

Energie

Perspectives et ordres de grandeur

Episode 5 : L'énergie nucléaire



Ce document a été écrit pour répondre à plusieurs préoccupations. Il s'agit de disposer d'une compilation d'informations sur un sujet qui est à la fois très technique mais qui en même temps touche tout le monde, dans son quotidien mais aussi dans les conséquences que la quête permanente d'énergie entraîne pour l'ensemble des pays de la planète. Il se veut donc à la fois vulgarisateur et s'attachera particulièrement à rappeler à tout moment les ordres de grandeurs dont nous parlons ici.

Compte tenu de la richesse du sujet, il est apparu pertinent de le découper en plusieurs épisodes:

- ✓ *Episode 1 : Notions de base*
- ✓ *Episode 2 : Les sources d'énergie*
- ✓ *Episode 3 : Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur l'électricité*
- ✓ *Episode 4 : La dimension Geo-politique de l'énergie*
- ✓ *Episode 5 : **Le nucléaire, histoire et perspectives.***

Table des Matières

Glossaire	2
1. Un peu de physique (et d'étymologie)	4
2. La production d'énergie par fission	5
2.1. Réacteurs classiques	5
2.2. Le cycle du « combustible »	7
2.3. Surgénération	8
2.4. Réacteurs de 4ème génération	8
2.5. SMR	11
3. La Fusion Nucléaire	12
Conclusion	13

Glossaire

SIGLE ou concept	Signification
ARENH	Accès Régulé à l'Electricité Nucléaire Historique
ASN	Autorité de Sureté Nucléaire française. Elle est garante de la sureté de fonctionnement des installations nucléaires, dont les centrales de production d'électricité. Elle donne les autorisation d'exploitation.
Backup	Solution Pilotable de production d'électricité pour pallier l'intermittence des ENRi
Effacement	Se dit quand une nouvelle source d'énergie permet, lors de sa mise en route, d'arrêter une source existante. Par exemple, le vent a permis à une ferme de 250 éoliennes d' « effacer » une centrale à charbon
ENRi	Energie Nouvelle Renouvelable intermittente
Facteur de charge	Pourcentage du temps pendant lequel un moyen de production fonctionne à sa puissance nominale. (Ex : Eolien terrestre = 22,6% en 2021)
Fission nucléaire	Consiste à « casser » un noyau lourd en récupérant au passage de l'énergie. Utilisé dans 100% des centrales nucléaires actuelles
Fusion Nucléaire	Consiste à fusionner des noyaux légers et récupérer entre plus d'énergie au passage. Objet de très grosses recherches (ITER) et d'espairs pour la production d'énergie du futur. (XXIe siècle au plus tôt)
Isotope	Variation du nombre de neutrons (donc de masse) dans un atome de même numéro atomique. Par exemple carbone 12 et carbone 14
KW, MW, GW, TW	Unité de Puissance . 1 KW = 1000 Watts, 1 GW= 1000 MW, 1TW= 1000 GW

SIGLE ou concept	Signification
KWh	Unité d' Énergie . Ce que consomme un appareil de 1 KW pendant 1 heure On utilise aussi MWh, GWh, TWh
Matériau supra conducteur	Matériau conduisant l'électricité sans y opposer aucune résistance. A ce jour cela ne fonctionne qu'à des températures très basses (proches du zéro absolu, -273°C). Mais des matériaux supra-conducteurs à température ambiante pourraient changer notre vision de la production et de la distribution de l'électricité.
NOME	La loi du 7 décembre 2010 relative à la « Nouvelle organisation du marché de l'électricité », dite loi Nome, prévoit la réorganisation et la régulation de ce marché sur la base d'un encouragement de la concurrence.
PAC Sens 1	Pile à Combustible. Permet de transformer directement de l'hydrogène combiné à l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité et rejeter de l'eau.
PAC Sens 2	Pompe à Chaleur. Permet de transférer de la chaleur d'un milieu à un autre (par exemple, un frigo ou une climatisation). Utilisé pour chauffer, la PAC affiche une efficacité thermique supérieure à sa consommation électrique. En quelque sorte, elle rafraîchit l'extérieur pour chauffer l'intérieur.
V2G	Vehicule-to-Grid. Dispositif permettant d'utiliser les voiture connectées à une borne spécifique de recharge pour servir de stockage temporaire d'électricité afin d'équilibrer le réseau.
VE	Véhicule Electrique
Electron-Volt (eV)	Unité d'énergie utilisée en physique des particules. Energie d'un électron soumis à une différence de potentiel d'1 volt. Correspond à $1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19}$ joule. Unités multiples : KeV, MeV, etc

Dans le premier épisode, nous avons posé les concepts de base et défini quelques unités et ordres de grandeur.

Dans le second, nous avons pu comprendre que l'énergie peut prendre des formes très diverses.

Dans le troisième, nous nous sommes concentrés sur la production et la distribution de l'électricité.

