



FACULTÉ
DES SCIENCES
& TECHNIQUES

UBO
Université de Bretagne Occidentale

PROJET BIBLIOGRAPHIQUE
LICENCE 3 PHYSIQUE

Le nucléaire : énergie d'avenir ou du passé ?

Théo Le Tersec et Malo Kerebel



supervisé par
Dr. Yann LE GRAND

18 décembre 2020

Table des matières

Glossaire	2
Remerciment	3
Introduction	4
1 Présent	5
1.1 La Fission	5
1.1.1 Présentation générale	5
1.1.2 La neutronique	5
1.2 Types de réacteurs actuels	6
1.3 Cycle de l'uranium	7
1.4 Caractéristique globale des centrales nucléaires	9
1.4.1 Économie	9
1.4.2 Sûreté	10
1.4.3 Pollution	11
2 Le futur	12
2.1 La gestion des déchets	12
2.2 Les réacteurs à neutrons rapides	13
2.3 Le cycle du thorium	14
2.4 La fusion	15
2.4.1 fusion à confinement inertiel par laser	16
2.4.2 Fusion à confinement magnétique	17
Conclusion	19

Glossaire

AIEA (anglais : IAEA) : Agence Internationale pour l'Énergie Atomique

ASN : Autorité de Sureté Nucléaire

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives

GCR : Réacteur Refroidi au Gaz (anglais : Gas-Cooled Reactor)

HAVL : Déchet radioactif de haute activité à vie longue

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

LCOE : Coût Actualisé de l'Énergie (ou Électricité) (anglais : Levelized Cost of Energy)

MAVL : Déchet radioactif de moyenne activité à vie longue

MOX : Oxydes mixtes (anglais : Mixed Oxide)

RBMK : Réacteur de grande puissance à tubes de force (russe : Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyi)

REB : Réacteur à Eau Bouillante

RELP : Réacteur à Eau Lourde Pressurisée

REP : Réacteur à Eau Pressurisée

RNR : Réacteur à Neutrons Rapides

UNSCEAR : Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (anglais : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)

UOX : Oxyde d'Uranium

Remerciment

Nous tenons à remercier Cédric Mezrag, chercheur au CEA, ainsi que Yann Le Grand pour leur aide et leurs réponses à nos questions.

Introduction

Depuis le 19e siècle, notre société et notre mode de vie ont profondément changé avec l'arrivée des centrales électriques qui arrivaient à produire de l'énergie de manière continue.

D'abord dans une optique militaire, les centrales nucléaires ont trouvé un intérêt à la production d'électricité destinée au réseau civil. La puissance mondiale délivrée par le réseau nucléaire a fortement augmenté entre les premières installations en 1950 jusqu'aux années 1980, passant de 1 à 300 GW, cependant les accidents de Three Miles Island en 1979 puis de Tchernobyl, 7 ans plus tard, vont fortement freiner cette expansion, poussant les scientifiques et les politiques à se remettre en question sur la fiabilité et la durabilité du nucléaire. Bien que les centrales civiles ne servent pas à la production d'armes atomiques, les dégâts sur les populations et l'environnement provoqués par ces dernières induisent peur et méfiance sur les centrales actuelles, sans compter la gestion des déchets qui a été chaotique au début. Dans un contexte de réchauffement climatique où la consommation mondiale d'électricité augmente chaque année, les questions sur la qualité, la sécurité et l'impact sur l'environnement et les populations de nos moyens de production d'électricité portent à débat et nous amènent à nous poser la question suivante : l'énergie nucléaire est-elle l'énergie du futur ou du passé ?

Dans ce rapport, nous nous intéresserons seulement à la question du nucléaire pour la production d'électricité, et pas au nucléaire destiné à la médecine ou aux applications militaires.

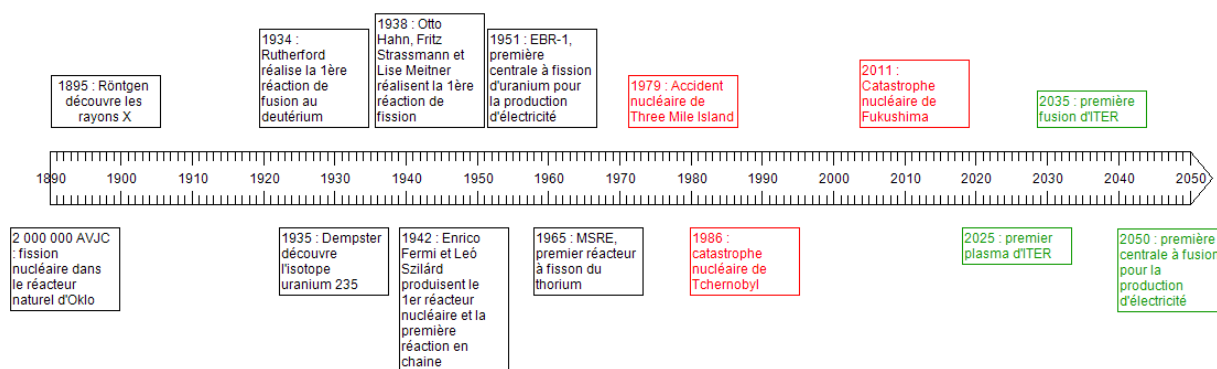


FIGURE 1 – Histoire de l'énergie nucléaire

Chapitre 1

Présent

1.1 La Fission

On ne peut comprendre le fonctionnement et le futur des centrales nucléaires, sans comprendre leur principe de fonctionnement, la fission nucléaire.

1.1.1 Présentation générale

La fission nucléaire est une réaction où des éléments plus lourds que le fer se séparent en deux atomes plus petits tout en générant de l'énergie. L'énergie d'une réaction de fission nucléaire se calcule avec la fameuse formule d'Einstein[1] :

$$E = c^2 \cdot (M_0 - \sum_i M_i), \quad (1.1)$$

Où M_0 est la masse initiale des réactifs et $\sum_i M_i$ est la masse totale de tous les produits de la fission. On obtient que la fission d'un atome d' ^{235}U génère environ 200 MeV, soit un kilogramme d' ^{235}U produit environ 10^7 fois plus d'énergie que la combustion d'un kilogramme de charbon d'où son attrait pour la production d'énergie.

Une réaction de fission nucléaire est instable et sa viabilité est déterminée par sa criticité k .

$$k = \frac{\text{Nombre de neutrons émis sur une génération}}{\text{Nombre de neutrons émis à la génération précédente}} \quad (1.2)$$

Lorsque la criticité d'une réaction nucléaire est inférieure à 1, on dit que la réaction est sous-critique, le nombre de neutrons émis à chaque génération diminue et donc la réaction s'arrête. Lorsque la criticité est supérieure à 1, on dit que la réaction est sur-critique, la fission s'accélère et peut s'emballer, c'est le résultat recherché dans une bombe atomique. La fission est stable lorsqu'elle est dite critique, c'est à dire que sa criticité est strictement égale à 1, c'est le régime à atteindre dans une centrale nucléaire.

