucune solution pratique au problème de l'élimination finale des déchets hautement radioactifs n'a encore été trouvée. Les déchets radioactifs sont un fardeau pour les générations futures. L'arrêt définitif de la production d'électricité d'origine nucléaire supprime la production de nouveaux déchets.”

Figure 6 - Entreposage de longue durée à sec en surface ou en sub-surface

Aux Etats-Unis



Dry Storage of Spent Fuel

En Allemagne



18. Les crises actuelles du nucléaire français

Les promoteurs du nucléaire en vantaient les trois avantages décisifs :

1. C'est une énergie propre : les déchets et les rejets montrent que non.
2. C'est une énergie sûre : les accidents montrent que non
3. C'est une énergie bon marché: cela a été un certain temps le cas (notamment parce que l'on ne comptait pas tous les coûts futurs) ; maintenant, c'est fini.

On arrive aujourd'hui en France à plusieurs crises de l'industrie nucléaire qui se superposent et interagissent de façon dangereuse.

Crise technique : vieillissement, malfaçons, falsifications

Générateurs de vapeur, EPR, dossiers Creusot Forge ...

Risque technique, j'en ai parlé, vieillissement, malfaçons, falsifications. Falsifications dans ce domaine, c'est grave. Là quand vous avez des centaines de pièces qui ont été falsifiées et qu'il y en a certaines comme les générateurs de vapeur qui posent problème, cela est grave ... Le réacteur Fessenheim 2 a été arrêté du jour au lendemain quand l'ASN a constaté qu'un générateur de vapeur était complètement pourri, du fait justement d'une falsification et il est toujours arrêté à ce jour. : . Fessenheim 2 a fonctionné quatre ans avec un générateur de vapeur qui était inacceptable. Donc situation technique mauvaise du côté des réacteurs.

Il y a aussi des problèmes à La Hague : piscines de combustibles irradiés vulnérables, évaporateurs des solutions de déchets de haute activité avant vitrification prématurément vieillis, silos d'entreposage des déchets des déchets vitrifiés ...

Crise de sûreté nucléaire : contrôle, suivi, application, moyens

Crise de sûreté nucléaire liée à la découverte de ces falsifications, car on s'est aperçu que tout ça est passé à travers les contrôles, d'abord parce que les opérateurs ont menti, et parce qu'on n'a pas pu contrôler le fait qu'ils aient menti. Entre le mensonge des uns et la faiblesse des autres, il y a des questions qui se posent sur la sûreté, il faudrait d'une part beaucoup plus de moyens et d'autre part des sanctions beaucoup plus sévères et qui soient appliquées.

Comme à Tricastin, on arrête les quatre réacteurs d'un coup : « on vous a dit de faire une jetée, vous ne la faites pas, on arrête ». Et il y a quelques mois, l'autorité de sûreté a cédé sous la pression d'Areva, d'EDF et du gouvernement et a autorisé la mise en service de la cuve de l'EPR alors que les calottes de fond et du couvercle de la cuve ne respectent pas la réglementation sur la qualité de l'acier (trop de carbone).

Crise financière : AREVA, EDF

Areva est quasiment en faillite (tripatouillages sur des achats de mines d'uranium, EPR finlandais et français ruineux, fin des commandes étrangères pour le retraitement...) et n'est maintenue hors de l'eau que par des apports de l'Etat, l'achat par EDF d'une partie de ses activités (les réacteurs) et la vente de certaines activités.. La dette cumulée sur six ans d'Areva est de 11 milliards d'euros. Areva va être restructuré en plusieurs compagnies : NewCo, Areva NP (EDF), Areva TA et Areva SA. L'apport public a été jusqu'ici de 7,5 Md€ (5 Etat, 2,5 EDF pour achat de Areva NP).

EDF a dette énorme et c'est l'État qui vient au secours. La dette brute d'EDF est passée de 28 Md€ en 2007 à 75 Md€ en 2016 (pour une dette nette de 37 Md€). Le cours de l'action EDF est passé de 60 € en 2007 à 9 € en 2016. Les investissements que devrait faire EDF sur dix ans (2015-2025) s'élèvent à 125 Md€ (20 pour Hinkley Point en Angleterre, 22 pour les énergies renouvelables et 50 pour le Grand carénage).