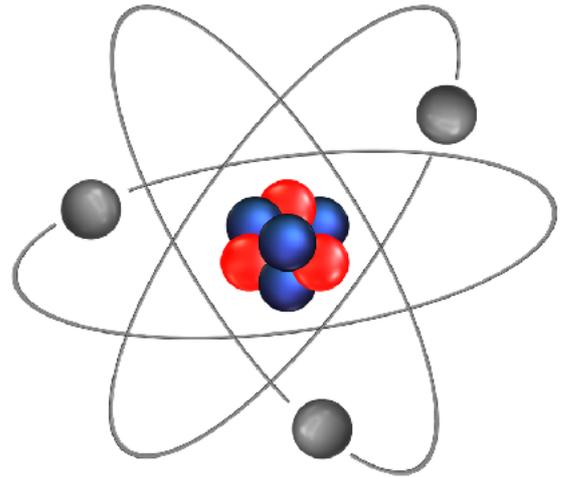
Dans le quatrième épisode, nous avons tenté de poser quelques explications Geo-politiques de ce qui se trame aujourd'hui sur ces sujets.

Dans ce dernier épisode, nous tenterons de comprendre un peu mieux ce qu'est l'énergie nucléaire, pourquoi elle déchaîne tant de passions et pourquoi elle est devenue un marqueur reconnu dans le monde entier de l'innovation et de l'excellence françaises.

1. Un peu de physique (et d'étymologie)

Je sais, nous avons promis d'éviter les concepts compliqués, mais il est quand même utile de comprendre de quoi nous parlons.

Dans les années 50 ou même avant, on parlait de l'énergie atomique. Puis on a commencé à utiliser le terme « nucléaire ». En fait tout cela relève juste d'un effet sémantique. A la base, et pour faire extrêmement simple, voire simpliste, il faut comprendre que tout ce qui nous entoure est composé d'éléments différents, qui peuvent exister seuls ou composés à d'autre. Par exemple, l'hydrogène et l'oxygène sont des éléments dont la combinaison peut créer de l'eau. A chaque élément, correspond un atome qui a des caractéristiques bien précises. Comme illustré ci-contre l'atome se compose d'un noyau, autour duquel gravitent un ou plusieurs électrons. Quand on fait de la chimie, on combine entre eux des éléments différents pour constituer par exemple des molécules (comme l'eau dans notre exemple). Mais quand on fait de la physique atomique, on vient modifier la composition des noyaux. C'est pour cela qu'on l'appelle aussi la physique nucléaire.



Le noyau est un assemblage de protons et de neutrons, que l'on appelle génériquement des nucléons, autour duquel « gravitent » des électrons. Chaque élément que nous connaissons comporte un nombre précis de protons et de neutrons. Ainsi le noyau d'hydrogène comporte juste un proton, alors que le carbone comporte 6 protons et 6 neutrons et que l'uranium naturel (U238) comporte 92 protons et 146 neutrons.

Certains éléments peuvent avoir une variation de leur nombre de neutrons. On appelle cela des isotopes, qui sont parfois instables (radioactifs). Le carbone 14 (2 neutrons de plus que le carbone 12) est un exemple connu d'isotope du carbone que l'on utilise en archéologie pour effectuer des datations.

On aura compris qu'en fonction de l'élément, le nombre de nucléons de son noyau peut être très petit (noyaux « légers ») ou très important (noyaux « lourds »).

*Si on « casse » un noyau lourd pour en faire 2 plus légers, on dégage une énergie considérable. C'est la **FISSION Nucléaire**.
De même si on « réunit » deux noyaux légers pour en faire un plus lourd, on dégage également une énergie considérable. C'est la **FUSION Nucléaire***

Historiquement, les premières applications de cette énergie phénoménale furent bien entendu militaires. On ne discutera pas ici de l'intérêt géo-politique des armes ato-

miques, qui ne furent réellement utilisées que par les USA pour terminer la guerre avec le Japon. Mais pour comprendre, les premières « bombes atomiques » comme celles qui ont été utilisées en 1945, étaient des bombes à fission : elle utilisaient la capacité à casser des noyaux lourds dans une réaction qui s'emballe jusqu'à l'explosion. On les a appelées « Bombes A ».

