LE NUCLEAIRE, ~~NON~~ OUI MERCI !

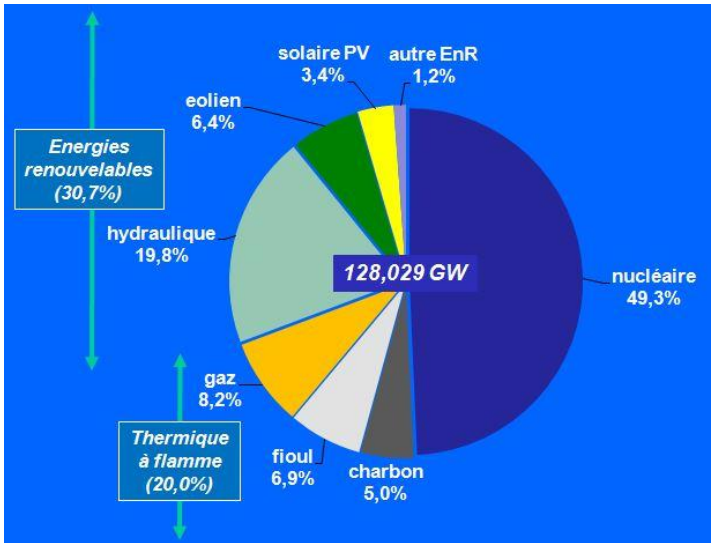
Petit guide à l'usage des anti-éoliennes et destiné aux anti-nucléaires… Jeu des questions-réponses

Jacky RUSTE(*)

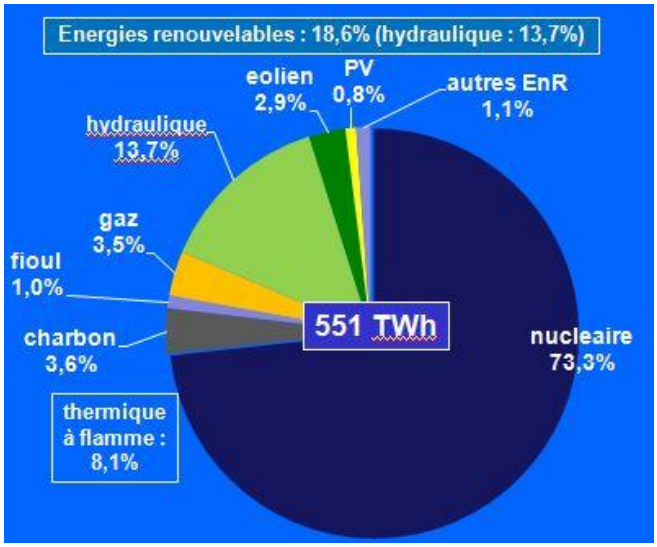
Le nucléaire a mauvaise presse, il est quasiment honteux de dire qu'on est pour ! C'est le résultat d'une propagande mensongère et d'une ignorance crasse de nos concitoyens ! (et d'un manque d'information de la part des médias, car ce n'est pas politiquement correct d'en dire du bien ou de seulement en parler sans en dire du mal !) Ce n'est pas de leur faute s'ils n'ont pas tous fait une licence de physique et si on leur répète à longueur de journée que le nucléaire c'est dangereux et que ça pollue !

Et pourtant le nucléaire dans le monde ne s'est jamais aussi bien porté ! environ 400 réacteurs nucléaires sont en service dans le monde (dont 70% de réacteurs à eau pressurisée), 75 en construction, plus de 150 planifiés et plus de 300 en prévision.

La France dispose de 58 réacteurs à eau pressurisée, soit une puissance installée de 63,13 GW (49,3% de la puissance totale) et qui fournit 73% (404 TWh) de la production électrique.



Parc de production électrique français (2014)



Production électrique (2013)

Compte tenu de leur production intermittente et imprévisible, les énergies dites « renouvelables » (mais qui en réalité ne le sont pas vraiment), , ne peuvent en aucun cas représenter une solution pérenne et importante (d'autant plus que l'énergie électrique ne peut se stocker sauf de manière très limitée et avec un très mauvais rendement).

(*) Ingénieur Génie Physique INSA Lyon, Docteur Ingénieur de l'Université de Nancy I, Ingénieur de recherches senior retraité (EDF R&D Centre des Renardières, département Etudes des Matériaux)
Ancien Professeur associé de l'Université de Marne la Vallée

jacky.ruste@free.fr
http://micro.icaunais.free.fr
http://asso.acide89.free.fr

A côté du thermique « à flamme » (charbon et gaz naturel) le nucléaire est une solution incontournable et d'avenir (d'autant plus que les progrès dans la conduite des réacteurs nucléaires leur donnent une plus grande souplesse, leur permettant si nécessaire de s'adapter aux variations de la demande). La prochaine génération (la 4ème) offrira encore plus de souplesse et de sécurité avec beaucoup moins de déchets et des réserves de plusieurs milliers d'années. Naturellement se dire pro-nucléaire c'est faire face à des arguments maintes fois répétés…

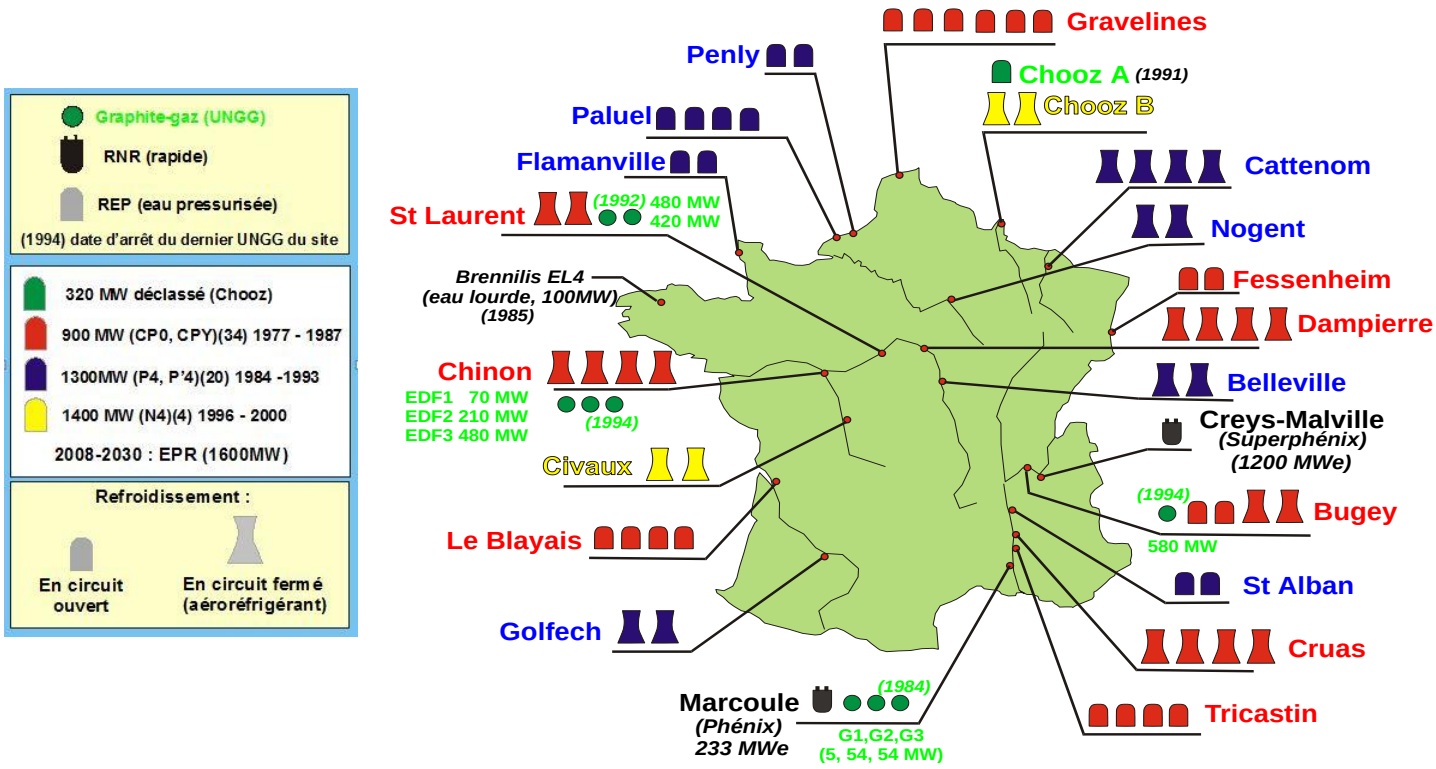
« le nucléaire c'est dangereux » (et de citer Tchernobyl, Fukushima…)

« le nucléaire pollue et les déchets radioactifs ? » « et pendant des millions d'années… » etc.

« et le démantèlement ? Combien ça va coûter ? »

Le but de ce petit document est de fournir des réponses exactes à ces détracteurs… Toutes les informations qui suivent sont rigoureusement exactes et vérifiables.