Évidemment, AREVA est maintenant 100% État avec un petit bout qui va passer à EDF. Et EDF est pratiquement d'État aussi. Donc il y a 5 ou 7 milliards qui vont à AREVA et 2 ou 3 milliards pour la recapitulation d'EDF et on arrive à 10 ou 12 milliards pour remettre à niveau ces entreprises. Il y a quelques années on nous expliquait qu'elles étaient les meilleurs du monde et le fer de lance de l'excellence française.

Les contraintes financières sont telles qu'EDF n'aura pas les moyens de faire tous les travaux qui seraient nécessaires pour entretenir un parc nucléaire vieillissant. Cela fait dire au président de l'ASN que « **la situation de la sûreté nucléaire est préoccupante à moyen terme** ». Dit par un haut fonctionnaire au langage policé, cela signifie que la situation est grave.

Crise sociale :

Licenciements, sous-traitance et intérimaires, pression sur les travailleurs.

Crise sociale évidemment, car si vous avez des problèmes de fric, vous faites des économies, vous faites des licenciements, vous faites accélérer les cadences, vous utilisez de plus en plus d'intérimaires pour les chantiers et les travaux de maintenance les plus dangereux. Vous ne faites pas trop attention, vous mettez la pression sur les travailleurs, du coup les travailleurs dans les centrales se disent si je trouve un truc qui foire, je ne dis rien parce qu'on va m'engueuler. La situation de la sûreté dans les centrales se dégrade.

Crise de gouvernance : pas d'expertise extérieure, État « tout puissant » et politiques impuissants (volens, nolens...)

La crise de gouvernance n'est pas tellement nouvelle, mais ne s'améliore pas, tout ça reste dans un milieu qui est relativement fermé avec très peu d'expertises extérieures, c'est-à-dire il n'y a pas la capacité de pouvoir intervenir, discuter avec un État tout puissant, des décisions qui sont prises.

J'ai déjà expliqué ce bloc étatique au sommet et les politiques, les pauvres, soit ils sont achetés, soit ils sont mous.

Et tout cela dans une situation mondiale de déclin du nucléaire.