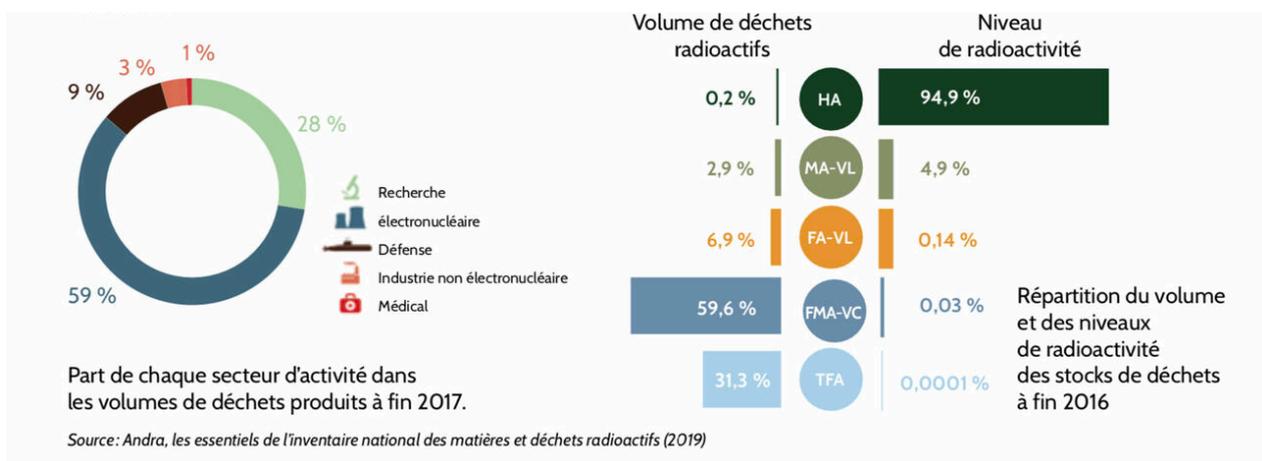
Puis l'industrie militaire des deux blocs, aiguillonnée par la guerre froide, a mis au point des bombes utilisant la fusion de noyaux d'hydrogène qui ont été nommées « Bombes H ». Au passage, la bombe H nécessite une « allumette » qui est en fait une bombe A. On aura compris que ces armes, dites « thermo-nucléaires » sont dévastatrices et beaucoup plus puissantes que les bombes A. On va voir dans la suite de ce document que l'usage pour la production d'énergie de ces deux mécanismes n'a pas progressé au même rythme.

2. La production d'énergie par fission

2.1. Réacteurs classiques

Alors que le premier réacteur produisant de l'électricité et connecté au réseau a vu le jour en Russie en 1954, la première réaction nucléaire produisant de l'énergie non militaire a été réalisée aux Etats Unis 3 ans plus tôt. Dans les deux cas, il s'agit bien sûr de fission.

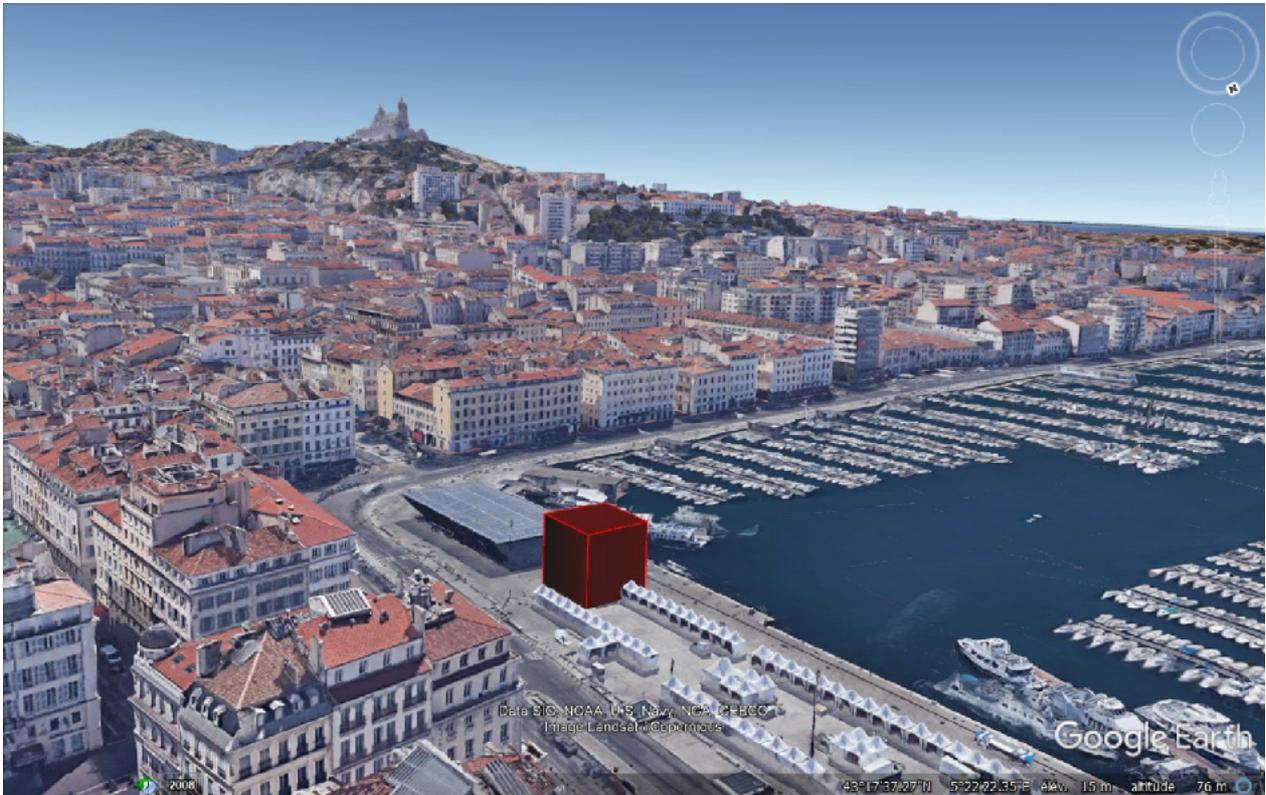
Tous les réacteurs actuellement en service ou en chantier dans le monde utilisent la fission pour produire de l'énergie. L'inconvénient majeur de cette technologie est d'utiliser des métaux lourds (Uranium, Plutonium), radioactifs, et dont les déchets doivent être gérés de manière sérieuse et sur le temps long. Cette contrainte de re-



cyclage et de gestion des déchets est d'ailleurs l'un des principaux freins au développement plus large de cette énergie, et en tout cas le principal prétexte mis en avant par ses opposants.