1.1.2 La neutronique

Nous avons donc vu que la pérennité d'une réaction de fission nucléaire est due à son coefficient k . On estime qu'une réaction de fission nucléaire d' ^{235}U produit en moyenne 2.085 neutrons. Le calcul n'est pas si simple que cela car sinon cela voudrait dire qu'aucune réaction

de fission nucléaire ne pourrait exister sans s'emballer ni exploser. Le coefficient k_{eff} s'obtient avec la formule à 6 facteurs :

$$k_{eff} = \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot \eta \cdot P_R \cdot P_T \quad (1.3)$$

Mais une bonne approximation peut s'obtenir avec l'équation à 4 facteurs d'Enrico Fermi (en ignorant la géométrie du milieu de réaction) :

$$k_{\infty} = \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot \eta, \quad (1.4)$$

avec ε défini comme :

$$\varepsilon = \frac{\text{Nombre total de neutrons issus des fissions}}{\text{Nombre de neutrons issus de fissions par neutrons thermiques}}$$

ε , aussi appelé le facteur de fission rapide, est une valeur supérieure à 1 (environ 1.039 dans un REP traditionnel) qui varie beaucoup en fonction des neutrons, et est plus élevé dans les réactions impliquant des neutrons rapides (voir section 2.2 sur les réacteurs à neutrons rapides). p est défini comme :

$$p = \frac{\text{Nombre de neutrons parvenant au domaine}}{\text{Nombre de neutrons candidats au ralentissement}}$$

p , aussi appelé le facteur anti-trappe, dépend principalement de la concentration en ^{238}U et de la concentration en hydrogène, ce facteur augmente avec la concentration en ^{238}U et diminue avec la concentration en hydrogène, il est inférieur à 1 et vaut environ 0.75 dans un REP traditionnel.

f est défini comme :

$$f = \frac{\text{Nombre moyen de neutrons capturés par le combustible}}{\text{Nombre total de neutrons capturés}}$$

f , aussi appelé le facteur d'utilisation thermique, dépend principalement de la modération et de la concentration en ^{235}U . Plus la concentration est grande, plus f est grand, et inversement plus la modération est grande plus f est petit. f est inférieur à 1 et vaut environ 0.92.

Enfin, η est défini comme :

$$\eta = \frac{\text{Nombre de neutrons issus de fissions thermiques}}{\text{Nombre de neutrons capturés par le combustible}}$$

η , aussi appelé le facteur de reproduction, dépend uniquement de la concentration en ^{235}U . Plus la concentration en ^{235}U est élevée plus η augmente. C'est une valeur supérieure à 1 et vaut environ 1.77 dans un REP traditionnel.

1.2 Types de réacteurs actuels

Une centrale nucléaire étant essentiellement une centrale thermique, toutes les centrales nucléaires ont un fonctionnement similaire. La réaction de fission génère des neutrons avec une certaine énergie cinétique qui va chauffer le caloporteur, le caloporteur va chauffer de l'eau afin d'actionner une turbine à vapeur, qui va entraîner un alternateur et un générateur.

Type	Modérateur	Caloporteur	Nombre	Puissance Installé
REP	Eau légère	Eau pressurisée	301	28 5974MW
REB	Eau légère	Eau bouillante	64	65 003MW
RELP	Eau lourde	Eau lourde pressurisée	48	23 875MW
RBMK	Graphite	Eau pressurisée	12	8 358MW
GCR	Graphite	Dioxyde de carbone	14	7 725MW
RNR	Aucun	Sodium (voir détail)	3	1 400MW

TABLE 1.1: Les différents type de réacteurs[2]

La principale différence entre les types de réacteurs sont leurs modérateurs et leurs caloporteurs. Le modérateur sert à ralentir les neutrons issus des réactions de fission, afin d'augmenter la probabilité de fission, sans pour autant absorber ces neutrons, ce qui empêcherait toute fission. Ainsi plusieurs modérateurs sont utilisés dans les centrales nucléaires :

L'eau légère, grâce à ses atomes d'hydrogène est un très bon modérateur, cependant ces mêmes atomes hydrogènes absorbent beaucoup de neutrons ce qui nécessite que le combustible nucléaire des centrales qui utilisent ce modérateur soit enrichi.

L'eau lourde, grâce à ses atomes de deutérium, est un modérateur moins efficace que l'eau légère mais a l'avantage d'absorber moins de neutrons. Le faible taux d'absorption permet d'utiliser un uranium moins enrichi voire naturel (0.7% ^{235}U). Cependant, la relative rareté du deutérium (33mg/L d'eau) rend son prix prohibitif, ce qui limite son utilisation.

Le graphite, même si le graphite dû à son numéro atomique élevé est un assez mauvais modérateur, il a l'avantage d'absorber peu de neutrons (et donc de permettre l'utilisation d'un combustible peu enrichi) et d'être peu cher.

1.3 Cycle de l'uranium

L'uranium est le seul élément naturel avec lequel il est possible d'établir une réaction en chaîne. L' U_{nat} est composé à 99.27% d' ^{238}U et 0.72% d' ^{235}U , son seul isotope fissile.

En 2015, 65 000 tonnes d' U_{nat} ont été repartis sur 441 réacteurs. On estime la consommation à 100 000 tonnes en 2030 selon l'AIEA et l'OCDE[3]. En 2016, les réserves identifiées économiquement exploitables étaient de 7.6 millions de tonnes : cela correspond donc à des réserves pour une centaine d'années au rythme de la consommation actuelle. En France, notre consommation en 2016 était de 7800 tonnes d' U_{nat} /an + 1050 tonnes issues du recyclage.

Les centrales à base d'uranium fonctionnent avec un mélange d' ^{235}U et d' ^{238}U . On doit d'abord extraire l'uranium des mines, puis par attaque chimique former un "cake" qui sera facilement transportable, à hauteur de 750kg d'U/tonne. Sous cette forme, l'uranium ne peut pas encore aller dans une centrale, il faut l'enrichir en ^{235}U , présent en plus faible quantité naturellement, pour pouvoir avoir une quantité d'isotope fissile assez grande pour entretenir la fission. Seulement 1/7 de l'uranium enrichi va servir à la fabrication de combustibles. Le reste est considéré comme de l'uranium "faiblement enrichi" car enrichi à moins de 3%, ce n'est pas un déchet mais il est stocké en attendant de pouvoir être valorisé. L' ^{235}U est enrichi à hauteur

de 5% dans le nucléaire civil. L'uranium du cake est sous la forme U_3O_8 , puis dissous par acide nitrique, va devenir UO_3 puis UO_2 avec un ajout d'ammoniac et d'hydrogène. A partir de là, avec de l'acide fluorhydrique on obtient de l' UF_4 puis UF_6 par fluoration : on peut désormais enrichir l'uranium.

Ensuite on va chercher à supprimer le fluor de l'uranium : pour cela on va vaporiser l' UF_6 dans un four en présence d' H_2O pour le transformer en UO_2F_2 , puis on chauffe à 800° pour obtenir de l' UO_2 qui va aller remplir des "crayons d'hélium", ce qui correspond à du combustible de REP.