Avant de donner des réponses, quelques données techniques sur le nucléaire et plus particulièrement sur le type de réacteurs que nous utilisons en France : les réacteurs nucléaires à uranium enrichi et à eau pressurisée (REP ou selon le signe anglo-saxon PWR)



Le parc électro-nucléaire français

Sommaire

I – Les réacteurs à eau pressurisée **4**
II – Questions réponses **5**
1 – le nucléaire c'est dangereux… ***5***
- ***Three Miles Island***
- ***Et Tchernobyl ?***
- ***Et Fukushima ?***

Quels sont les risques d'un accident en France ? ***7***
- Le risque sismique
- L'absence de refroidissement
- Problèmes de matériaux
- ***Et les drones ?*** ***9***

2 – le nucléaire ça pollue ! ***9***
- ***Et les déchets nucléaires ?***
- ***Ils sont là pour des millions d'années…***
- ***De quoi sont composés ces déchets ?***

3 -Le nucléaire, une solution d'avenir ? ***12***
- ***L'EPR, échec ou succès ?***
- ***Les réacteurs de 4ème génération***

4 -Et le démantèlement ? ***13***
5 - Et la prolifération des armes nucléaires ? ***14***
6 -Alors quels sont réellement les avantages et les inconvénients du nucléaire ? ***14***

Bibliographie sommaire ***18***

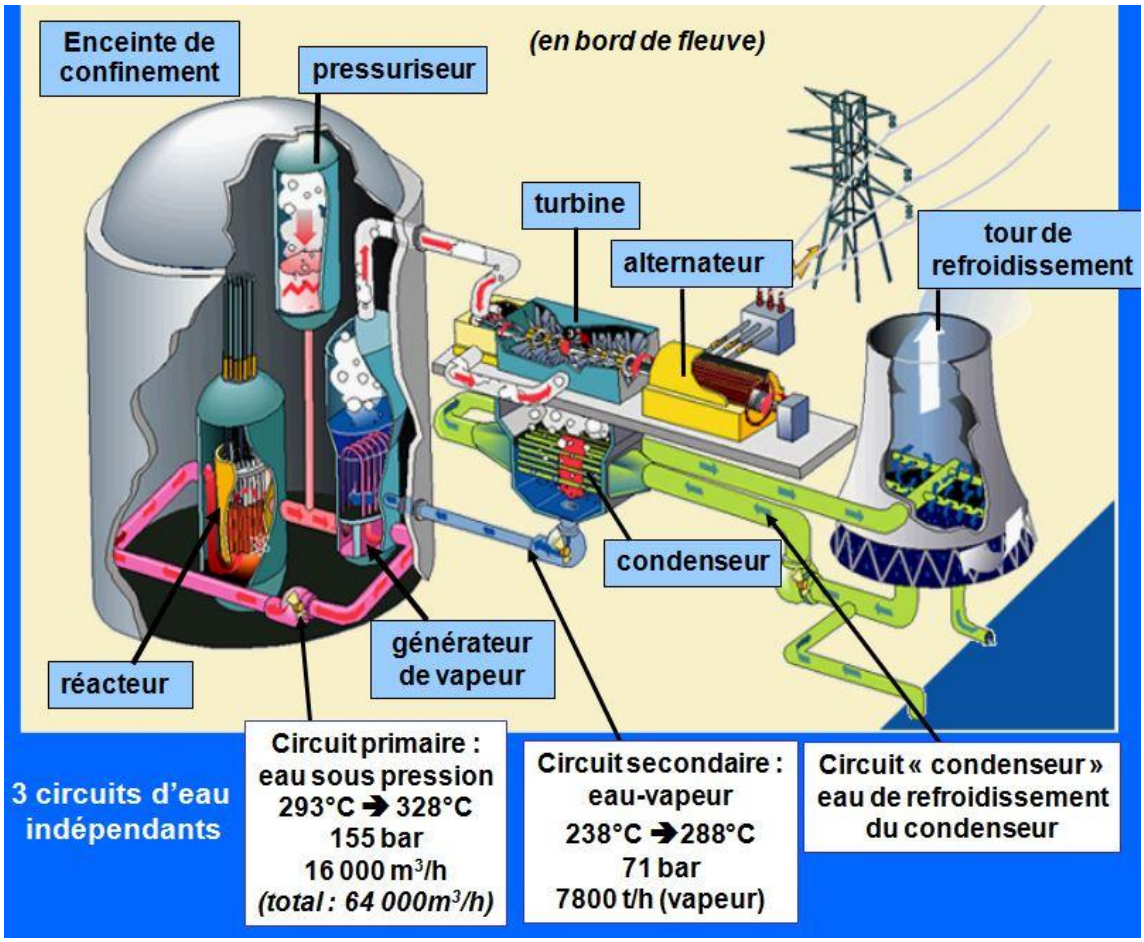
Complément : La sureté des centrales nucléaires en France **18**

I – Les réacteurs à eau pressurisée

Le nucléaire dans le monde c'était (fin 2013) 435 réacteurs en service et 72 en construction, sans compter les 160 dont la construction est programmée (et les centaines de chaudières nucléaires qui équipent des sous-marins et des navires de surface). Il fournit 13% de l'électricité dans le monde et devrait croître de 60% d'ici 2050

Environ les 2/3 des réacteurs en service sont du type « eau pressurisée » comme en France et 20% sont du type « à eau bouillante » comme les réacteurs de Fukushima.

Ce qui caractérise ce type de réacteur ce sont trois circuits d'eau indépendants



1 – le circuit d'eau primaire sous pression (155 fois la pression atmosphérique) circule dans le cœur et reste confiné à l'intérieur d'une double enceinte en béton pouvant résister à la chute d'un avion de ligne.

2 – le circuit secondaire transporte la chaleur dégagée dans le cœur sous la forme de vapeur haute pression vers en ensemble de turbines couplées à un alternateur. Ce circuit (qui sort du bâtiment réacteur) n'est pas en contact direct avec le cœur radioactif du réacteur.

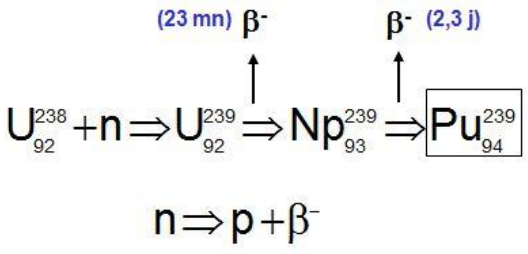
3 – la vapeur en sortie de turbine est refroidie par un 3ème circuit d'eau indépendant, refroidie par la tour de refroidissement (« aéro-réfrigérant ») d'où s'échappent des volutes de vapeur (en fait en nuage de gouttelettes d'eau) absolument pas radioactives ! On ne prélève dans la rivière que ce qui est nécessaire pour compenser les pertes par évaporation (les centrales au bord de mer sont refroidies directement par l'eau de mer).

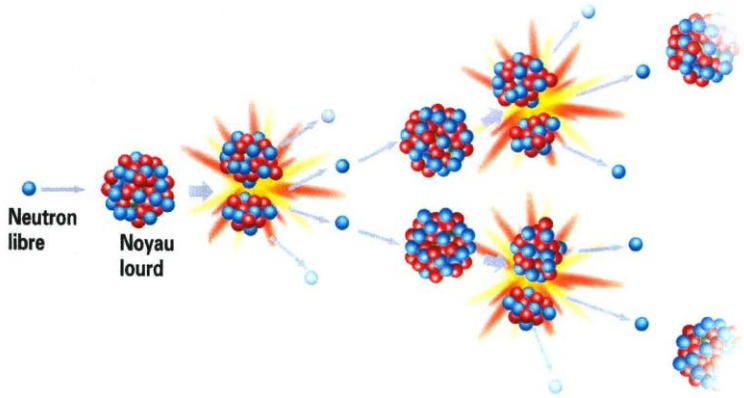
Le cœur du réacteur est alimenté en uranium enrichi à environ 4% :

<u>Remarque</u> : ***qu'appelle-t-on uranium enrichi*** ?

L'uranium naturel est constitué de 2 isotopes, à 99,3% d'uranium 238 (c'est-à-dire constitué de 92 protons et de 146 neutrons ; période 4,5 milliards d'années)(*) et à 0,7% d'uranium 235 (92 protons et 143 neutrons, période 700 millions d'années). Seul l'uranium 235 est fissile c'est-à-dire que bombardé des neutrons il se brise en 2 (fission) en émettant 2 à 3 neutrons (de haute énergie, en moyenne 2MeV et rapides, plus de 20.000 km/sec) qui vont assurer la réaction en chaîne.