On voit dans le graphique ci-dessus que les déchets nucléaires ne proviennent pas tous de la production d'énergie. Pour autant, la totalité des déchets de haute activité

(HA) que la France a produit depuis 40 ans tiennent dans le volume d'une piscine olympique, soit le cube rouge posé ci-dessus dans le vieux port de Marseille.



Dans le même temps, les « déchets » des énergies fossiles se comptent par milliards de tonnes de CO₂ jetés dans l'atmosphère tous les ans, ainsi que par millions de tonnes pour les autres polluants.

Autre image, la totalité des déchets nucléaires d'un individu pour l'ensemble de sa vie si toute son énergie était de fission nucléaire conventionnelle tient dans le volume d'une canette de soda. Je précise « de fission conventionnelle » car nous verrons plus loin que des techniques permettent justement de mieux réutiliser ces « déchets ».

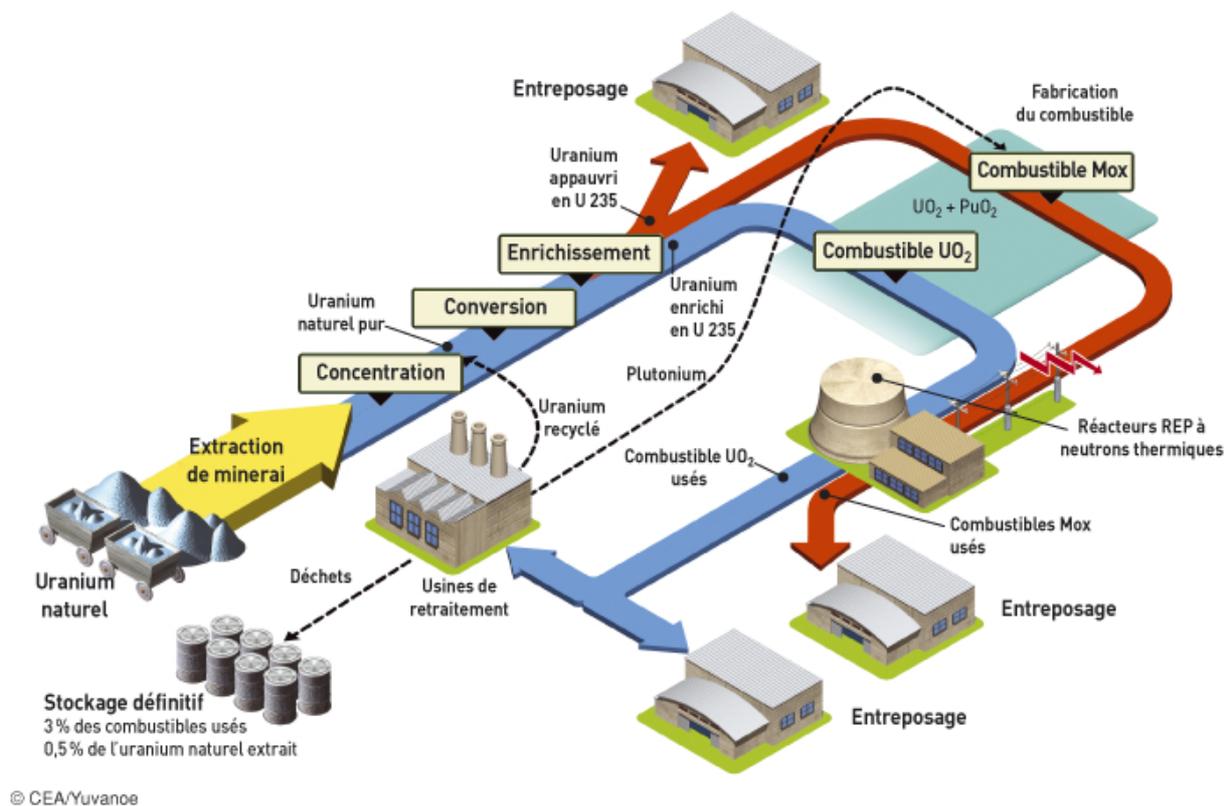
En France, les 56 réacteurs encore en service sont par ailleurs tous à « Eau Pressurisée » ce qui signifie que c'est de l'eau sous pression qui circule dans le cœur du réacteur et qui vient réchauffer le circuit secondaire.

La suite est la même que pour toute centrale thermique, comme expliqué dans l'épisode 3.