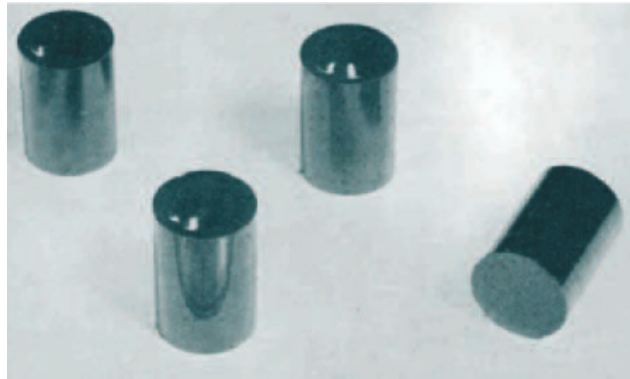


FIGURE 1.1 – Pastille d'uranium[4]

Après l'exploitation de l'uranium, on obtient du combustible usé qui est composé de plutonium, d'uranium, produits de fission et actinides mineurs. Il est important de noter que les produits de fission ne sont pas nécessairement des produits de haute activité à vie longue mais qu'ils ne sont pas recyclés car ils ne sont pas valorisables, on va donc les considérer avec les actinides mineurs comme des déchets ultimes inexploitable, les déchets HAVL et MAVL ne représentent que 3.1% des déchets ultimes[5].

Le combustible usé est laissé à l'intérieur du cœur pendant environ 4-5 jours pour qu'il refroidisse. Ensuite les déchets sont entreposés entre 1 à 2 ans pour qu'ils refroidissent davantage (3-4ans pour le MOX), puis on va récupérer le combustible usé qui pourrait être traité dans des usines spécialisées comme la Hague en France. Le processus permet de séparer les différents déchets de manière très sélective : à l'aide d'un solvant d'ion nitrate, on va d'abord séparer l'uranium et le plutonium des produits de fission et des actinides mineurs. La France est le plus gros pays en matière de recyclage des combustibles usés avec près de 1700 tonnes / an, soit l'équivalent de 450 Twh/an récupérés. C'est aussi l'un des rares pays à recycler le combustible usé avec la Russie dans l'usine de Tcheliabinsk (400 tonnes / an), la Grande-Bretagne avec l'usine de Sellafield (900 tonnes / an) et bientôt le Japon avec une usine capable de traiter 800 tonnes / an[6].

Il y a dans le monde seulement 8 pays qui retraitent actuellement leurs déchets.

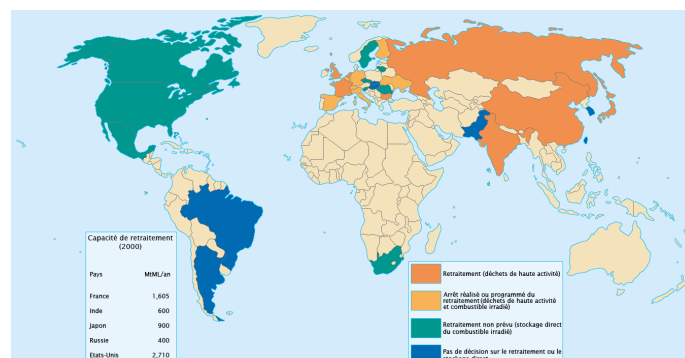


FIGURE 1.2 – Carte des pays traitant leur déchets radioactifs[7]

Deux chemins s'offrent aux produits en fin d'exploitation : Le plutonium va être purifié à l'aide d'oxygène pour obtenir du PuO_2 qui va être envoyé à l'usine Melox pour être valorisé avec de l' UO_2 : on obtient ainsi du combustible MOX qui va servir de nouveau de carburant aux centrales nucléaires. Cependant, ce cycle de revalorisation du plutonium n'est réalisable qu'une fois car le nouveau combustible usé est difficilement recyclable.

1.4 Caractéristique globale des centrales nucléaires

1.4.1 Économie

La question du coût est primordial, pour déterminer le développement de n'importe quelle technologie, il en va donc de même pour l'électro-nucléaire. Différents facteurs entrent en compte pour calculer le coût des différentes énergies.

En premier lieu, le coût "overnight", c'est-à-dire le coût de construction de l'infrastructure par sa puissance (généralement en MW). Un coût overnight élevé signifie qu'une technologie représente un investissement risqué.

En second lieu, le coût actualisé de l'énergie (LCOE), cette mesure prend en compte les travaux de rénovation, d'entretien, d'achat du carburant (pour les sources d'énergie nécessitant du carburant), ainsi que les coûts de construction, de démantèlement ou de remboursement des emprunts initiaux. Le LCOE est une mesure estimée et non pas calculée, différentes estimations peuvent donc donner des résultats différents en fonction des hypothèses prises en amont du calcul. Le LCOE a ses limites lorsqu'il est calculé pour une énergie ayant un facteur de charge variable (éolien ou solaire), un LCOE faible ne rend pas une énergie peu chère si la source ne produit que pendant la nuit où la demande est faible, et un LCOE élevé ne rend pas une énergie chère si elle peut produire en permanence[8].

Le coût overnight de construction d'une centrale nucléaire est une valeur très fluctuantes et se calcule avec :

$$C_{overnight} = \frac{cout}{P_e}$$

Les centrales nucléaires ont un coût overnight généralement élevé (médiane de $2000\text{€}_{2010}/\text{kW}$) avec une grande fluctuation.

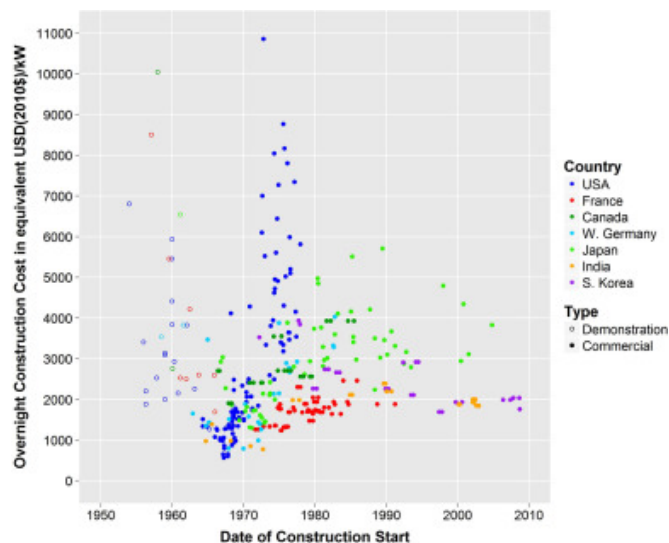


FIGURE 1.3 – coût overnight des différentes centrales dans 6 pays[9]

La tendance est à la hausse dans de nombreux pays, mais à la baisse en Corée du Sud. (L'EPR controversé de Flamanville ayant un coût actuel de 19Md€[10] et une puissance de 1630MW_e, son coût overnight serait actuellement de 11 656€/MW_e)

Le LCOE est en partie relié au coût overnight. Tout comme le coût overnight, le LCOE est très dépendant des pays car il prend en compte plusieurs facteurs, notamment des taxes qui sont très différentes selon les pays. On prend donc ici le LCOE médian.