19. L'électronucléaire dans le monde

Figure 7

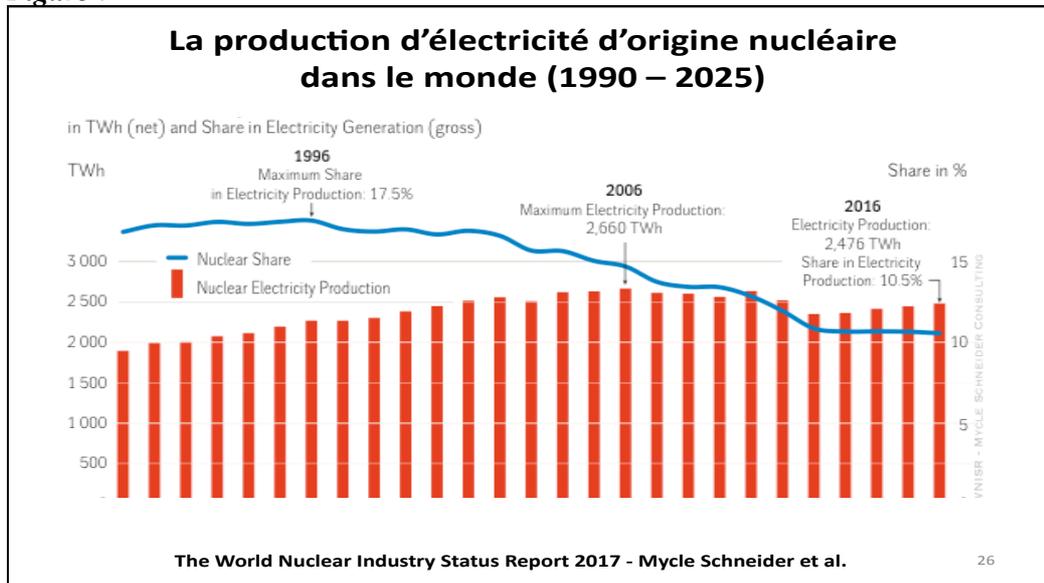
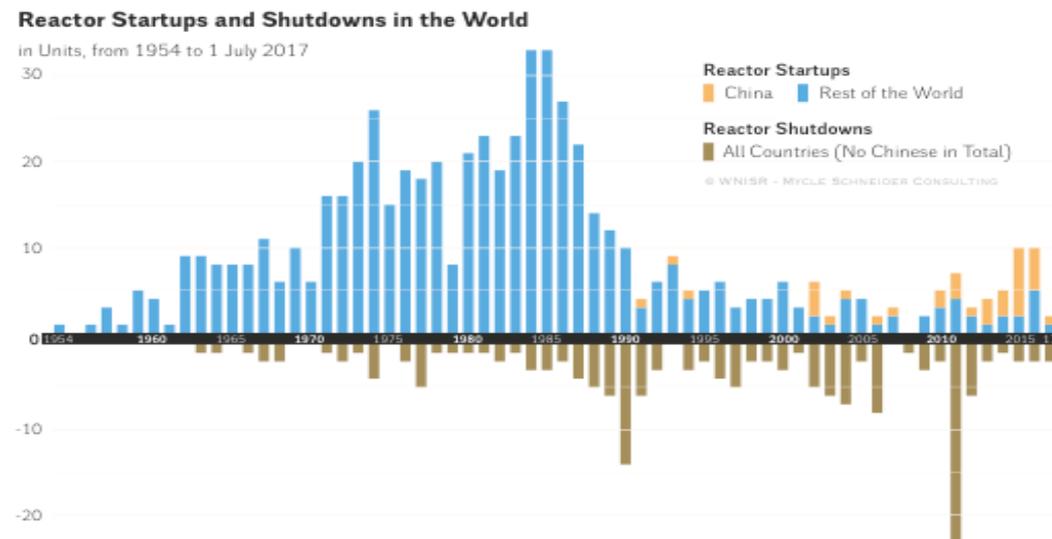


Figure 8 - Démarrages et arrêts définitifs ou de long terme des réacteurs électronucléaires dans le monde



Source : The World Nuclear Industry Status Report 2017 – Mycle Schneider, A. Froggatt et al.

La situation internationale de l'électronucléaire est en général très peu connue, surtout en France où le public comme les médias sont persuadés que tout le monde développe ou cherche à développer cette technique de production d'électricité.

Le maximum de la part du nucléaire dans l'électricité au monde, c'était en 1996 : 18%. Ça commence à faire loin. En 2016 c'est 11%. Le maximum en valeur absolue, c'était en 2006, à 2660 milliards de kWh ou Terawattheure, TWh) et ça a aussi baissé : 2470 TWh en 2016. C'est tout à fait compréhensible, car vous voyez que le sommet du nombre de réacteurs qui ont démarré au monde, c'était en 1986, l'année de Tchernobyl. La décroissance a démarré bien avant Fukushima. Maintenant on dit que c'est à cause de Fukushima, pas du tout ! Dès Tchernobyl, il y en a eu beaucoup moins. Ça a un peu remonté ensuite, puis redescendu : après 2011 on voit l'arrêt des réacteurs japonais et les 7 réacteurs arrêtés en Allemagne tout de

suite après Fukushima. Le seul pays qui continue, mais cette année, en 2016 il en a démarré un seul, c'est la Chine et à un degré moindre la Russie.

Le reste du monde a énormément baissé : arrêt total en Autriche et en Italie depuis Tchernobyl, décision de l'Allemagne en 1998-2000 d'en finir avec le nucléaire avec arrêt progressif jusqu'en 2022, décisions de sortie en Suède et en Belgique, décision récente de la Corée du Sud d'une démarche à l'allemande, déclin aux Etats-Unis, jusqu'à, très récemment, l'arrêt de la construction de réacteurs pour des raisons économiques.