(*) La période radioactive est la durée au bout de laquelle la moitié des atomes se sera désintégrée ; au bout de 10 périodes l'activité a été divisée par mille et par un million au bout de 20 périodes

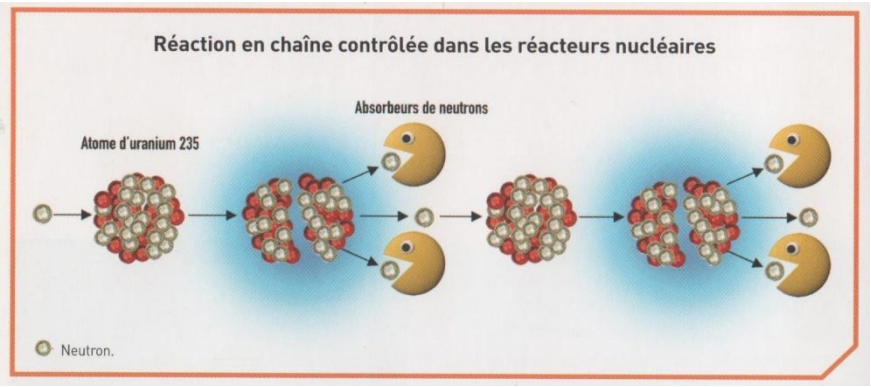




Réaction fertile (U238) *Fission (et réaction en chaîne)*

L'uranium 238 est difficilement fissile mais se transmute en plutonium 239 qui lui est fissile (période 24.000 ans). Pour des raisons d'efficacité on a donc intérêt à augmenter la teneur en U235 par enrichissement. Cette opération est effectuée à Pierrelatte, autrefois par diffusion gazeuse et maintenant par ultracentrifugeuses. La fission de l'U235 étant plus favorable avec des neutrons très lents (dits « thermiques » ~2 km/s) il faut les ralentir à l'aide d'un « modérateur » qui est ici l'eau du circuit primaire.

Si dans une arme nucléaire on recherche une réaction en chaîne explosive, dans un réacteur on contrôle le flux neutronique de façon à maintenir un niveau de fission constant. Ce contrôle se fait en partie à l'aide de barres de contrôles absorbeurs de neutrons (et qui servent aussi pour l'arrêt immédiat) et par des produits chimiques (absorbeurs de neutrons comme l'acide borique) introduits dans l'eau du circuit primaire.



Tous les 12 à 18 mois un tiers du combustible est remplacé, le combustible usé est alors stocké 2 ans dans la piscine attenante au réacteur avant d'être transporté à la Hague où il restera en piscine encore 3 ans avant d'être retraité. L'uranium et le plutonium sont récupérés pour fabriquer du nouveau combustible, le reste (4%) constitue les « déchets nucléaires de haute activité» qui sont stockés après vitrification à la Hague en attendant la réalisation d'un site de stockage profond.

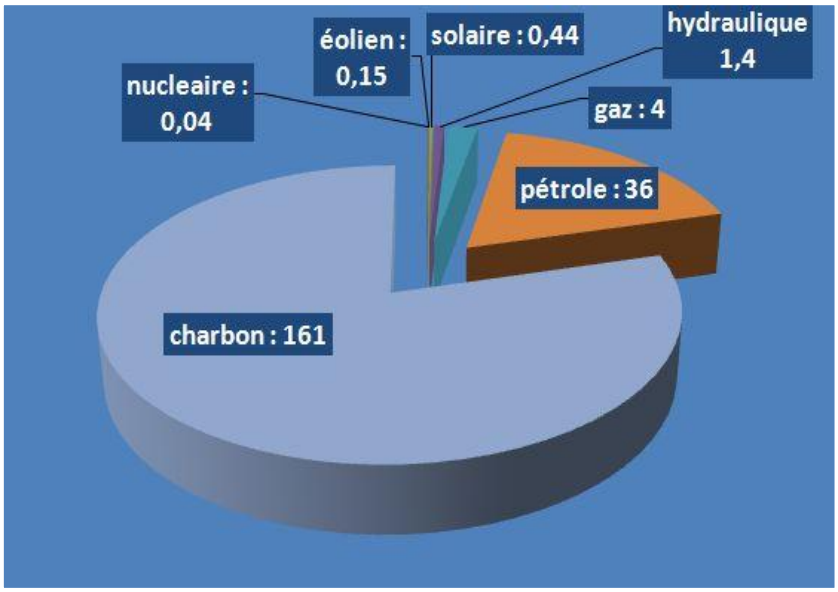
II – Questions réponses

1 – le nucléaire c'est dangereux…

OUI le nucléaire est dangereux, ça sera stupide de le nier mais contrairement à bien d'autres industries dangereuses il fait l'objet d'une telle surveillance et d'une telle recherche de sureté qu'il l'est beaucoup moins que d'autres sources de production d'énergie !

Une étude menée par le Wall Street Daily concernant le nombre de mort par TWh(**) produit place le nucléaire en dernier, 4 fois moins mortel que l'éolien et 10 fois moins que le solaire PV !

(**) 1 TWh (térawatt-heure)= 1 milliard de kWh ; la France produit chaque année environ 550 TWh



Et 4.000 fois moins que le charbon (mineurs non compris !)(environ 15.000 morts chaque année dans le monde) ce qui permet d'affirmer que si Fukushima n'a fait (et ne fera) aucune victime directe au Japon, l'arrêt (non justifié) des centrales nucléaires allemandes et leur remplacement par des centrales thermiques au charbon et au lignite fera en Europe des dizaines de milliers de morts par la pollution engendrée (émissions de milliers de tonnes d'acide sulfurique, d'acide nitrique, d'acide chlorhydrique, de poussières dont une partie radioactive… et d'oxyde de carbone.

Depuis 1950, et sur des centaines de réacteurs on peut déplorer 3 accidents graves :

- 1979 : Three Miles Island aux USA avec fusion du cœur d'un réacteur à eau pressurisée
- 1986 : Tchernobyl en Ukraine explosion d'un réacteur de type RBMK soviétique,
- 2011 : Fukushima (Japon) fusion de cœur dans des réacteurs à eau bouillante

Il est à noter que jamais dans les médias on ne parle de l'accident de Three Miles Island qui est pourtant le seul accident qui se soit produit dans un réacteur identique à ceux utilisés en France ! Normal, il n'y a eu aucune conséquence ! Pas très intéressant en effet ! Voyons un peu plus en détail ce qui c'est passé.

Three Miles Island

Une petite fuite dont la réparation a été remise au prochain arrêt de tranche, la défaillance d'une pompe, une vanne fermée mais indiquée comme ouverte, des indications de sécurité mal interprétés par le personnel… le temps de comprendre, trop tard ! fusion du cœur du réacteur… il n'y a eu aucune pollution radioactive

l'enceinte de confinement a parfaitement joué son rôle. Les seuls victimes à déplorer sont des accidentés de la route qui ont fuit par peur (après les déclarations irresponsables et catastrophiques de l'évêque d'Harrisburg). Cet accident a été très instructif concernant la formation des équipes et sur la manière dont sont formulées les informations sur le fonctionnement du réacteur.

Et Tchernobyl ?

L'accident de Tchernobyl, devenu le symbole même du « danger du nucléaire » s'est produit sur un réacteur de conception soviétique, dérivé de réacteurs militaires, réacteur à uranium enrichi, à eau bouillante et à modérateur graphite (filière RBMK). Ces réacteurs dépourvus d'enceinte de confinement ont la particularité d'être fortement instables à bas régime et donc ne doivent en aucun cas être utilisés dans ces conditions. L'accident est dû à des expériences menées par des ingénieurs électriciens extérieurs à la centrale (expériences refusées par tous les responsables de centrales sauf celui de Tchernobyl !) et qui nécessitaient justement une baisse anormale du régime de fonctionnement. Une fois que le réacteur se soit emballé il a été impossible de l'arrêter, la présence de graphite hautement inflammable a provoqué l'explosion et en l'absence d'une enceinte de confinement émission d'une très forte pollution radioactive dans l'atmosphère qui s'est répandue sur toute l'Europe(*). A ce sujet signalons que jamais les autorités françaises n'ont affirmé « que le nuage s'arrêterait à la frontière », c'est une pure invention de journaliste ! Il a simplement été dit (ce qui s'est avéré) que la pollution serait faible et sans danger.

(*) Notons que cette pollution radioactive a été bien inférieure à l'ensemble des émissions radioactives libérées lors des multiples essais nucléaires dans l'atmosphère, moins que celles provoquées par la super bombe soviétique de 57Mt (« tsar bomba » le 30 octobre 1961)

La trentaine de liquidateurs qui est immédiatement intervenu a été très fortement irradiée et n'a pas survécu. Les dizaines de milliers d'intervenants suivants ne sont restés que très peu de temps afin de ne pas dépasser les doses admissibles. On a observé par la suite un certain nombre de cancers de la thyroïde qui auraient pu être évités si on avait distribué des pastilles d'iode à la population (les populations au voisinage des centrales françaises disposent de telles pastilles). Les chiffres de plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers de morts qui ont été avancés par les écologistes sont totalement fantaisistes et résultent de calculs statistiques qui ne reposent sur aucune base scientifique sérieuse (ni d'ailleurs les veaux à 5 pattes et autres bizarreries nées des fantasmes anti-nucléaires). *En France le tabac tue 200 personnes par jour… soit 2 Tchernobyl par jour ! la voiture 4.000 morts par an et les maladies nosocomiales 12.000…comme quoi il est infiniment plus dangereux d'aller à l'hôpital que d'habiter près d'une centrale nucléaire.*

De plus un tel accident est totalement impossible en France.

Et Fukushima ?