Source	LCOE (\$ ₂₀₁₀ /MWh	
	pas de taxe par tCO ₂	taxe de 100\$/tCO ₂
Nucléaire	99	99
Éolien onshore	84	84
Photovoltaïque	160	160
Hydro	35	35
Gaz	79	120
Charbon	78	150

TABLE 1.2: LCOE médian en \$₂₀₁₀/MWh_e [11]

On voit donc que le nucléaire est tout de même relativement compétitif face aux autres sources d'électricité.

1.4.2 Sûreté

La Sûreté est un des enjeux majeurs de l'électro-nucléaire dans le monde, notamment depuis l'accident de Three Miles Island (États-Unis, 1979) et les catastrophes de Tchernobyl (URSS, 1986) et Fukushima (Japon, 2011). L'électro-nucléaire a la particularité par rapport aux autres sources d'électricité que ses dangers pour la santé des individus ne sont pas diffus (émissions de particules fines) mais sont liés à des risques dits catastrophiques. L'industrie est donc sujet à des événement dits de "cygnes noirs"[12], c'est à dire des risques qui sont inattendus et généralement imprévisibles avant d'en avoir fait l'expérience. Du fait de l'imprévisibilité de tels événements, il est impossible d'assurer la complète sûreté de n'importe quelle centrale nucléaire. Les trois principales causes d'accidents catastrophiques sont :

L'erreur humaine : Même avec toute l'innovation possible pour automatiser le fonctionnement d'une centrale nucléaire, l'erreur humaine sera toujours un facteur à prendre en compte, il faut créer une culture de la sûreté avec des opérateurs entraînés. Ce sont les causes les plus dures à évaluer et la cause des accidents de Three Miles Island et Tchernobyl.

Les causes externes : Il s'agit de toutes les catastrophes naturelles pouvant arriver sur un site (séisme, tsunami, tornade), mais aussi les attaques terroristes ou militaires. Tandis que les catastrophes naturelles peuvent être estimées via les registres historiques, elles peuvent être sous-estimées comme dans le cas de Fukushima daiishi (Japon, 2011). Les attaques terroristes de leur côté sont imprévisibles, même si aucune attaque de site nucléaire par un groupe terroriste n'a eu lieu à ce jour.

Le vieillissement de la cuve du réacteur : La cuve du réacteur est la seule partie d'une centrale nucléaire qui ne peut être remplacée et c'est elle qui détermine la durée de vie d'une centrale. C'est le risque le plus simple à évaluer et à empêcher.

Le bilan sanitaire des deux accidents nucléaires de niveaux 7 sur l'échelle internationale des événements nucléaires (INES) est difficile à estimer et sujet à débat. Pour Tchernobyl le bilan est estimé entre 2 000 et 17 000 morts directement liées aux radiations[13], l'effet de l'accident sur la santé mentale est difficilement calculable mais est considéré comme plus important encore[14]. Pour Fukushima, les doses de radioactivité reçues par la population aux alentours de la centrale ne semblent pas indiquer d'effets statistiquement significatifs sur la santé[15], du point de vue de la santé mentale, le taux de troubles post-traumatiques dans la préfecture de Fukushima a atteint les mêmes niveaux que ceux après les attentats du 11 septembre 2001 aux États-Unis, de même, le taux de suicide a augmenté les années suivants l'accident dans les préfectures de Fukushima, Iwate et Miyagi[16].

1.4.3 Pollution

Deux types de pollution sont importantes à prendre en compte dans l'évaluation de l'industrie nucléaire, la pollution radioactive et la pollution de gaz à effet de serre.

La majorité de la pollution radioactive due à l'énergie nucléaire est issue de l'extraction de l'uranium. L'impact de cette extraction est très contrasté entre les pays. Au Niger, aucune donnée suffisamment précise n'a pu être collectée, mais il est considéré comme probable que les mines d'uranium aient un effet sur la santé des personnes y vivant à proximité[17]. À l'inverse, en Autriche et en France, les mines d'uranium ne semblent pas avoir d'effet statistiquement significatif sur la population[18][19].

Du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, le nucléaire a un impact très faible par rapport aux énergies fossiles et équivalent aux énergies renouvelables.

Source	Émission (gCO_2eq/kWh)		
	minimale	médiane	maximale
Nucléaire	3.7	12	110
Éolien inshore	7.0	11	56
Hydro	1.0	24	2200
Photovoltaïque	18	45	180
Biomasse	130	230	420
Gaz	410	490	650
Charbon	740	820	910

TABLE 1.3: Émissions de gaz à effet de serre par source[11]

Chapitre 2

Le futur

2.1 La gestion des déchets

On classe les déchets en fonction de leur activité radioactive (donc de leur dangerosité) et de leur durée de vie : il y a les déchets de haute, moyenne, faible ou très faible activité et des déchets à vies longues qui vont être radioactifs des millénaires ou à vies courtes pour les radionucléides avec des périodes de moins de 31 ans. Les déchets HAVL ne représentent que 0.2% du volume de déchets mais 94.9% du niveau total de la radioactivité [20].

Les déchets de faible et très faible activité sont liés aux outils utilisés en recherche, en industrie non-nucléaire ou en médecine, ainsi que les gravats issus du démantèlement de sites nucléaires : ces déchets sont simplement coulés dans des piscines de béton pour une durée de 300 ans, en attendant que leur radioactivité soit divisée par 1000. On estime tout de même à 2 millions de m³ la quantité de déchets liés aux infrastructures pour les prochaines décennies. Certains pays comme la Corée du sud ou le Canada envisagent le stockage souterrain même pour les déchets de faible activité. Les plus gros problèmes se posent avec la gestion des déchets HAVL et MAVL. Les pays qui produisent du MOX vont récupérer l'²³⁵U et le plutonium, le reste va être vitrifié dans des conteneurs en inox pour préserver l'extérieur des radiations. Ces fûts sont extrêmement chauds et doivent attendre entre 40 et 60 ans que leur niveau de radioactivité baisse. En France, la Hague peut stocker 17 600 tonnes de combustible soit plus de 200 cœurs de REP à 1000 MW [21].

Pour ces déchets, la loi Bataille de 1991 avait pour but de développer 3 axes de recherche sur 15 ans : la séparation et la transmutation, l'entreposage en surface et le stockage profond.

L'entreposage en surface n'est pas envisageable pour les déchets HAVL et MAVL, la question de stocker des résidus de forte activité nécessite une sécurité d'un point de vue humain et environnemental, qui puisse être une valeur sûre pour les générations futures. On ne sait pas comment sera l'humanité dans 10 000 ans, les risques que les déchets aient un impact sur une population ne connaissant pas leur existence et leur dangerosité pourraient être dramatiques.

La transmutation consiste à faire réagir les actinides mineurs pour réduire grandement leurs durées de vie : par exemple, le Technétium 99 qui reste radioactif 210 000 ans avant de se stabiliser en Ruthénium 99 non radioactif. Faire en sorte que le Technétium capture un neutron, le transforme en un atome extrêmement instable, le Technétium 100 qui va se transformer en Ruthénium 100 en seulement 15.8 secondes[22]. Cependant la transmutation nécessite une grosse quantité d'actinides mineurs, impactant la sûreté nucléaire, et le gain de

place pour le stockage en couche géologique profonde impliquerait une durée d'entreposage préalable plus longue (120ans)[23].