C'est, pour une part l'effet des accidents : l'accident de Three Mile Island, en 1979 a de fait stoppé le nucléaire aux Etats-Unis, les catastrophes de Tchernobyl et Fukushima ont ébranlé pas mal de pays. D'autre part, les coûts d'investissement pour la construction des centrales nucléaires ont fortement augmenté, mais aussi les délais de construction et les dépenses de gestion des déchets radioactifs et de démantèlement des installations nucléaires. Pas mal de pays qui voulaient se lancer dans le nucléaire ont retardé toute décision, comme le Vietnam.

Actuellement, les deux pays qui poursuivent une politique de construction de centrales nucléaires sont la Chine et, à un degré moindre, la Russie, l'Inde et les Emirats Arabes Unis (EAU)

Situation mondiale des réacteurs en construction en 2017 (entre parenthèses : les retards par rapport aux prévisions) :

- Plus de 2 réacteurs : Chine 20 (11) ; Russie 6 (6) ; EAU 4 (1)
- 2 réacteurs : Etats-Unis (2) ; Belarus (1) ; Pakistan (?)
- 1 réacteur : Finlande (1) ; France (1) ; Japon (1) ; Argentine (1)

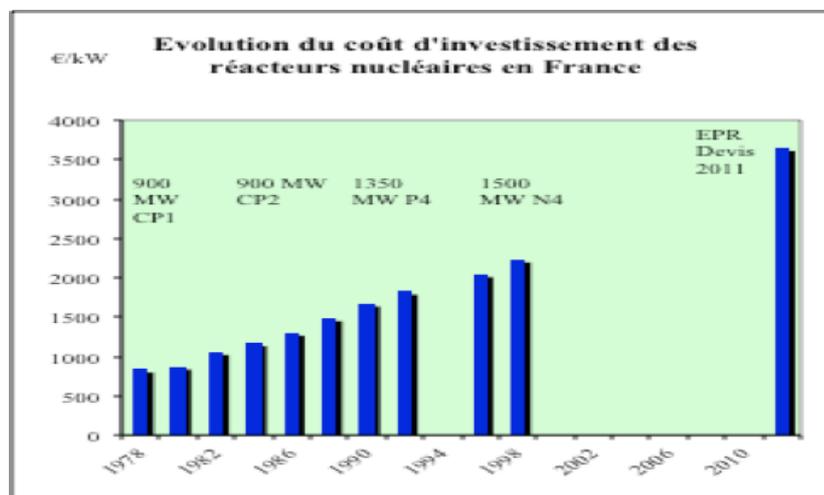
Soit un total de 51 réacteurs, dont 35 avec des retards.

20. Les coûts du nucléaire en France

Lorsque l'on parle du coût du nucléaire, deux informations sont importantes : le coût d'investissement pour la construction d'une tranche nucléaire et le coût de production du kWh produit.

1. Le coût d'investissement

Figure 9 - Coût du MW installé des différents paliers de la filière REP (en euros 2010)⁴



Note : la puissance électrique du réacteur EPR est de 1650 MW

2. Le coût de production de l'électricité :

La référence la plus récente sur le coût de production du MWh par les centrales nucléaires françaises⁵ est le rapport de la Cour des comptes de 2014⁶.

Le premier rapport de la Cour des Comptes de 2012 évaluait le CCE du MWh produit par le parc nucléaire français à 49,5 euros (€/MWh), en euros courants de l'année 2010⁷.

Le second rapport de 2014 présente une actualisation de ce coût ainsi que sa réévaluation pour l'année 2013 et aboutit à la valeur de 59,8 €/MWh, en euros courants, soit une augmentation de 10,2 €/MWh (21%). Cette forte évolution est due à la forte croissance des dépenses d'exploitation entre 2010 et 2013, ainsi qu'à des investissements de maintenance.