.Le 3ème accident est dû à un tsunami supérieur à ce qui avait été prévu et par une disposition des systèmes de refroidissement non protégés. Il est à noter que les 14 réacteurs des 3 centrales impliquées se sont arrêtés normalement en dépit d'un séisme extrêmement violent (8,9) et que seuls les 4 plus anciens (>40 ans) ont eu des problèmes. Plus de refroidissement du cœur, fusion, dégagement d'hydrogène qui a provoqué l'explosion du bâtiment réacteur…Si comme les centrales françaises, les centrales japonaises avaient été équipées de dispositifs de neutralisation passive de l'hydrogène, on aurait pu éviter les explosions destructrices (amplifiées par l'absence d'enceinte de confinement en béton). Dans un autre réacteur c'est la piscine de stockage du combustible usé qui s'est retrouvée sans eau…

Les mesures prises pour évacuer les populations ont permis d'éviter la moindre victime. La forte pollution radioactive s'est évacuée dans la mer où elle a été diluée.

En comparaison la catastrophe de Bhopal (3 décembre 1984) a fait au moins 25.000 morts et des centaines de milliers de blessés… Alors que la nature autour de Tchernobyl a repris vie, la région de Bhopal est toujours polluée par des métaux lourds et cela ad vitam aeternam ! Entraînant malformations et maladies graves 30 ans après !

Quels sont les risques d'un accident en France ?

- Le risque sismique

Souvent évoqué, en particulier pour Fessenheim, ce risque existe mais a été pris en compte lors de la construction ; en avant projet on recherche quel a été le plus important séisme dans la région durant les 1.000 dernières années et après estimation de son importance sur l'échelle de Richter on ajoute 0,5 comme coefficient de sécurité.

Pour Fessenheim le plus fort séisme a eu lieu à Bâle en 1356 et a été estimé à 6,2 ; la centrale a donc été conçue pour résister à un séisme de 6,7.

- L'absence de refroidissement

C'est le principal accident grave pouvant survenir et pouvant conduire à la fusion du cœur. Quand on arrête brutalement un réacteur (en abaissant la totalité des barres de contrôle) on stoppe instantanément les réactions de fission mais il subsiste dans le combustible une certaine quantité d'énergie (8% de la puissance initiale, soit 100 MW environ) due à la radioactivité et aux neutrons retardés et qui mettra plusieurs semaines à disparaitre… Il est donc impératif de continuer à refroidir le cœur sous peine de provoquer l'ébullition de l'eau (avec production d'hydrogène) puis la fusion des éléments combustibles. Des dispositifs de neutralisation de cet hydrogène doivent empêcher l'explosion. Quant à l'enceinte de confinement (en dépression par rapport à l'extérieur) elle doit confiner toute la pollution radioactive qui pourrait en découler. Contrairement à Tchernobyl il ne peut pas y avoir explosion de la centrale.

En cas d'arrêt d'un réacteur, EDF dispose de nombreux moyens pour assurer quoi qu'il arrive le refroidissement du réacteur :

1 – chaque tranche produit sa propre énergie électrique (60MW) pouvant assurer son alimentation ou celle d'une tranche voisine,

2 – en cas d'arrêt de toutes les tranches, une ligne électrique extérieure peut alimenter la centrale,

3 - en cas de rupture de ligne, 3 groupes électrogènes indépendants peuvent individuellement assurer l'alimentation,

4 – en cas de non fonctionnement simultané des 3 groupes électrogènes, une TAC (turbine à combustible) est disponible,

5 – des batteries sont prévues dans le où cas où la TAC serait hors service,

6 – Enfin un Groupe d'Intervention Nucléaire d'urgence est disponible sur place en quelques heures.

- Problèmes de matériaux

Un réacteur nucléaire est une structure très complexe, constituée de matériaux multiples et soumise à des contraintes importantes dans un environnement particulièrement hostile. Des pannes ont et vont survenir,

des composants ont été et seront changés… rien de surprenant ni d'inquiétant. A chaque arrêt de tranche des contrôles sont effectués et tous les 10 ans a lieu la visite décennale où durant 4 mois la centrale est inspectée très soigneusement et reçoit de l'Autorité de Sureté Nucléaire une autorisation de 10 ans avec éventuellement des travaux à réaliser (ou au pire l'arrêt complet de la tranche si elle présente un danger).

Tous les composants peuvent être changés sauf la cuve… Réalisée en acier faiblement allié, elle est soumise à un flux de neutrons qui provoque un vieillissement accéléré, elle est donc particulièrement surveillée et fait l'objet d'études poussées. En France (comme aux USA) un programme de surveillance a été mis en place qui consiste à introduire à l'intérieur de la cuve des éprouvettes destinées à différents essais mécaniques (afin de vérifier son état de résistance mécanique en particulier au niveau de la résilience et l'évolution de sa température de transition ductile-fragile) et qui seront irradiées 3 fois plus vite que la cuve, permettant ainsi une anticipation sur l'évolution de ses caractéristiques. Différentes études menées à EDF et au CEA ont montré que les cuves françaises peuvent fonctionner sans risque pendant 60 ans (Cf. « complément »).

Et les drones ?

Il est clair qu'un drone ne peut en aucun cas provoquer un accident nucléaire avec fuite radioactive ! Les enceintes de confinement (double enceinte en béton de 1 m d'épaisseur) sont conçues pour résister à la chute d'un avion de ligne ! Donc aucun risque de fuite radioactive ! Le circuit « refroidissement » est lui aussi inaccessible. Par contre la partie « transformateur » est plus sensible, ce qui pourrait entraîner l'arrêt de production mais sans risque pour la centrale.

2 – le nucléaire ça pollue !

La radioactivité ! Un mot qui fait peur car ça ne se voit pas, ça ne se sent pas et ça peut faire des dégâts ! Sans vouloir minimiser le danger de la radioactivité il faut aussi la démystifier… Les rayonnements ionisants, la radioactivité nous entourent, nous baignons dedans depuis des millions d'années, nous en consommons tous les jours, nous sommes nous-mêmes radioactifs.

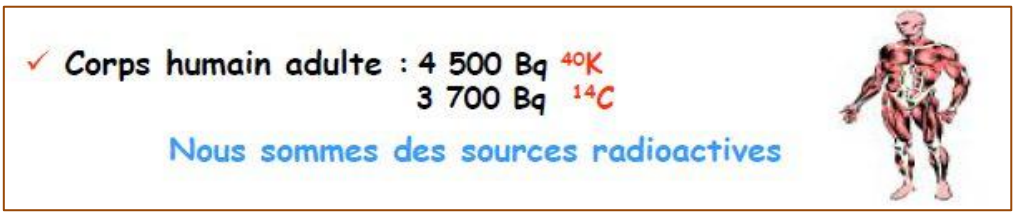
En effet tous les produits alimentaires que nous consommons possèdent des éléments radioactifs naturels (carbone14, potassium40) ainsi que nous-mêmes par conséquence :

Le Becquerel est une très petite unité

- ✓ Eau minérale : 2 à 4 Bq/L ^{40}K
  0,02 à 1,8 Bq/L ^{226}Ra
  0,01 à 0,9 Bq/L ^{238}U
- ✓ Eau de pluie : 0,5 Bq/L
- ✓ Eau de mer : 13 Bq/L ^{40}K + traces U, ^{3}H, ^{87}Rb
- ✓ Poisson : 100 Bq/kg ^{40}K
- ✓ Lait : 80 Bq/kg dont 62 % ^{40}K
- ✓ Pomme de terre : 150 Bq/kg ^{40}K
- ✓ Engrais phosphatés : 5 000 Bq/kg U, Th, ^{40}K
- ✓ Sédiments : 400 Bq/kg ^{40}K + 12 % U-Th
- ✓ Granite : 8 000 Bq/kg 600 à 2000 ^{238}U ; 600 ^{226}Ra
- ✓ Matériaux de construction :
  - ➢ Béton : 200 à 1 000 Bq/kg ^{40}K
  - ➢ Briques : 600 à 1 000 Bq/kg ^{40}K
  - ➢ Plâtre : 50 à 1 000 Bq/kg ^{226}Ra dominant du au phosphogypse

De mêmes que les matériaux de construction etc.

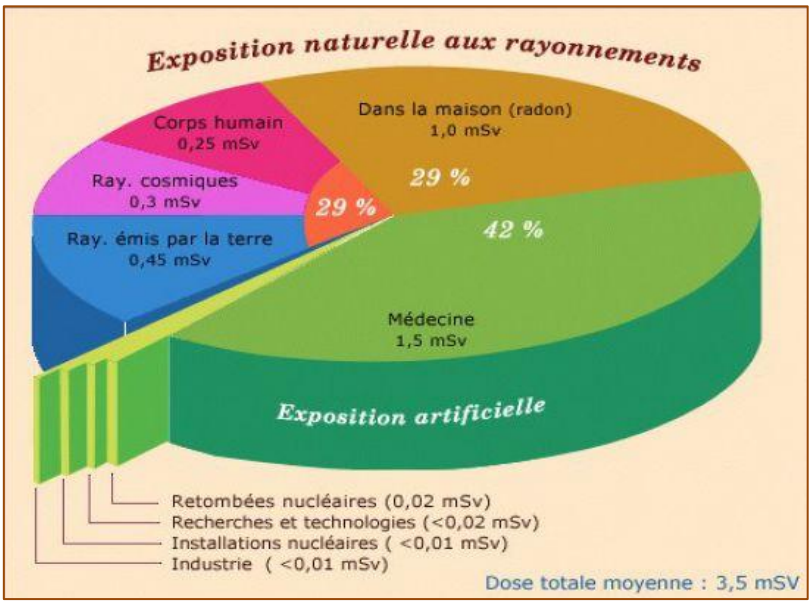
(Le Becquerel correspond à une désintégration par seconde, la radioactivité d'un être humain est comprise entre 8.000 et 12.000 Bq, ce qui veut dire que plusieurs milliers d'atomes se désintègrent par seconde !)