Le stockage en couche géologique profonde est la solution envisagée par la plupart des pays fonctionnant à l'énergie nucléaire. La plupart des études portent sur la nature de la roche pour déterminer quels sites seraient les mieux adaptés. La France est le pays le plus avancé dans la recherche en la matière : le site de Bure avec le projet Cigéo devrait en 2035 devenir le futur centre de stockage pour les 100 prochaines années et ainsi stocker 85 000 m³ de déchets, à 500 mètres de profondeur et dans une roche argileuse. L'argile est une roche qui contient 15 à 18% d'eau, lorsque des fractures se créent dans la roche, les propriétés d'élasticité de la roche tendent à ce que les fissures se referment[24]. De plus la ville de Bure, située dans la Meuse, est une zone géographique avec une quantité et une intensité de séisme très faible[25]. La radioactivité en surface serait de 0.01mSv/an, (la radioactivité naturelle est en France estimée à 2.4mSv/an). Bien que l'argile empêche les remontées d'eau, à l'international toutes ces conditions ne sont pas forcément réunies : on peut prendre comme exemple l'Allemagne qui stockait ses déchets à Morsleben en 1978, une ancienne mine de fer. Cette mine a subi des entrées d'eau à la fin des années 80, contaminant cette dernière[26] [27].

2.2 Les réacteurs à neutrons rapides

Comme on peut le voir dans le tableau 1.1, la majorité des réacteurs en fonctionnement sont des réacteurs à eau pressurisée (REP) de deuxième génération, et en faible portion les fameux European Pressurised Reactor (EPR). Cette domination n'est pas prête de changer car la très grande majorité (81%) des 53 réacteurs actuellement en construction sont des REP[28].

Cependant le réel futur des réacteurs nucléaires civils semblent être dans le Generation IV International Forum (GIF), l'organisation internationale pour le développement des réacteurs de quatrième génération. Depuis janvier 2000 le GIF encourage l'adoption d'une technologie encore peu utilisée (3 en fonctionnement à ce jour[2] et 1 seul en construction[28]), les réacteurs à neutrons rapides (RNR). Les RNR diffèrent des réacteurs traditionnels par leur absence de modérateur, qui sont essentiels au bon fonctionnement des réacteurs classiques. Les RNR auraient aussi la capacité d'utiliser la fissibilité de l'²³⁸U, ce qui permettrait de résoudre les problèmes des ressources d'uranium, enfin les RNR auraient la capacité de "brûler" le plutonium et les actinides mineurs, ce qui permettrait de grandement réduire la production de déchets radioactifs.

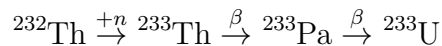
Comme on l'a vu dans la partie sur la fission nucléaire, le maintien des réactions de fission dépend du coefficient k_{∞} , qui lui même dépend des coefficients ε , p , f et η . Ces 4 coefficients dépendent grandement de la section efficace du combustible nucléaire, la section efficace (notée en barn = 10⁻²⁸m²) est la surface fictive dans laquelle un neutron interagit avec un atome, ou tout du moins a une probabilité d'interagir. La difficulté des RNR est que la section efficace des noyaux d'²³⁵U diminue drastiquement en fonction de l'énergie (et donc de la vitesse) des neutrons, passant de 300 barn à 1 barn. Cet effet est en partie contré par l'augmentation de la section efficace de fission de l'²³⁸U (de 2 · 10⁻⁵ à 0.331 barn) et par la diminution de la section efficace (et donc de la probabilité) de capture d'un neutron de l'²³⁵U et de l'²³⁸U .

Les RNR devront disposer de caloporteur spécifique, en effet l'eau qui est utilisée en ma-

riorité comme caloporteur aujourd'hui est aussi un modérateur, son utilisation empêche donc la création de neutrons rapides. Plusieurs projets sont proposés par le GIF pour le développement de la quatrième génération de réacteurs, mais aujourd'hui les 3 RNR en fonctionnement sont des réacteurs à caloporteur au sodium. Les réacteurs à caloporteur sodium ont néanmoins des défauts, la technologie moins mûre offre peu de certitude sur la fiabilité et le coût de tels réacteurs et la difficulté de stockage du sodium (le sodium réagit avec l'eau et ne peut pas être stocké à moins de 93°C). De plus l'utilisation de RNR permettrait l'utilisation de thorium comme combustible en lieu et place de l'uranium.

2.3 Le cycle du thorium

Découvert en 1828, son caractère radioactif est découvert très tôt, en 1898. Le ^{232}Th est un isotope fertile : lorsqu'il absorbe un neutron, il génère un isotope fissile, ^{233}U . Plus exactement, la réaction est :



Cependant une réaction en chaîne ne peut pas être entretenue uniquement avec du ^{232}Th : il faut lui ajouter une matière fissile comme ^{235}U , ^{233}U ou le plutonium, ce qui va permettre de générer de ^{233}U qui au contact du plutonium est "brûlé" : c'est la le cycle du thorium.

Le thorium est un élément relativement abondant sur Terre, mais si on se limite aux ressources économiquement exploitables, on dispose de plusieurs mégatonnes, dans le même ordre de grandeur que les réserves d'uranium. Cependant le cycle du thorium pourrait nous apporter des réserves pour plusieurs milliers d'années grâce à la surgénération : le nombre moyen de neutrons de fission produit par réactions pour ^{233}U est de 2.301, plus élevé que ^{235}U . On estime à une dizaine de tonnes par an la quantité de thorium nécessaire à un RNR. On l'extrait comme sous-produit de terres rares voire des gisements d'uranium.

Plusieurs cycles au thorium sont possibles : le cycle thorium-plutonium, qui va donner en combustible usé de ^{233}U qui pourra ensuite être recyclé dans un cycle thorium-uranium. L'avantage de ce dernier est qu'avec le thorium produisant ^{233}U , la surgénération est possible, améliorant les rendements. De plus, la fission d' ^{233}U ne produit quasiment pas d'actinides mineurs grâce à sa probabilité de fission élevée (92% contre 83% pour ^{235}U).

Les avantages sont les propriétés neutroniques des combustibles à base de thorium qui sont meilleures que celle de l'uranium, ainsi que des gains plus élevés de l'ordre de 20 à 30%. De plus un cycle au thorium, en plus de ceux des RNR, offre donc la possibilité d'utiliser comme carburant le plutonium qui à ce jour est un déchet ultime, en plus de permettre à un autre élément de fournir de l'électricité de manière continue.

Certain pays comme l'Inde qui possède près d'1/3 des réserves mondiales ou la Chine qui souhaite sortir de l'énergie à base de charbon sont les pays les plus avancés en ce qui concerne les réacteurs au thorium. Cependant la pleine exploitation du thorium dans les réacteurs en Inde ne devrait pas se faire avant 2050[29].