3. Le cas de l'EPR de Flamanville

EPR⁸ est un réacteur à uranium enrichi et eau sous pression (REP ou PWR) de 1650 MW de puissance électrique. Quatre réacteurs de type EPR, fournis par AREVA sont actuellement en construction : Olkiluoto 3 (Finlande, depuis 2005), Flamanville 3 (France, depuis 2007), Taishan 1 et 2 (Chine, depuis 2009).

Comme le montre la figure 2, le coût prévisionnel de l'EPR de Flamanville en fonction du temps se place sur une courbe exponentielle depuis le démarrage du chantier en 2016. C'est dire que chaque année de retard coûte plus cher en valeur absolue: 0,3 milliard par an entre 2006 et 2008, 0,5 milliard entre 2008 et 2010, mais 1,1 milliard par an depuis 2010 (soit près de 100 millions par mois).

⁴ Arnulf Grübler, IIASA : « *The Cost of the French Nuclear Scale-up: A Case of Negative Learning by Doing* », Energy Policy 38 (2010), 5174-5188.

⁵ 19 centrales équipées de 58 réacteurs à uranium enrichi et eau sous pression (REP ou PWR) d'une puissance électrique de 900 à 1450 MW. La puissance totale nette du parc nucléaire est de 63,13 MW.

⁶ Cour des comptes : « *Le coût de production de l'électricité nucléaire – Actualisation 2014* », mai 2014. Ce rapport est l'actualisation du « *Rapport public thématique : Les coûts de la filière électronucléaire* ». La Documentation française, janvier 2012. Ces rapports sont disponibles sur www.ccomptes.fr.

⁷ Le coût serait supérieur d'environ 6 €/kWh si l'on prenait en compte les dépenses publiques de recherche et développement, estimées à 38 Md€.

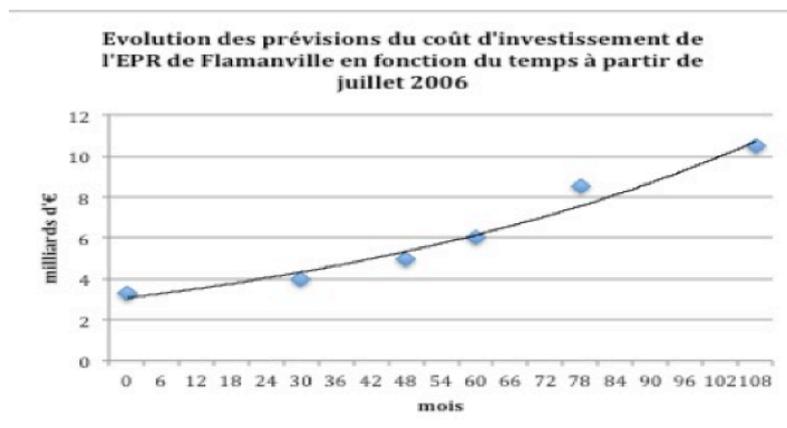
⁸ EPR : initialement projet de réacteur franco-allemand (Areva-Siemens), baptisé *European Pressurized Reactor*, transformé en *Evolutionary Power Reactor* à la suite du retrait de Siemens consécutif à la décision de l'Allemagne de renoncer au nucléaire.

Le président d'EDF vient d'annoncer un nouveau décalage de près de deux ans et un coût de deux milliards supplémentaires pour l'EPR de Flamanville (10,5 milliards d'€) en faisant le pari risqué que dans un an les essais imposés par l'Autorité de sûreté sur la solidité des cuves⁹ et le fonctionnement des soupapes du réacteur mis en cause début 2015, lèveront toute hypothèque sur la sûreté du réacteur.

EDF ne donne plus de prévision du coût du kWh.

Cependant, sur la base du coût d'investissement actuel (10,5 Md€), le calcul du coût courant économique (CCE) selon la méthode de la Cour des comptes donne des valeurs de 110 à 120 €/MWh pour un taux d'actualisation de 80%.