2.2. Le cycle du « combustible »

Il est bon de rappeler que le terme « combustible » est un abus de langage puisqu'il n'est pas question de « brûler » quoi que ce soit ici. Mais c'est un terme consacré (les anglophones disent « *nuclear fuel* »).

On se souvient dans l'épisode 2 de cette série que nous avons évoqué les usines d'enrichissement d'Uranium dont dispose la France. Les activités d'enrichissement et de recyclage du combustible sont réalisées par la société ORANO (Ex COGEMA et ex AREVA). Le schéma ci-dessous résume les différentes phases de ce cycle, dans l'état actuel des choses.



Tout d'abord, il faut noter que la France est le seul pays au monde avec la Russie à maîtriser la totalité du processus depuis l'extraction, l'enrichissement jusqu'au retraitement et à la réutilisation du combustible. On voit ici que les déchets ultimes sont extrêmement réduits. (0,5% de l'uranium extrait)

Il faut bien comprendre que l'élément essentiel se situe tout en haut du graphique. Nous disposons de plusieurs centaines de milliers de tonnes **d'uranium appauvri**, inutilisable aujourd'hui, mais « fertile ». Et c'est pourquoi, dès les années 70, la France a voulu travailler sur cette capacité à utiliser cet uranium.

2.3. Surgénération

« Nuclear waste : It's only waste if you waste it »¹

Ces quelques mots résument la totalité des problèmes et les raisons de la surgénération. Comme cela a déjà été évoqué dans le chapitre 3.2 de l'épisode 4, cette technologie vise à permettre une utilisation beaucoup plus large des matériaux dont nous disposons pour faire fonctionner nos réacteurs à fission. Concrètement, ce type de réacteur permet d'obtenir plus de matériaux fissiles à la sortie qu'en entrée. Alors que seul l'U235 est consommable dans les réacteurs classiques, soit moins de 1% de l'Uranium Naturel, un surgénérateur va transformer l'U238 (plus de 99% de l'uranium naturel) en un matériau fissile, lequel pourra à nouveau être utilisé comme combustible.

En d'autres termes un tel réacteur permet de « brûler » non seulement les déchets des autres, mais aussi l'Uranium appauvri dont nous disposons en grande quantité. (Encore une fois, plusieurs milliers d'années de consommation déjà disponible chez nous). Rappel :

*Il existe sur le carreau de Pierrelatte et à Bessines près de **300 000 tonnes** d'uranium appauvri (uranium 238) issu des usines d'enrichissement en uranium 235, matériau nécessaire au fonctionnement des réacteurs actuels, et des EPR dans un futur proche. Cet uranium 238 « restant » peut être fissionné dans un réacteur surgénérateur (dit aussi RNR pour « réacteur à neutrons rapides »). Il a un potentiel énergétique équivalent à **500 milliards de tonnes de pétrole**, soit plus de deux fois les réserves mondiales actuelles de pétrole et sans émission de gaz à effet de serre !*

Superphenix était un Surgénérateur, de type RNR (Réacteur à Neutrons Rapides) dont le fluide caloporteur était le Sodium liquide. Nous avons vu dans l'épisode précédent comment les politiques français se sont acharnés, par ignorance des enjeux et par dogmatisme et clientélisme, à détruire cette avance incroyable dont disposait notre pays.

2.4. Réacteurs de 4^{ème} génération

Avant de parler de la 4^{ème} génération, encore faudrait-il comprendre quelles sont les 4 premières (source CEA).

La 1^{ère} génération de réacteurs nucléaires comprend les prototypes et les premiers réacteurs de taille industrielle à usage commercial mis au point dans les années 1950 et 1960 et entrés en service avant les années 1970. On y trouve surtout des réacteurs dits « graphite gaz » qui ont permis de démontrer qu'il était possible de produire de l'électricité avec l'énergie nucléaire. Le réacteur « boule » de Chinon évoqué avant est un réacteur de première génération.

¹ Les déchets nucléaires ne sont des déchets que si vous les jetez.

Les réacteurs de 2^{ème} génération sont entrés en service à partir des années 1970. Ils correspondaient à la nécessité d'une meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire et d'une amélioration de l'indépendance énergétique, dans un contexte de fortes tensions sur le cours des énergies fossiles (choc pétrolier). La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde sont des réacteurs de génération 2. En France, il s'agit principalement de filière à eau sous pression, une technologie américaine adaptée par EDF.

La 3^{ème} génération de réacteurs nucléaires, qui s'apprête aujourd'hui à prendre progressivement le relais, met l'accent sur les impératifs liés à la sûreté et à la sécurité (résistance renforcée aux agressions externes, type chute d'avion). Ces réacteurs tirent les enseignements du retour d'expérience de l'exploitation des réacteurs de génération 2, des accidents de Three Miles Island et de Tchernobyl ainsi que des attentats du 11 septembre 2001. Trois réacteurs répondent à ces critères : l'EPR français, l'AP1000 (advanced pressurized de 1 000 MWe) américano-japonais et l'AES 2006, dernier modèle de 1 200 MWe du VVER russe. Les chinois furent les premiers à mettre en service en 2018 l'AP1000 et les américains viennent de démarrer leur premier AP1000 les 14 mars 2023. Les chinois encore furent les premiers à démarrer un EPR, puis les finlandais, en attente de la mise en service de Flamanville.