Les raisons pour lesquelles l'uranium a été privilégié au thorium sont que ce n'est pas le thorium mais ^{233}U qui dégage de l'énergie, et que transmuter le ^{232}Th en ^{233}U est une technique jeune qui était jugée trop coûteuse en recherche lors du développement des premières centrales civiles. De plus, l'industrie du nucléaire a d'abord été conçue à des fins militaires, et donc vers

des réacteurs de recherche pour uranium hautement enrichi, ce qui a permis de développer les connaissances sur l'uranium avant le thorium. Les connaissances de base sont acquises, mais il reste encore beaucoup de recherche et développement en ce qui concerne la création de réacteurs aux thorium dans le domaine civil.

2.4 La fusion

Contrairement à la fission, la fusion est l'union de deux noyaux dont la masse des produits est plus faible que la masse des deux noyaux initiaux. La fusion va aussi créer un défaut de masse, donc de l'énergie cinétique de l'ordre du MeV. On cherche ici à produire cette expérience avec les atomes les plus légers possibles pour avoir le défaut de masse le plus grand. Cependant fusionner 2 noyaux revient à coller 2 charges positives, ce qui n'est possible que sous certaines conditions spécifiques : les noyaux ne rentrent pas en contact les uns des autres car ils sont protégés par une barrière coulombienne, il faut donc que l'un des noyaux ait une énergie cinétique suffisante pour pouvoir dépasser cette barrière de potentiel (en respectant les règles de mécanique classique), ou peut, par probabilité, franchir la barrière coulombienne avec une énergie plus faible par effet tunnel. L'effet tunnel est mis en jeu, que ce soit sur terre ou dans le soleil, car les constituants n'ont pas l'énergie cinétique pour passer mécaniquement la barrière coulombienne.

Ce phénomène de fusion est possible dans la nature, c'est par exemple ce qui se passe dans le cœur de notre soleil. Le soleil est une énorme boule de plasma : un gaz ionisé dans lequel les électrons ne sont plus sous l'influence de l'attraction des noyaux. La chaleur d'un plasma vient de l'énergie cinétique de ses constituants. On peut faire l'approximation par constante de Boltzmann à l'équilibre thermodynamique à 10% près :

$$k = 1.32 \cdot 10^{-23} \text{ J/K soit } 1 \text{ eV} \Leftrightarrow 10^4 \text{ K}$$

L'énergie cinétique obéit au principe d'équipartition de l'énergie de Boltzmann qui nous donne l'énergie par particule (noyaux et électrons) libre dans le plasma : $\frac{3kT}{2}$.

La fusion thermonucléaire dans le soleil respecte le critère de Lawson : elle dégage plus d'énergie qu'elle n'en consomme. C'est ce qu'on va essayer de reproduire sur Terre pour être rentable d'un point de vue énergétique. Cependant, les conditions de température et de pression nécessaire à la réaction de fusion sont différentes dans le cœur du soleil et dans un laboratoire sur Terre. Dans notre étoile, la température de 15 millions de degrés est compensée par sa pression équivalente à un milliard de fois la pression de l'atmosphère, permettant la fusion thermonucléaire des noyaux d'hydrogènes. Sur Terre, une telle pression est impossible à atteindre. On arrive cependant à la compenser grâce à la température des plasmas qu'on génère, mais le couple température-pression réalisable ne permet pas la fusion d'hydrogène. On va chercher à fusionner 2 isotopes de l'hydrogène, le deutérium (1 proton - 1 neutron) et le tritium (1 proton - 2 neutrons), car leur fusion est moins exigeante sur le couple température-pression nécessaire.

${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \longrightarrow {}^3\text{T} (1.0 \text{ MeV}) + \text{H} (3.0 \text{ MeV})$
${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \longrightarrow {}^3\text{He} (0.8 \text{ MeV}) + \text{n} (2.5 \text{ MeV})$
${}^2\text{D} + {}^3\text{T} \longrightarrow {}^4\text{He} (3.5 \text{ MeV}) + \text{n} (14.1 \text{ MeV})$
${}^2\text{D} + {}^3\text{He} \longrightarrow {}^4\text{He} (3.7 \text{ MeV}) + \text{H} (14.7 \text{ MeV})$

TABLE 2.1: Énergie libérée par les réactions de fusion[30]

L' ${}^4\text{He}$, produit de fusion, n'est pas radioactif, cependant les neutrons produits pourraient activer les matériaux qui constituent l'enceinte des réacteurs : il faut des matériaux qui restent radioactifs peu longtemps. Le tritium est obtenu par fission de lithium qui donne en produit de fission de l'hélium et du tritium. Quant à lui, le deutérium se trouve dans l'eau. 1L d'eau en contient 33mg, dans l'idéal 3L d'eau fournissent autant d'énergie que 1000L d'essence. On choisit la réaction deutérium-tritium car cette dernière possède la meilleure section efficace d'interaction nucléaire.

À 100 KeV, donc 100 millions de degrés le nombre de barn est calculé par la formule de Gamow :

$$\sigma = \frac{S}{E} \cdot e^{\frac{-G}{\sqrt{E}}} \quad (2.1)$$

Connaissant les coefficients spécifiques $S = 11\,000$ barn-KeV et $G = 34.4$, obtient un nombre de barn = 3.527.

Le nombre de barn correspond à une surface, 1 barn = 10^{-28} m^2 . On peut relier le nombre de barn à une probabilité : imaginons en mécanique classique que j'ai une surface de 1 m^2 avec une cible de 0.01 m^2 , la probabilité que des projectiles, de taille négligeable, passe à travers cette dernière est de $0.01/1 = 1\%$. Le nombre de barn représente la taille de la cible qui sera un noyau, la probabilité va se faire par rapport à la section de l'atome contenant le noyau. L'atome est principalement composé de vide, sa section est de 10^{-20} m^2 . Cependant, la probabilité reste très faible, de l'ordre de 10^{-8} . On va la compenser avec la densité de la cible (augmentant le nombre de constituants) ou en augmentant le flux de noyaux incidents : plus on tire de noyaux, plus la probabilité augmente. 80% de l'énergie de fusion va sortir du plasma sous forme d'énergie cinétique dans les neutrons qui vont être absorbés par les parois du réacteur transférant une énergie thermique, qui fait chauffer un caloporteur, faisant tourner des turbines comme dans une centrale nucléaire.