Coucher auprès de son conjoint augmente de 10% la dose reçue !

Cette unité correspondant à une simple intensité sans indication de dangerosité, pour évaluer de façon plus précise les risques sanitaires, on utilise une autre unité le Sievert (Sv) et ses sous multiples le µSv (un millionième de Sv) et le mSv (un millième de Sv). Le sievert tient compte à la fois de la nature du rayonnement, de son énergie et des dégâts dans l'organisme qu'il peut provoquer.

En France nous sommes soumis à une irradiation annuelle moyenne de 3,5 mSv, dose qui peut augmenter si on habite la Bretagne (+300%), le Massif Central, la montagne… une semaine de sport d'hiver et la dose augmente ! (+0,03mSv/semaine). L'irradiation due aux centrales nucléaires c'est moins de 0,01 mSv/an (un fumeur régulier absorbera jusqu'à 80 mSv par an !). Dans certaines régions de l'Inde ou de l'Iran la dose annuelle peut atteindre 800 mSv.



Précisons qu'une dose de 10 Sv reçu brutalement est considérée comme mortelle… Les effets néfastes ne se font réellement sentir qu'à partir de 1 Sv et en dessous de 200 mSv aucun effet observable.

Et les déchets nucléaires ?

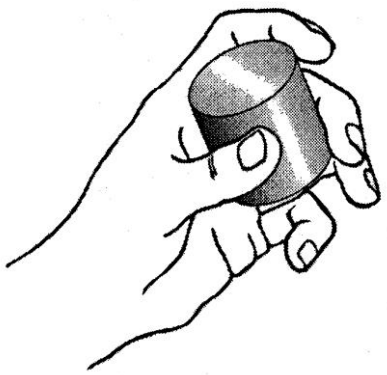
En France, chaque habitant produit en moyenne par an 500 kg d'ordures ménagères, 700 kg de déchets industriels, 100 kg de déchets industriels toxiques et 1 kg de déchets nucléaires…

Sur ce kg il y a 900g de déchets très faiblement radioactifs (TFA, qui pourraient pour la plupart être rejetés dans la nature stockés à Morvilliers et A stockés à Soulaines), 95 g de déchets faiblement ou moyennement radioactifs (B, stockés à Soulaines) et seulement 5 g de déchets hautement radioactifs issus du retraitement

du combustible (C). Le volume de ces déchets après vitrification représentera en 2020 un cube de 17m de côté… Parfaitement confinés ils ne présentent qu'un très faible volume et sont totalement maîtrisés.

Classification des déchets nucléaires :

1 – TFA (très faiblement actifs) - 10 à 100 Bq/g (11% du volume total)
2 – FMA VC (A)(faible et moyennement actif à vie courte) – 10^2 à 10^5 Bq/g (80% du volume total)
3 – FA VL et MA VL (B)(faiblement et moyennement actif, vie longue) -10^5 à 10^8 Bq/g (9% du volume)
4 – HA (C)(haute activité) - >10^8 Bq/g (0,1% du volume)



Ce petit cylindre représente la quantité de déchets nucléaires vitrifiés de haute activité (C) générée ***pendant 30 ans*** pour fournir l'énergie électrique à une famille de 4 personnes équipée « tout électrique » (chauffage inclus)
(Bruno Comby – Le nucléaire avenir de l'écologie ?)

Ils sont là pour des millions d'années…

Et non ! Encore une idée reçue fausse … due à une confusion entre période radioactive et activité. Plus la période radioactive est longue (rappelons qu'il s'agit de la période pendant laquelle la moitié des atomes radioactifs auront disparu) et moins le radioélément sera actif donc dangereux (on peut manipuler sans aucun risque du combustible nucléaire neuf, l'uranium étant faiblement radioactif en raison de sa très longue période radioactive, 4,5 milliards d'années). Ce qui compte c'est la durée au bout de laquelle les déchets auront retrouvé la radioactivité naturelle et donc devenue totalement inoffensifs… Actuellement nos déchets ont une durée de vie de 10.000 ans. C'est long mais maîtrisable d'autant plus que la radioactivité décroît régulièrement (contrairement aux déchets toxiques qui eux sont éternels).

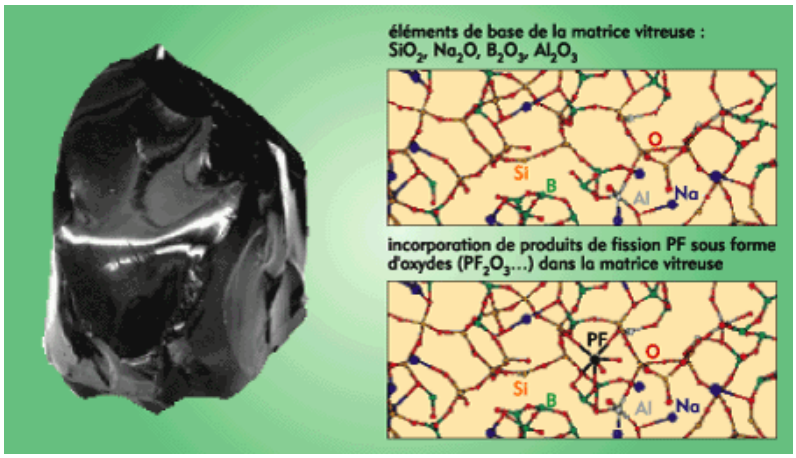
De quoi sont composés ces déchets ?

La combustible neuf est constitué de 96% d'U238 et 4% d'U235. Lorsqu'il est retiré du réacteur il est composé de 94% d'U238, 1% d'U235 et de 1% de plutonium (Pu). Ce dernier est produit dans le réacteur à partir de l'U238, il est en partie consommé (il fournit 30% de l'énergie totale produite) et il en subsiste encore 1% au moment du changement.

Les 4% restant sont constitués pour 3,9% de produits de fission et de 0,1% d'actinides mineurs (c'est-à-dire d'éléments plus lourds que l'uranium tels que le curium et l'américium).

La France comme d'autres pays a choisi de retraiter le combustible c'est-à-dire de récupérer les produits fissiles comme l'U235 et le plutonium pour en faire du nouveau combustible (le MOX est un combustible mixte U238-Pu239 qui équipe une partie de nos réacteurs). Dans d'autres pays le combustible usé est considéré comme un déchet et n'est pas revalorisé.

Les déchets sont hautement radioactifs et confinés dans une matrice de verre et mis dans un container en acier. Ils sont stockés à la Hague en attendant un stockage ultérieur en site géologique profond.



Verre de confinement de déchets radioactifs

Containeur en acier

En ce qui concerne les produits de fission, 73% sont stables ou ont une période très courte, inférieure à 10 ans, 10% ont une période supérieure à 100 milliards d'années et donc sont quasiment stables et totalement inoffensifs et seulement 7% ont une période comprise entre 10 et 100 ans. Ce sont les plus dangereux (mais peu abondant en fait).

Les actinides mineurs sont en très faibles teneurs (0,1%) mais ont des périodes assez longues de plusieurs milliers d'années.

La durée de vie réelle des déchets correspond au moment où leur radioactivité sera revenue à la valeur naturelle du sol… donc inoffensive… En France grâce au retraitement elle est de 10.000 ans et dans l'avenir réduite à 300 ans avec les réacteurs de 4ème génération. Sans retraitement elle est de 300.000 ans à cause de la présence du plutonium (période 24.000 ans).

3 -Le nucléaire, une solution d'avenir ?

Les réacteurs actuellement en service sont qualifiés de « deuxième génération ». La plupart des réacteurs en construction appartiennent à la troisième génération dont l'EPR fait parti.

- *L'EPR, échec ou succès ?*

L'EPR est le fruit d'une collaboration entre AREVA, EDF et Siemens. Il n'y a pas de saut technologique mais un retour d'expérience des réacteurs français et allemands. Sa sureté a été augmentée par la redondance de nombreux équipements et la présence d'un réceptacle en céramique destiné à recevoir un cœur en fusion (« corium »). Sa durée de vie a été augmentée (80 ans), son rendement a été augmenté d'où une plus faible consommation de combustible et moins de déchets par kWh produit. Toutes ses améliorations ont un coût évidemment

L'EPR fait l'objet de nombreuses critiques en particulier pour celui qui est construit en Finlande et celui de Flamanville. Un coût excessif et des retards de construction considérables !