La 4^{ème} génération correspond aux réacteurs, actuellement en conception, qui pourraient voir un déploiement industriel dans la seconde moitié du XXI^e siècle. Ils reposent sur des concepts de neutrons dits « rapides » et fonctionnent à plus haute température, des conditions qui leur permettraient une optimisation de l'utilisation du combustible nucléaire. Les recherches sur ces systèmes du futur sont menées dans le cadre du Forum international Génération IV qui a établi les quatre critères auxquels ils devront répondre : **la durabilité, la sûreté, la compétitivité économique et la résistance à la prolifération nucléaire**. En 2006, le CEA a été mandaté par l'Etat pour étudier la conception d'un réacteur de 4^{ème} génération. Deux sociétés issues du CEA commencent leurs travaux en ce moment:

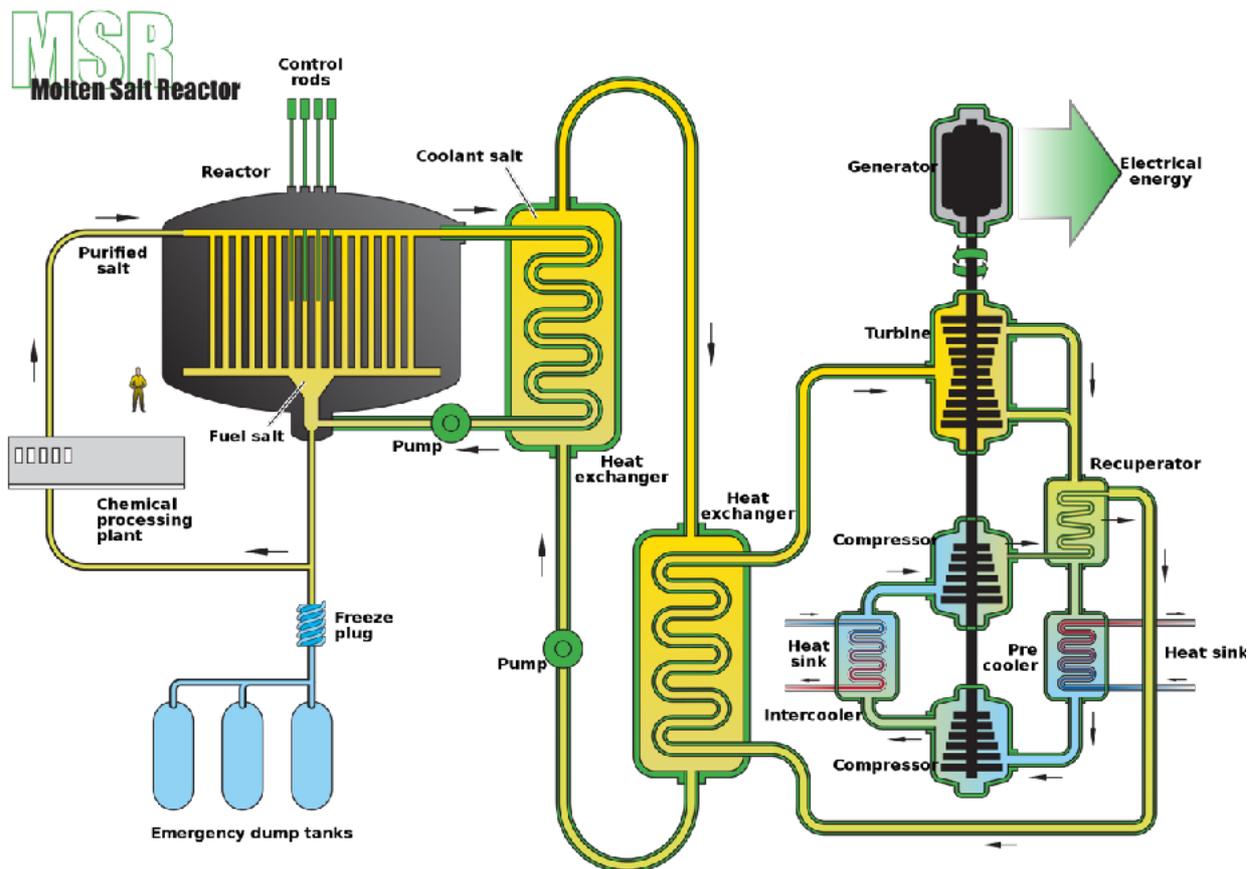
- Hexana, compte développer deux réacteurs modulaires de 4^{ème} génération, à neutrons rapides de 400 MW et refroidis au sodium.
- Stellaria quant à elle s'inscrit également dans la technologie 4^{ème} génération, en produisant de l'électricité et de la chaleur à proximité de sites industriels, avec un réacteur à sels fondus : un concept moins répandu.