Figure 10 : Le coût d'investissement de l'EPR de Flamanville



4. Le marché d'Hinkley Point

EDF Energy, filiale d'EDF qui possède les réacteurs nucléaires anglais, et le gouvernement britannique ont signé un accord pour la construction de deux réacteurs nucléaires sur le site de Hinkley Point (Somerset), basé sur un « prix garanti » de vente du MWh par EDF. Ce prix, en octobre 2014, était de 92,5 livres sterling par MWh, soit 126 € ou 142 \$ le MWh, soit plus de deux fois supérieur à celui du nucléaire amorti en France.

C'est actuellement la seule donnée officielle que l'on possède sur le coût du kWh produit par un EPR. La Commission européenne a donné son feu vert à cet accord en octobre dernier, estimant que le prix garanti de l'électricité ne constituait pas une aide d'Etat. Ce qui n'a pas empêché en juillet dernier le gouvernement de l'Autriche, pays très opposé au nucléaire, et dix fournisseurs d'énergie de porter plainte contre cette décision. Les prix du MWh suscitent également des remous en Angleterre. Le 9 septembre 2015, le *Financial Times* a publié un éditorial appelant le gouvernement britannique à reconsidérer le projet. Le Parlement britannique a également sonné l'alarme sur ce qu'il considère comme un marché de dupe. Du côté français, le montant de l'investissement a été considéré comme inacceptable par le directeur financier d'EDF qui a de ce fait démissionné.

5. Trois grandes incertitudes sur les coûts futurs.

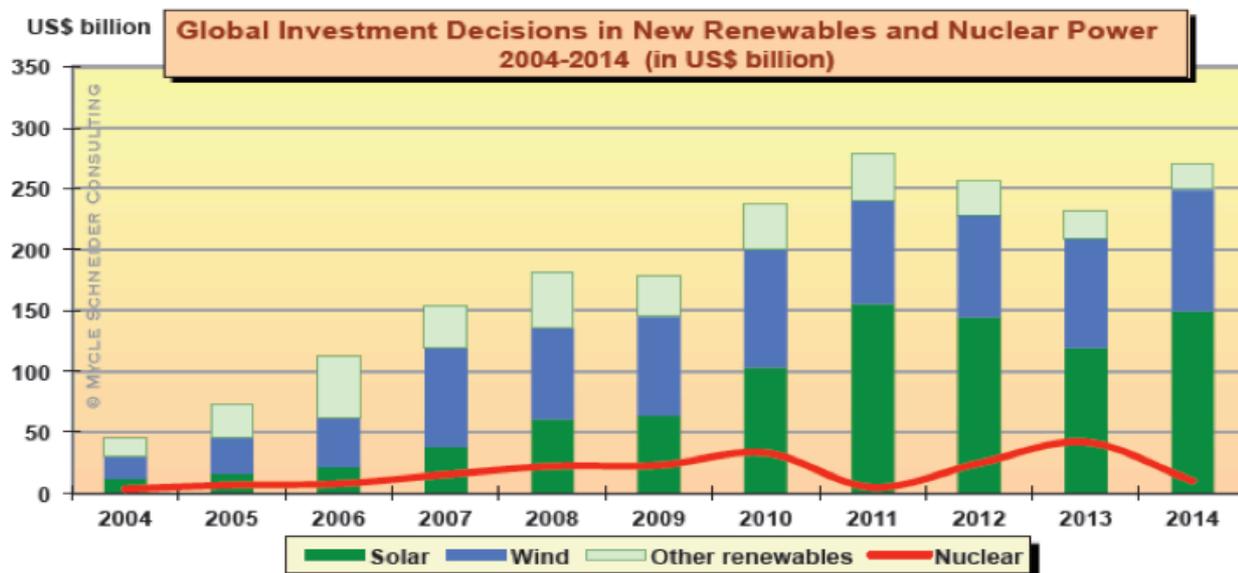
- a) Les coûts du « Grand carénage » et les coûts du « passage des 40 ans » pour les réacteurs actuellement en fonctionnement.
- b) Les coûts du démantèlement des centrales et des usines nucléaires
- c) Le coût de la gestion des déchets radioactifs

Il faudrait également prendre en compte, puisque l'accident majeur est jugé possible en France, le coût d'un accident majeur sur l'une des centrales nucléaires. Ce coût a été estimé par l'IRSN au minimum de 500 milliards d'euros mais pouvant aller bien au-delà en fonction de la situation des différentes centrales (éloignées ou non de grandes concentrations de population ou de grands complexes industriels).