Notons que les EPR Chinois mis en chantier plus tard seront opérationnels avant. En fait il faudra un peu plus de 10 ans pour achever ce réacteur ce qui est dans les normes (pour le parc français la durée moyenne a été de 10 ans et même 13 ans pour les dernières tranches). On se demande pour quelles raisons on avait

prévu la construction en 4 ans et demi seulement ! Outre les « améliorations » (souvent inutiles) exigées par la sécurité nucléaire après Fukushima, Areva n'avait plus construit de réacteur depuis 15 ans et une certaine expérience (en particulier au niveau des bétons) a été perdue. De plus ce réacteur est autrement plus complexe que les tranches précédentes.

Le coût final a été revu régulièrement à la hausse et avoisine environ 8,5 milliards d'euros, somme considérable certes mais il faut prendre en compte la puissance du réacteur (1650 MW) sa disponibilité supérieure à 90% et sa durée de vie entre 70 et 80 ans. Il produira chaque année environ 13 TWh soit plus de 2% de la production totale française, autant que toutes les éoliennes réunies !

Pour produire la même quantité d'électricité par des panneaux photovoltaïques l'investissement serait de 30 milliards d'euros et avec une durée de vie de 15 à 20 ans maximum… Avec des éoliennes terrestres c'est 15 milliards et pour des éoliennes off-shore 20 milliards (avec là aussi une durée de vie inférieure à 20 ans).

Il faudrait aussi tenir compte de la surface nécessaire, des quantités de matériaux utilisés et de la disponibilité de production.

L'EPR reste donc une option à la fois indispensable pour faire la jonction entre les réacteurs actuels dont la durée de vie sera portée à 60 ans et les réacteurs de 4ème génération qui ne pourront intervenir qu'à partir de 2040.

- *Les réacteurs de 4ème génération*

Six modèles de réacteurs de nouvelle technologie ont été déterminés par une concertation internationale, la France ayant opté pour les réacteurs rapides au sodium (dont un prototype, Astrid, devrait être construit à Cadarache) et les réacteurs rapides à gaz, dont un prototype, Allégro, devrait être construit en collaboration avec la Pologne. D'autres pays travaillent principalement sur des réacteurs à haute température (destinés principalement à la production économique d'hydrogène et au dessalement de l'eau de mer) des réacteurs à sels fondus (permettant en particulier d'utiliser le thorium, 3 à 5 fois plus abondant que l'uranium) des réacteurs rapides au plomb…

Quels seront les avantages des ces réacteurs ?

- Plus grande souplesse d'utilisation
- Rendement supérieur à 50% (contre 30 à 35% pour les réacteurs actuels)
- Donc plus faible consommation et beaucoup moins de déchets
- Utilisation des stockes de plutonium et d'uranium appauvri (les stockes dont nous disposons en France représentent plusieurs milliers d'années de consommation !)
- Destruction in situ des actinides et de certains produits de fission (« incinération » des déchets par les neutrons rapides)(*) d'où une réduction de la durée de vie des déchets, 300 ans seulement.

(*) Ainsi par exemple, dans ce type de réacteur, bombardé par des neutrons rapides, le Tc^{99} (technétium, un des produits de fission majoritaires) dont la période est de 210.000 ans se transforme en Tc^{100} de 15,8 secondes de période pour aboutir à un isotope stable du ruthénium.

4 -Et le démantèlement ?

Le démantèlement des installations nucléaires (« déconstruction ») est une opération parfaitement maîtrisée et pratiquée couramment. Certes, ça sera une opération longue, plusieurs dizaines d'années mais ne posera aucun problème.

Le coût du démantèlement est estimé par EDF entre 220 et 300 millions d'euros par réacteur (comparable aux estimations US), soit environ 40 milliards d'euros pour l'ensemble du parc actuel. Sur ce coût 20% sont dus au stockage des déchets. Une fraction de la facture d'électricité (5%) est provisionnée pour financer le démantèlement. Fin 2005 EDF disposait déjà de 13 milliards d'euros pour le démantèlement et 17 milliards pour le stockage des déchets.

Par contre le démantèlement des éoliennes (entre 300 et 900.000 euros par machine selon les devis) n'est absolument pas provisionné et sera vraisemblablement à la charge du propriétaire du terrain ou de la commune, à moins que comme aux USA on ne les laisse pourrir sur place. On ne sait pas non plus comment on va pouvoir recycler des dizaines de millions de panneaux photovoltaïques riches en métaux lourds…

5 - Et la prolifération des armes nucléaires ?

La question ne se pose pas en France (qui à l'époque, a développé pour son programme militaire des réacteurs spécialisés au CEA Marcoule) mais le risque que certains pays se servent du plutonium produit par des centrales électronucléaires pour fabriquer des armes nucléaires est souvent évoqué. Ce n'est pas possible à partir du Pu produit par une centrale classique de faire une bombe ! Pour cela il faut du Pu de qualité militaire, c'est-à-dire constitué uniquement de l'isotope 239 (et donc produit par des réacteurs spécialisés comme ceux de Marcoule), or le Pu produit dans les réacteurs électronucléaires est pollué par d'autres isotopes (240, 241…) qui le rend trop instable pour une arme (mais pas pour du combustible).

Proportion des isotopes du Pu dans le combustible usé	**Pu^{238} : 2%** **Pu^{239} : 53%** **Pu^{240} : 24%** **Pu^{241} : 15%** **Pu^{242} : 6%**

6 -Alors quels sont réellement les avantages et les inconvénients du nucléaire ?

Les avantages sont évidents :

- Production importante et continue (et donc maîtrisable)
- Indépendance énergétique (même si l'uranium n'est plus produit en France, son approvisionnement est garanti et ne représente qu'une faible partie du coût de l'électrique (12 à 15%)
- Unité de production de forte puissance (par kWh, faible surface au sol nécessaire et quantité de matériaux réduite)
- Coût de production le plus faible (avec l'énergie hydraulique)
- Production très peu polluante :
    - *Quantité de déchets radioactifs faible et parfaitement maîtrisée*
    - *Pas d'émission de gaz à effet de serre*

Le tableau suivant indique les quantités de CO2 émisses par kWh produit selon le mode de production électrique. La dernière colonne indique les chiffres utilisés par EDF pour calculer le total de ses émissions annuelles en CO2.

- Pour le charbon la valeur basse correspond aux centrales européennes récente, la valeur haute aux centrales anciennes telles que celles encore utilisées dans certains pays comme la Chine.
- Pour le gaz (en cycle combiné) la valeur haute tient compte des fuites possibles au niveau des gazoducs.
- Pour les éoliennes et le solaire PV, les valeurs dépendent du lieu de fabrication. Etant donné que les éoliennes proviennent essentiellement d'Allemagne, du Danemark et de la Chine, pays très pollueurs, les valeurs hautes sont à retenir. *On ne tient pas compte des émissions liées aux les centrales thermiques d'appoint indispensables pour compenser leur variabilité de production* !
- Pour le nucléaire ça sera selon l'enrichissement… Pour la France la valeur basse est à retenir pour la qualité de son électricité. Le passage récemment de l'enrichissement par diffusion gazeuse à l'enrichissement par centrifugeuses a permis de diviser par 10 la quantité d'électricité nécessaire !

Mode de production	Teneur basse	Teneur haute	Valeurs EDF(4)
Charbon	860	1300	960
Fioul			800
Gaz (CCG)(5)	480	780	360
Solaire PV(1)	30	280	0
Eolien(1)	11	75	0
Nucléaire(2)	8	59	0
hydraulique(3)	4	18	0

(1) Selon le pays où sont fabriqués les PV et les éoliennes
(2) Selon la mode de production électrique nécessaire à l'enrichissement
(3) Lié au méthane dégagé éventuellement par la mise en eau du barrage
(4) Valeurs retenues par EDF pour le calcul de ses émissions de CO2
(5) CCG : cycle combiné au gaz

Tableau I - Emission de CO_2 selon le mode de production électrique (en g/kWh)

Le tableau suivant donne la proportion d'électricité « propre » selon les pays. Les pays les plus propres sont ceux qui font appel essentiellement à l'hydraulique et au nucléaire. La France émet 54 g/kWh alors que l'Allemagne en produit 500 !