L'utilisation directe de réacteurs à très haute température pour produire de l'hydrogène permettrait d'éviter de passer par l'énergie mécanique puis électrique pour ensuite utiliser l'électricité pour faire l'électrolyse de l'eau. Au lieu de cela, on peut directement utiliser la chaleur pour « casser » la molécule d'eau et extraire l'oxygène et l'hydrogène qu'elle contient. On attend des gains extrêmement importants sur les rendements. Et on comprend mieux pourquoi il est tellement important que l'UE reconnaisse la production d'hydrogène par le nucléaire aussi vertueux et donc finançable que les ENRi.

Plusieurs programmes de recherche sont donc en cours pour améliorer la technologie des réacteurs à fission. Superphenix, qui était opérationnel en 1996 lors de la décision politique d'arrêt par Lionel Jospin, avait donc 25 ans d'avance car les surgénérateurs à Neutrons rapides refroidis au sodium font partie de ces réacteurs.

Chirac a relancé cette filière sur un réacteur de 600 MW en lançant le projet ASTRID, démonstrateur technologique qui visait à industrialiser le retour d'expérience de SuperPhenix, sur une technologie comparable, que Macron a arrêté pour plaire aux écolos allemands !!

Autre technologie notable, l'utilisation du Thorium 232, qui dans un surgénérateur peut être transmuté en U233. Le thorium est 4 fois plus abondant que l'uranium, ses déchets sont plus simples à manipuler. Les réacteurs à Sel Fondus (RSF) utilisant le thorium présenteraient aussi l'avantage de ne pas être détournables en technologie militaire.



Les réacteurs à sels fondus (RSF ou MSR en anglais) présentent en outre la caractéristique spécifique de dissoudre le combustible dans le fluide caloporteur. On pourrait espérer que les arrêts pour rechargement soient supprimés ou au moins extrêmement réduits. En outre les RSF peuvent être à Neutrons Rapide et assurer ainsi un principe de surgénération.

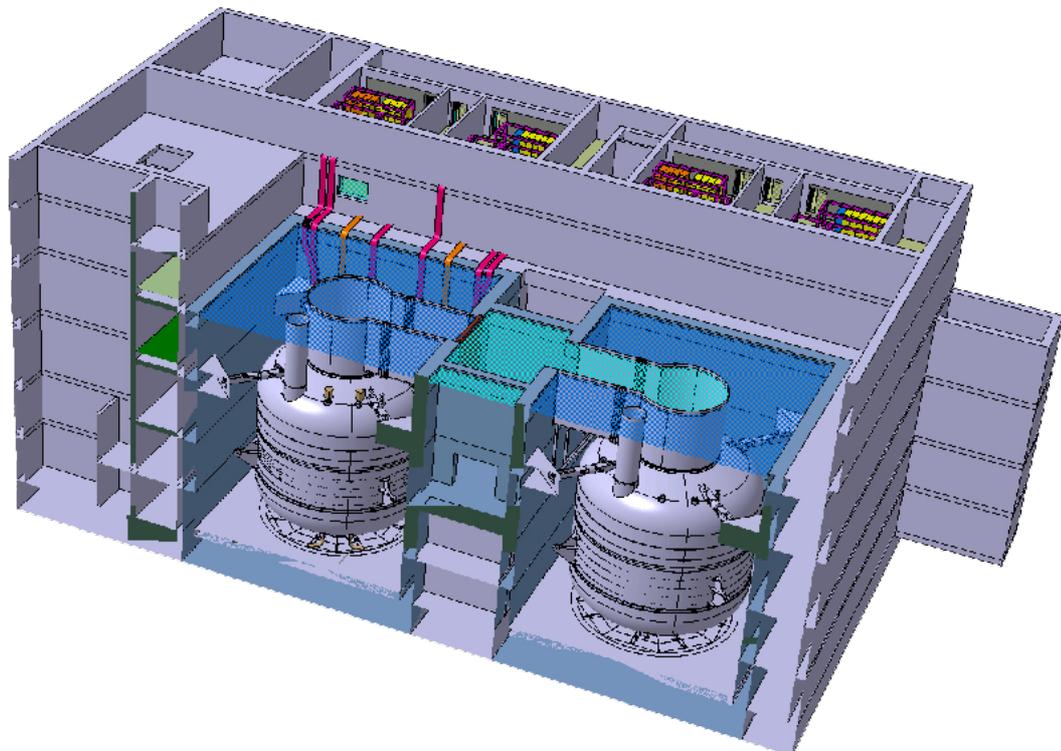
2.5. SMR

Les SMR ou Small & Medium Reactors sont des réacteurs de type « Eau pressurisée » de « petite » puissance (de l'ordre de 75 à 250 MW) et très compacts. Ils sont industrialisables facilement pour viser une production en série. De manière non surprenante ce sont les industriels en charge de la conception des réacteurs de propulsion navale (Rolls Royce au Royaume Uni ou Technicatome en France) qui sont en pointe sur ces sujets.