2.4.1 fusion à confinement inertiel par laser

On fabrique des billes de deutérium et de tritium de l'ordre du milligramme, la bille a un rayon de 1 millimètre. On va la placer dans une cavité en or, conductrice de chaleur et braquer sur la bille des faisceaux lasers. En 2014, au LMJ, le laser ne délivrait qu'une puissance maximale de 60KJ pour 8 lasers, l'objectif est d'atteindre les 1.8MJ pour 176 lasers. Les lasers se

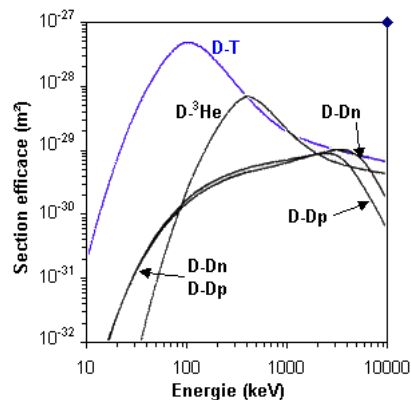


FIGURE 2.1 – Graphique de la section efficace de différents couples de fusion[30]

concentrent sur un temps très court, environ 20 picosecondes, la puissance en watt délivrée est alors de $W = \frac{J}{S} = 9 \cdot 10^{16}$ W. La bille va être soumise à une température d'environ 20 millions de degrés, ce qui va la transformer en plasma comprimé subissant une pression d'environ 1 téra bar, amenant le plasma à une température de 100 à 200 millions de degrés : la bille implose et engendre des réactions de fusion, les noyaux d'hélium vont chauffer le plasma alimentant d'autres réactions. Les neutrons produits sortent du plasma, et vont transmettre leurs énergies à l'enceinte de la chambre à fusion, puis la cible explose après 20 picosecondes (inverse d'implorer) et les réactions de fusion s'arrêtent : on estime à 1/3 la quantité totale de combustible consommée [31].

C'est une expérience difficilement réalisable car il faut distribuer uniformément la puissance sur la bille. La question du coût porte aussi à débat : le laser méga joule était estimé en 1995 à 1.2 milliards d'euro pour 240 lasers, le projet devra s'arrêter à 176 lasers, et pour 48 lasers en 2019, les investissements étaient de 7 milliards d'euros [32].

2.4.2 Fusion à confinement magnétique

Le confinement magnétique consiste à créer un plasma de forte densité dans un tokamak ou un stellarator, qui ne va pas céder son énergie thermique à la paroi qui l'entoure. Le plasma est certes globalement neutre électriquement, mais ses particules ne le sont pas : elles sont contrôlables par un champ électromagnétique : on va ainsi créer une boîte magnétique pour maintenir le plasma : le courant qui parcourt le plasma dans le sens toroïdale, le courant va induire un champ magnétique qui va contribuer au confinement magnétique. On peut ainsi contrôler la forme du plasma à l'aide de la bobine. Au final, les lignes de champs magnétiques ont une forme hélicoïdales.

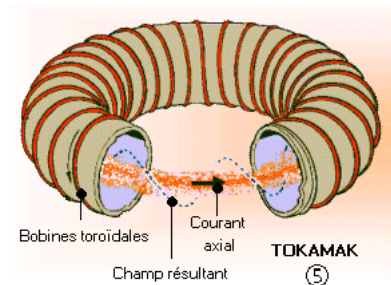


FIGURE 2.2 – Schéma d'un tokamak [33]

Le confinement magnétique ne fonctionne qu'à densité faible, on doit compenser avec une chaleur très élevée, environ 100 à 150 millions de degrés sont nécessaires pour que le deutérium et le tritium aient une énergie cinétique suffisante. De plus, un tore trop petit entraîne un refroidissement trop rapide du plasma, il faut des tores capables d'accueillir 1000 m³ de plasma.

Le courant électrique généré dans le plasma le chauffe par effet joule car il entraîne un déplacement des électrons, mais le plasma est porté à seulement 10 millions de degrés. On peut augmenter la température via des atomes de deutérium accélérés hors du réacteur puis injectés dans le plasma où ils vont céder leur énergie. On peut aussi augmenter l'énergie cinétique des ions et électrons du plasma par micro-ondes. Lorsque le plasma entre dans un rythme "auto-entretenu", les chauffages additionnels ne servent plus qu'à moduler les réactions de fusion.

On sait chauffer du plasma à une telle température de manière stable mais on a un problème d'ingénierie : on a besoin de matériaux résistants au flux de neutrons de manière continue, de plus on doit fournir le réacteur en tritium, impliquant de la fission de lithium.

Le confinement magnétique est du à une force de Laplace créée par le champ magnétique sur le courant, orthogonal au champ magnétique et au courant. Le plasma étant composé d'électrons libres, le courant y circule très bien. Dans un tore, le plasma a tendance à former un poloïde, un cercle aplati le long du petit rayon du tore ce qui entraîne des instabilités : on va compenser ces instabilités avec des champs magnétiques qui tournent autour du tore, au final, les lignes de champs ont une forme poloïdale.

Dans une optique de rendre les réacteurs à fusion techniquement exploitables, il faut avoir un rendement en énergie supérieur à l'énergie dépensée pour déclencher les processus de fusion. Soit Q le rendement, le "breakeven" est atteint pour $Q = 1$: les réactions dégagent autant d'énergie qu'il en faut pour initier la fusion. Cependant, on sait que 80% de l'énergie sort du plasma sous forme de neutrons qui sont absorbés par la paroi : il faut en réalité atteindre un rendement de $Q = 5$ pour que la fusion chauffe le plasma autant que les chauffages additionnels.

ITER est un projet visant à démontrer la fiabilité et la possibilité de créer des plasmas de fusion, étape nécessaire avant de développer des réacteurs à fusion pouvant produire de l'électricité destinée à un usage civil [34] : c'est une association de 35 pays avec un coût initial de 5 milliards d'euros. Le premier plasma est prévu pour 2025 et la première fusion est prévue pour 2035, ITER est situé à Cadarache en France. Après l'exploitation terminée, la centrale sera démantelée et les déchets radioactifs (comme les parois en acier de la chambre qui auront été irradiées) seront traités, l'avantage est que les seuls déchets irradiés ne sont pas des déchets de HAVL comme les actinides mineurs ou le plutonium comme dans la fission : tous les matériaux irradiés seront recyclables ou réutilisables dans les 100 ans après leurs démantèlement [35].

Les problèmes actuels sont surtout de l'ordre de l'ingénierie : les rayonnements de forte intensité risquent d'entraîner une décomposition des matériaux. Il faut aussi un moyen d'évacuer les déchets du tore comme l'hélium ou la poussière due à l'érosion du tore. On peut aussi parler du coût qui aujourd'hui est de 19 milliards d'euros alors qu'il était de 5 milliards au départ.

Conclusion

La question du nucléaire reste un sujet de débats dans la société publique et dans le monde scientifique. L'électro-nucléaire a des défauts notables, la possibilité bien que rare, d'accidents catastrophiques qui peuvent causer des milliers de morts et le fait qu'il émette des déchets qui ont une durée de vie de centaines de milliers d'années. Cependant le nucléaire a l'avantage d'être une source d'électricité décarbonée et ce, contrairement aux sources d'électricité renouvelables, à un haut facteur de charge (le facteur de charge étant le rapport entre l'énergie produite par une centrale et l'énergie produite si la centrale était à sa puissance nominale). Depuis l'accident de Tchernobyl, la puissance installée dans le monde est restée relativement constante avec une très légère augmentation. De nombreux réacteurs sont vieillissants et le renouvellement de ces réacteurs va définir l'avenir du nucléaire.

De plus, le développement éventuel de la fusion nucléaire pourrait conduire à un renouveau de l'énergie nucléaire et redéfinir un nouvel âge de l'atome avec une énergie abondante, décarbonée et sûre.