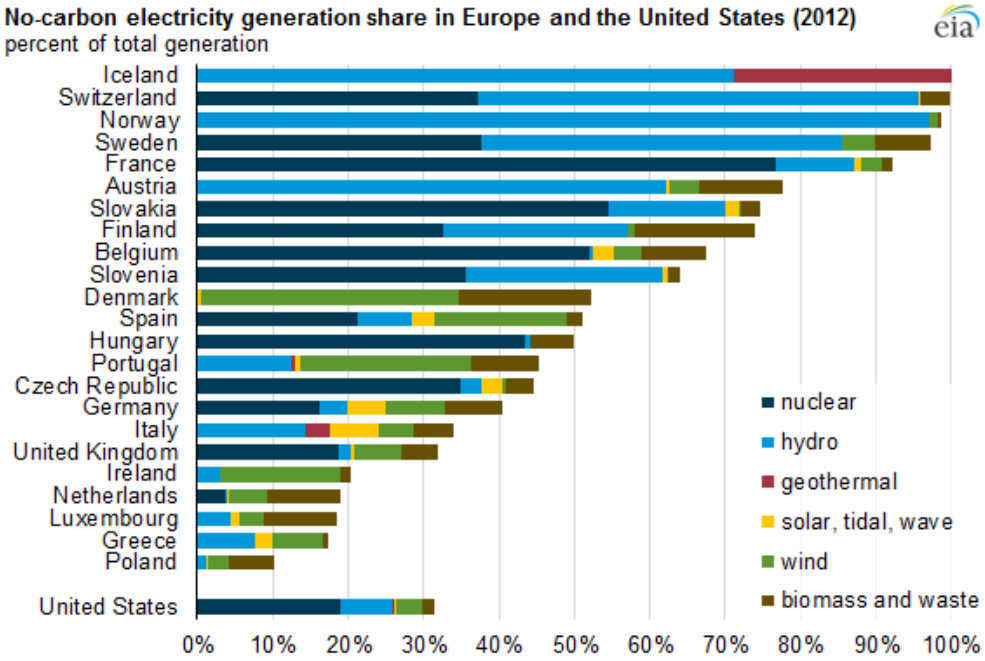


Tableau II – Proportion de production d'électricité « non carbonée » en Europe

Les inconvénients dans l'esprit des gens c'est d'abord le risque… risque amplifié par un matraquage médiatique et un manque d'information. Le risque d'un accident grave en France est quasiment inexistant et sans conséquence environnementale prévisible. L'accident de Fukushima a de plus imposé des nouvelles règles de sécurité, bien souvent superflues mais qui ont pour but de renforcer le sentiment de sécurité.

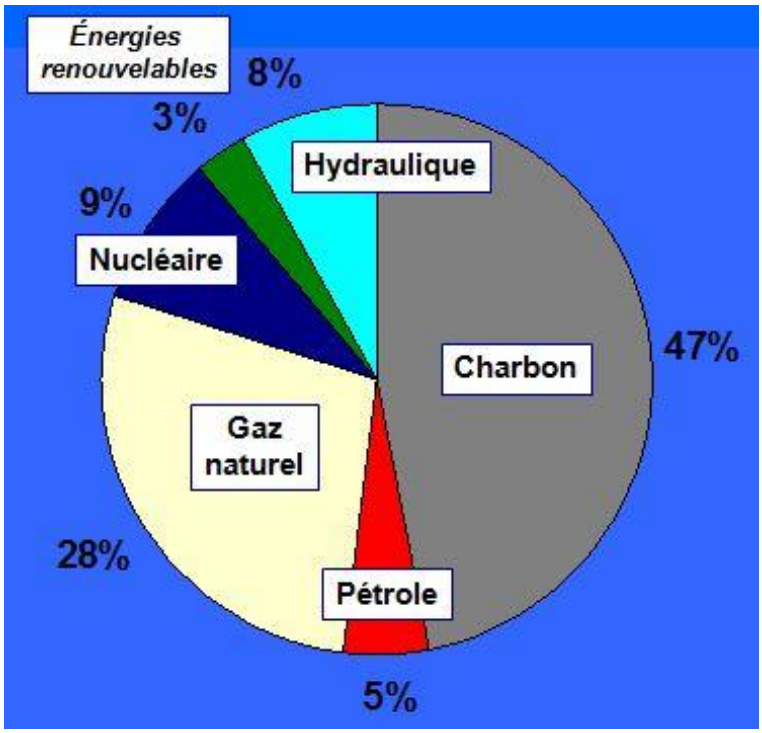
En aucun cas des accidents comme Tchernobyl ou Fukushima ne sont pas envisageables…

L'autre problème évoqué c'est celui des déchets radioactifs. On a vu qu'ils étaient en très faibles quantités et parfaitement maîtrisés, ce n'en est pas vraiment un problème !

Naturellement il est indispensable de maintenir un effort continuel sur la qualité de l'entretien et de la surveillance des réacteurs, ainsi que de la compétence des équipes chargées de la maintenance. En France, la gestion du parc électronucléaire dépend uniquement d'EDF (mais la maintenance est souvent confiée à des entreprises prestataires) et la sécurité est du ressort de l'Institut de Sureté Nucléaire, organisme indépendant d'EDF.

Le principal obstacle à son développement massif réside dans le coût d'investissement important (plusieurs milliards d'euros) mais qui sera amorti par un coût de production faible et une durée de vie importante.

Dans les 40 prochaines années le nucléaire continuera à se développer dans le monde (l'Europe sera très probablement par nécessité obligée de renoncer à son « renoncement » !) mais soyons réaliste, il restera malgré tout pendant encore longtemps une source secondaire de production par rapport au charbon, énergie « d'avenir » (!), et le gaz (mais très largement plus importante que les énergies renouvelables autre que l'hydraulique).

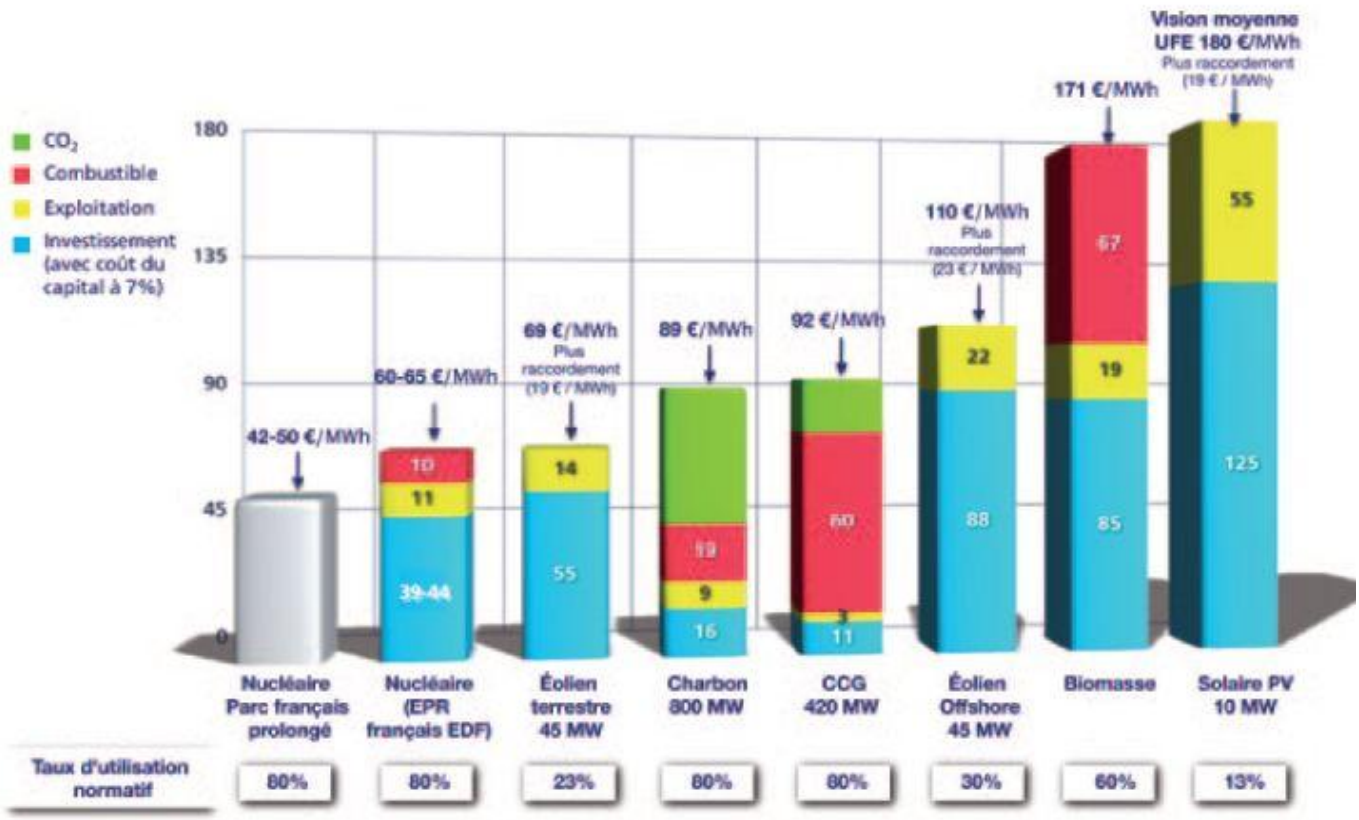


Prévision des différentes sources de production électrique dans le monde en 2050

Par rapport à 2010, la production d'électricité mondiale aura été augmentée par 2,6.
Les énergies fossiles resteront fortement majoritaires (80%), les énergies renouvelables représenteront 11% dont 8% d'hydraulique.
Quant au nucléaire (9%) sa part en pourcentage aura légèrement diminuée mais en augmentation en valeur absolue (+50%).

Il n'en est pas moins évident qu'il sera de plus en plus une source d'énergie incontournable et prépondérante vers la fin du siècle.

On ne peut que regretter le manque d'information au niveau du public et le champ libre laissé dans les médias aux anti-nucléaires !