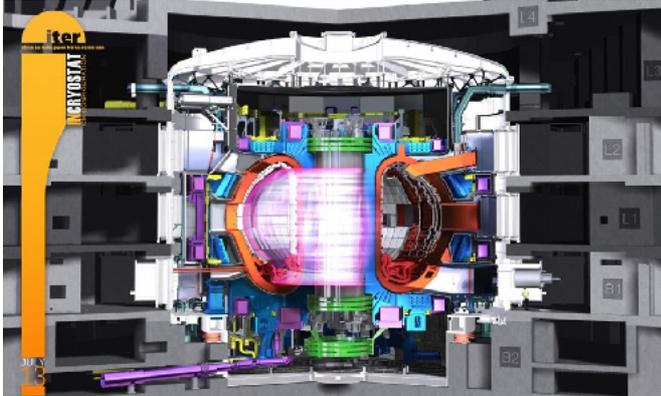


Voici le NUWARD de Technicatome disposant de 2 réacteurs de 170 MW chacun.

Cette approche permettrait d'une part l'exportation plus facile de ces technologies, et son usage sur des sites distants comme nos territoires ultramarins et d'autre part c'est une opportunité de récupérer des infrastructures, parfois récentes, de production d'énergie fossile en remplaçant la chaudière (Gaz, fuel ou charbon) par un SMR de puissance comparable, mais en conservant la salle des machines et les infrastructures de distribution d'électricité.



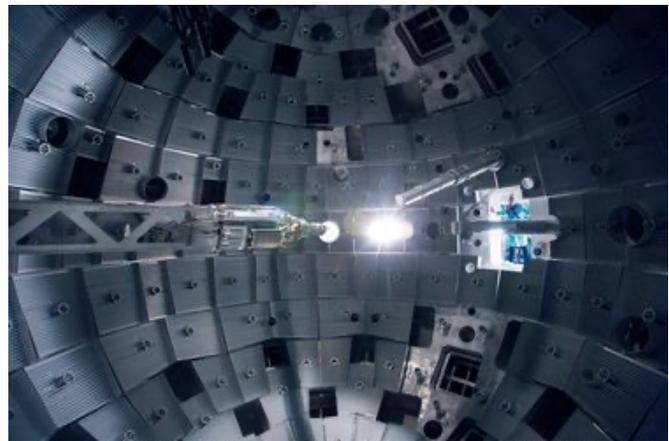
3. La Fusion Nucléaire



Comme on l'a vu plus haut, l'autre manière de récupérer l'énergie de la matière est de **fusionner** des noyaux légers. De nombreux projets et expériences cherchent à créer cette réaction de fusion contrôlée, de telle sorte que nous puissions en tirer cette énergie propre et quasiment illimitée. La France a la grande chance d'héberger sur son site de CADARACHE le projet international ITER qui vise à ouvrir la voie à un réacteur de fusion contrôlée utilisant le confinement magnétique de plasma. Mais les pays membres ont pour certains déjà lancé leur propres recherches s'appuyant sur les avancées d'ITER afin d'entrer les premiers sur ce marché planétaire de l'énergie propre et quasi inépuisable. La France ne devrait pas se permettre d'être à la

traîne...

Parmi les autres approches permettant de mettre en oeuvre ce graal des énergéticiens, on trouve le confinement de plasma par laser. Les outils permettant de mettre en oeuvre cette technologie sont très complexes et colossaux. Les Etats-Unis ont développé le NIF (National Ignition Facility) avec 192 lasers et les français le LMJ (Laser Mega Joule) avec 240 lasers, au sud de Bordeaux. Ces dispositifs étaient initialement, pour les deux pays, d'abord conçus pour valider les modèles de simulation numériques des armes, dans le contexte de l'arrêt des essais nucléaires. Mais les scientifiques les ont aussi vu comme des outils d'étude de la physique des plasmas et de leur confinement. Le but étant de récupérer plus d'énergie après fusion qu'il n'en a été injecté sous forme de rayonnement laser à l'initialisation.



Le 5 décembre 2022, alors que les premiers épisodes de ce document étaient déjà diffusés, les ingénieurs et chercheurs du NIF ont réussi la première expérience positive de fusion contrôlée au monde. Mais cela ne veut pas dire que cette technique est la

meilleure et qu'il faille abandonner les autres approches. La route pour une industrialisation sera longue pour développer un réacteur susceptible de fournir de l'électricité au réseau.

Parmi les scientifiques, les plus optimistes n'envisagent pas une utilisation **généralisée** de ce type de réacteur pour produire de l'énergie avant le XXI^e siècle. Il nous faut donc envisager les 80 prochaines années avec ce que nous connaissons aujourd'hui.

Néanmoins, la recherche se poursuit sur différents fronts, pour permettre un jour d'offrir au monde une énergie propre et abondante, sans laquelle aucune politique ne pourra offrir aux déshérités de ce monde la richesse ou le confort qu'ils cherchent à aller chercher ailleurs.

Conclusion



Ainsi se termine ce feuilleton de l'énergie, sur une image de la défunte centrale nucléaire de Fessenheim, sacrifiée sur l'autel de la bêtise politique et de l'ignorantisme écolo. Merci de l'avoir suivi. N'hésitez pas à nous faire part de vos remarques ou questions.