⁹ Défauts (trop forte teneur en carbone) détectés sur le couvercle et le fond de cuve, fabriqués par Areva.

21. Les décisions d'investissement dans le monde

Figure 11 – Les décisions d'investissements dans le monde : électricité d'origine nucléaire et renouvelable



Sources: FS-UNEP 2015 and WNISR original research

Source : The World Nuclear Industry Status Report 2015 - M. Schneider, A. Froggatt et al.

Sur cette figure, vous avez la valeur des investissements pour la production d'électricité d'origine nucléaire ou renouvelable dans le monde en milliards de dollars. La ligne rouge, c'est le nucléaire. Les colonnes en couleur, ce sont les énergies renouvelables : le vert c'est le solaire, le bleu c'est l'éolien et le jaune ce sont les autres renouvelables.

Il y en a très peu de pays qui construisent de nouveaux réacteurs nucléaires.

Tableau - Coût de production des solutions alternatives pour la production d'électricité pour de nouvelles installation aux Etats-Unis (Banque Lazard, New-York, 2015)

Type de centrale	US\$ par MWh – Coût bas	US\$ par MWh – Coût haut
Solaire photovoltaïque	72	86
Eolien terrestre	37	81
Efficacité énergétique	0	50
Nucléaire	92	132
Charbon	66	151
Gaz à cycle combiné	61	87

Un point intéressant, qui apparaît rarement dans ce genre de comparaison : l'efficacité énergétique est la solution la plus intéressante jusqu'à un certain seuil.

La production d'origine nucléaire est la plus chère (sauf pour la valeur haute du charbon).

Pour les énergies renouvelables, la différence entre coût bas et coût haut s'explique essentiellement par la qualité du site en termes de vent ou de soleil.

Récents appels d'offre pour photovoltaïque et éolien :

- USA Mai 2017 - 100 MW PV : 30-45 \$ le MWh
- Mexique 2017 – 3 TWh PV : 18 \$ le MWh
- Chili 2017 – 1 TWh PV : 21,5 \$ le MWh
- Abu Dhabi 2017 – 350 MW PV : 24 \$ le MWh
- Inde 2017) 750 MW PV : 46 \$ le MWh
- Allemagne 2017, plusieurs 50 MW PV : 59 \$ le MWh
- France 2017 – total 500 MW PV : 68 \$ le MWh

- Mexique 2017 – total 900 MW éolien: 36 \$ le MWh
- Pérou 2017 – 160 MW éolien : 37 \$ le MWh
- Maroc 2016 - 850 MW éolien : 30 \$ le MWh

21. France : la loi sur a transition énergétique

Loi pour la transition énergétique de 2015 :

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050.
- Réduire de 50% la consommation énergétique finale à l'horizon 2050 et de 20% en 2030, par rapport à 2012 (154 Mtep).
- Réduire de 30% la consommation primaire d'énergies fossiles à l'horizon 2030, par rapport à 2012.
- Energies renouvelables :
 - 23% en 2020 et 30% en 2030 de la consommation énergétique finale
 - 40% en 2030 de la production d'électricité
- Réduire de 75% à 50% en 2025 la part du nucléaire dans la production d'électricité.

Ce qui est le plus important c'est la réduction de la consommation d'énergie finale de 50% à l'horizon 2050 et 20% à l'horizon 2030,, les objectifs sur les renouvelables et la réduction de la part du nucléaire de 75 à 50% de la production d'électricité en 2025. Pour le moment, ça n'a pas commencé, donc on verra.

Je vous recommande notre site www.global-chance.org où vous trouverez des choses tout à fait intéressantes,

Je vous remercie de votre attention.