Coût de production réel des différentes filières de production (ne tient pas compte des tarifs de rachat)

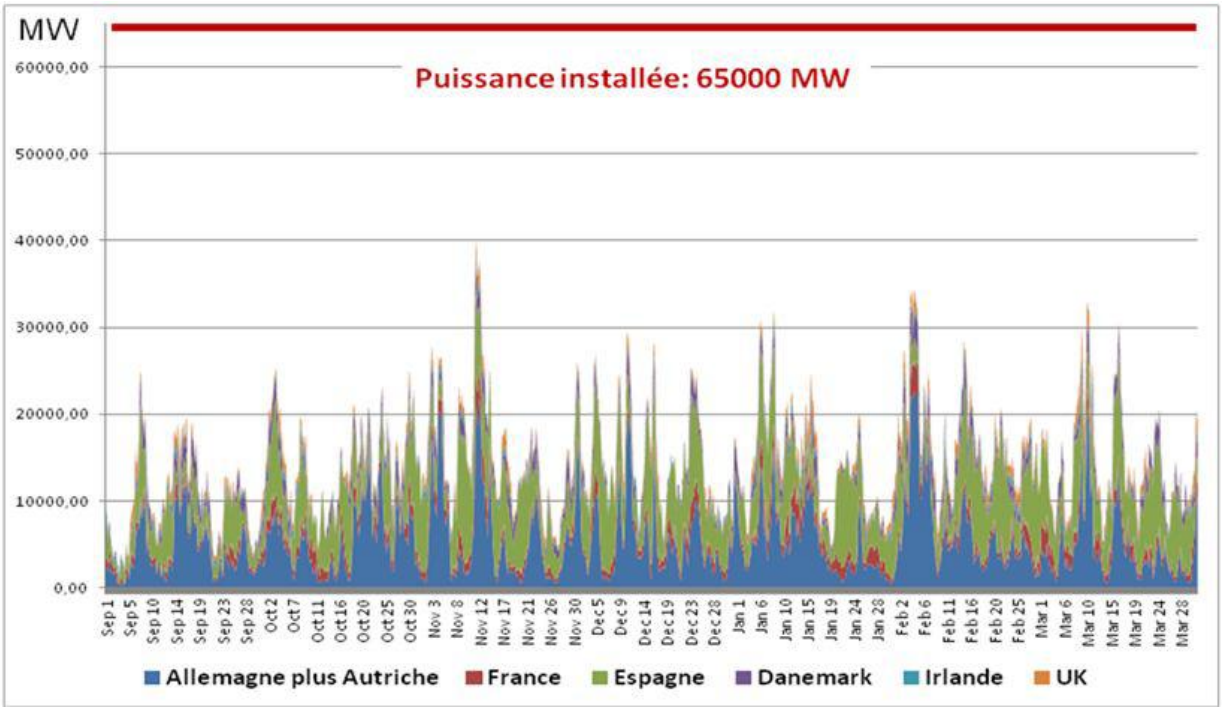
Le calcul a été établi sur la base de :
Taxe carbone : 50$/tonne
Prix du gaz : 34 €/MWh
Prix du charbon : 100 $/tonne
Pétrole : 150 $/baril

Et pour conclure un peu de science fiction…

La loi de transition énergétique prévoie de réduire de 75 à 50% la part du nucléaire (fermer environ 20 GW)
Elle prévoie aussi une réduction de la production thermique (déjà on ferme des centrales au gaz non rentables et des centrales au charbon car polluantes…)
Dans ces conditions, peut-on tout remplacer par des éoliennes ?

<u>Soyons logique et poussons le raisonnement jusqu'au bout.</u>
1 – Il s'agit de trouver 150 TWh résultants de la fermeture d'un tiers des réacteurs nucléaires
2 – Peut-on les produire avec uniquement des éoliennes et en assurant une production maîtrisée et garantie (sachant que l'on ne peut stocker l'énergie électrique sauf de façon très limitée) ?

La puissance de production de l'ensemble des parcs éoliens évolue entre 5% (puissance garantie) et 60% (puissance maximale très ponctuelle) avec une moyenne annuelle de 22% en France. Compte tenu du régime des vents en Europe on observe une unification de la production éolienne, inutile d'espérer une compensation quelconque en cas d'absence de vent !



Courbe de production éolienne européenne entre septembre 2010 et mars 2011

En théorie, compte tenu d'un facteur de charge de 22%, pour produire 150 TWh il faut disposer de 80 GW d'éolienne soit environ 26.000 éoliennes de 3 MW. Mais compte tenu que cette production est fortement aléatoire et qu'on ne peut pas stocker l'énergie électrique la production réelle fluctuera de manière incontrôlée entre 3 et 480 TWh !
Si on veut avoir une production de 150 TWh assurée (et sans l'apport de centrales thermiques), il faudrait donc une puissance éolienne de 240 GW soit 80.000 éoliennes de 3 MW ! (qui donneront des pointes de production de 1.200 TWh qu'il faudra soit délester soit évacuer on ne sait où !) Quant à l'investissement !!!(*)

(*) sans compter la forte pollution radioactive (non gérée) liée à la production des terres rares indispensables (400 à 700kg par éolienne)

Il est donc totalement impossible de remplacer ces 150 TWh en totalité par des énergies renouvelables, il faudra donc comme l'Allemagne faire appel à du thermique classique au charbon.

Comparatif : ***pour produire 1 TWh d'énergie électrique :***

	Thermique à flamme	**Thermique nucléaire**
combustible	460.000 tonnes de charbon	10 tonnes d'uranium
SO_2 (⇨H_2SO_4)(1)	3.000 tonnes	0
NO_2 (⇨HNO_3)(2)	3.000 tonnes	0
HCl(3)	230 tonnes	0
poussières	35.000 tonnes	0
métaux lourds	45 kg	0
CO2	1 million de tonnes	0
déchets radioactifs	2 kg (non gérés)	120 kg (gérés)

(1) acide sulfurique
(2) acide nitrique
(3) acide chlorhydrique

Bibliographie sommaire

Cours sur l'énergie, la production électrique et l'environnement :

- http://micro.icaunais.free.fr/energie_2013a.pdf (généralité sur l'énergie)
- http://micro.icaunais.free.fr/energie_2013b.pdf (énergies renouvelables et thermique à flamme)
- http://micro.icaunais.free.fr/energie_2013c.pdf (thermique nucléaire)

Site de l'AEPN (Association des Ecologistes Pour le Nucléaire)

www.ecolo.org ***une base importante de documents sur le nucléaire…***

Sur la radioactivité naturelle…

http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/RadioPDF/confNourreddineSFP.pdf

Complément : La sureté des centrales nucléaires en France

Un réacteur nucléaire comporte une multitude de matériaux divers, métalliques, céramiques, bétons… qui sont soumis dans les conditions d'utilisation normales à des épreuves importantes : contraintes mécaniques, contraintes thermiques, corrosion, irradiation etc.

La sureté du réacteur passe d'abord par l'étude des matériaux utilisés (pour des raisons pratiques il n'a pas été fait le choix de matériaux « hightech » peut être plus performants mais moins bien connus, le choix s'est porté sur des matériaux éprouvés).

1 – Etudes des matériaux

L'étude porte essentiellement sur le comportement des matériaux utilisés dans les conditions d'utilisation normales ; ça se fait par des tests mécaniques, de corrosion… afin de déterminer les risques potentiels à long terme. De nouveaux matériaux sont également étudiés afin d'améliorer les performances et la sécurité : par exemple l'alliage utilisé initialement pour fabriquer les tubes des générateurs de vapeur s'est révélé à l'usage sensible à la corrosion sous contrainte et a été remplacé par un alliage plus résistant. De même l'alliage de zirconium utilisé initialement pour les gaines de combustible a été remplacé par un nouvel alliage moins sensible à la corrosion (M5).

Ces études de matériaux sont effectuées par EDF au centre des Renardières et à Chinon pour les matériaux irradiés, par le CEA, à Saclay, Cadarache… et accessoirement par AREVA.

L'acier de cuve étant sensible à la fragilisation sous irradiation, d'importantes études sont menées pour déterminer les causes précises de cette fragilisation (en particulier par simulation numérique) et un programme de surveillance consistant à introduire dans la cuve des éprouvettes d'essais mécaniques qui seront irradiés 3 fois plus vite a été mis en place dans tous les réacteurs.

A chaque arrêt de tranche des vérifications sont effectuées sur certains composants et tous les 10 ans une expertise complète (4 mois) est effectuée afin de donner ou pas une autorisation de fonctionnement de 10 ans.

Seul l'Autorité de Sureté Nucléaire (organisme indépendant d'EDF) est habilitée à donner cette autorisation.

Pour plus d'informations :
http://micro.icaunais.free.fr/mat_nucleair_2013.pdf

2 – Codes de calculs

Des codes de calculs permettant de simuler le comportement en situation critique ont été élaborés pour les composants essentiels du réacteur. Cela permet de définir avec précision les paramètres physiques de bon fonctionnement et d'étudier les conséquences d'un accident. Le CEA a également construit un réacteur destiné à l'étude de la fusion de cœur et la formation du corium (magma constitués de matériaux et de combustible).

http://micro.icaunais.free.fr/simulation_mat.pdf

3 - Formation

L'accident de Three Miles Island a mis en évidence l'importance des messages d'alertes et du comportement du personnel. Un effort a été fait pour rendre les messages clairs et sans ambiguïté et chaque centrale dispose un simulateur de conduite où l'équipe de pilotage se trouve confronté à tous les cas possibles d'incidents et apprend ainsi à réagir immédiatement.