Bibliographie

- [1] Niels Bohr et John Archibald Wheeler. The mechanism of nuclear fission. 56(5) :426–450. ISSN 0031-899X. doi :10.1103/PhysRev.56.426. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.56.426>.
- [2] IAEA. PRIS - reactor status reports - operational & long-term shutdown - by type. URL <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>.
- [3] NEA. Uranium 2014 : Resources, production and demand. URL https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14916/uranium-2014-resources-production-and-demand?details=true.
- [4] CEA. À quoi ressemble le combustible des réacteurs à eau? URL https://www.cea.fr/Documents/monographies/combustibles-nucl%C3%A9aires_r%C3%A9acteurs-eau.pdf.
- [5] ANDRA. Inventaire national des matières et déchets radioactifs. URL https://www.andra.fr/sites/default/files/2020-02/Andra-MAJ_Essentiels_2020-Web.pdf.
- [6] Cycle du combustible nucléaire : préparation, consommation, traitement. URL <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/cycle-du-combustible-nucleaire>.
- [7] Thomas Watier. Stratégies de cycle mises en oeuvre de par le monde. URL <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CycleCarte.png#/media/File:CycleCarte.png>.
- [8] Paul L Joskow. Comparing the costs of intermittent and dispatchable electricity generating technologies. 101(3) :238–241. ISSN 0002-8282. doi :10.1257/aer.101.3.238. URL <https://pubs.aeaweb.org/doi/10.1257/aer.101.3.238>.
- [9] Jessica R. Lovering, Arthur Yip, et Ted Nordhaus. Historical construction costs of global nuclear power reactors. 91 :371–382. ISSN 0301-4215. doi :10.1016/j.enpol.2016.01.011. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516300106>.
- [10] Anne-Claire Poirier. Nucléaire : la cour des comptes révise à la hausse la facture réelle de l'EPR. URL https://www.liberation.fr/france/2020/07/09/nucleaire-la-cour-des-comptes-revise-a-la-hausse-la-facture-reelle-de-l-epr_1793843. Section : France.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change : Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-41541-6. doi :10.1017/CBO9781107415416. URL <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415416>.

- [12] Nassim Nicholas Auteur du texte Taleb, Nassim Nicholas Taleb, et Christine Rimoldy. Le cygne noir : la puissance de l'imprévisible ([nouvelle éd.]) nassim nicholas taleb ; traduit de l'anglais par christine rimoldy avec la collaboration de l'auteur. URL <http://catalogue.bnf.fr>. Publisher : les Belles lettres (Paris).
- [13] IRSN. La mortalité due à l'accident. URL https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-tchernobyl-1986/consequences-homme-environnement/Pages/9-La_mortalite_due_a_l_accident.aspx.
- [14] Evelyn J. Bromet. Mental health consequences of the chernobyl disaster. 32(1) :N71–N75. ISSN 0952-4746. doi :10.1088/0952-4746/32/1/N71. URL <https://doi.org/10.1088/0952-4746/32/1/N71>. Publisher : IOP Publishing.
- [15] IRSN. Bilan de la surveillance sanitaire et des études épidémiologiques conduites chez les habitants de la préfecture de fukushima. URL https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/IRSN_NI-Fukushima-sante-habitants-202003.pdf.
- [16] Masaharu Maeda et Misari Oe. Mental health consequences and social issues after the fukushima disaster. 29(2) :36S–46S. ISSN 1010-5395. doi :10.1177/1010539516689695. URL <https://doi.org/10.1177/1010539516689695>. Publisher : SAGE Publications Inc.
- [17] CRIIRAD. Compte rendu de mission à ARLIT / NIGER du 3 au 11 décembre 2003. URL <http://www.criirad.org/actualites/communiqués/niger/notecriiradfinal.pdf>.
- [18] IRSN. Bassin versant de la dordogne : un constat pilote a mesuré l'impact environnemental des anciennes mines d'uranium. URL https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Pages/20160526_Bassin-Dordogne-constat-pilote-mine-uranium-ouverture-societe.aspx.
- [19] Ökologieinstitut. Radio-ecological investigations in the surroundings of MAPE uranium ore processing plant near ceske budejovice in southern bohemia. URL <http://www.wise-uranium.org/ugpmape.html>.
- [20] IRSN. Les différents types de déchets radioactifs. URL https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/dechets-radioactifs/gestion-stockage-dechets-radioactifs/Pages/1-dechets-radioactifs-differents-types.aspx.
- [21] Radioactivite : Aval du cycle. URL https://www.laradioactivite.com/site/pages/Aval_Cycle_Nucleaire.htm.
- [22] Radioactivite : Transmuter quoi? URL <https://www.laradioactivite.com/site/pages/TransmuterQuoi.htm>.
- [23] IRSN. La séparation/transmutation des déchets à vie longue. URL https://www.irsn.fr/dechets/cigeo/Documents/Fiches-thematiques/IRSN_Debats-Public-Cigeo_Fiche-Transmutation.pdf.
- [24] IRSN. Le stockage en couche géologique profonde en france. URL <https://www.irsn.fr/dechets/dechets-radioactifs/Pages/stockage-france.aspx>.
- [25] Construction et risques sismiques. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-risques-sismiques>.

- [26] IRSN. Le stockage en couche géologique profonde à l'international. URL <https://www.irsn.fr/dechets/dechets-radioactifs/Pages/stockage-international.aspx>.
- [27] CIGEO. Chiffres clés de cigéo et du stockage des déchets nucléaires \textbar sur cigéo - centre d'informations et de ressources. URL <https://www.cigeo.gouv.fr/chiffres-cles-de-cigeo-et-du-stockage-des-dechets-nucleaires-135>.
- [28] IAEA. PRIS - reactor status reports - under construction - by type. URL <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByType.aspx>.
- [29] Henry Sokolski, John Stephenson, Peter Tynan, M. V. Ramana, Zia Mian, A. H. Nayyar, R. Rajaraman, Charles D. Ferguson, Richard Speier, et George Perkovich. Gauging u.s.-indian strategic cooperation :. doi :10.21236/ADA463365. URL <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA463365>.
- [30] Fusion magnétique : grands principes. URL <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/fusion/principes/principes01.htm>.
- [31] CEA. Le laser : un concentré de lumière. URL <https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/livrets-thematiques/CEA-Laser.pdf>.
- [32] Simulation nucléaire : la guerre des étoiles. URL <https://www.lesechos.fr/2016/02/simulation-nucleaire-la-guerre-des-etoiles-202844>.
- [33] CEA. Fusion magnétique : grands principes. URL <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/fusion/principes/principes02.htm>.
- [34] Les objectifs d'ITER. URL <http://www.iter.org/sci/goals>.
- [35] ITER. ITER et la sûreté. URL <http://www.iter.org/mach/safety>.
- [36] Jean-Louis Bobin. *La fusion thermonucléaire contrôlée*. Une introduction à. EDP sciences. ISBN 978-2-7598-0573-0.
- [37] Commissariat à l'énergie atomique (France). *La neutronique*. Le Moniteur : CEA. ISBN 978-2-281-11371-6. OCLC : 862741695.
- [38] Dominique Grenèche. *Histoire et techniques des réacteurs nucléaires et de leurs combustibles*. QuinteSciences. EDP sciences. ISBN 978-2-7598-1977-5.