

Par Florian Veslin

Florian Veslin est diplômé de Sciences Po Paris en Finance et Stratégie. Il est actuellement Manager Marketing et Stratégie chez Orano Japan (Tokyo).

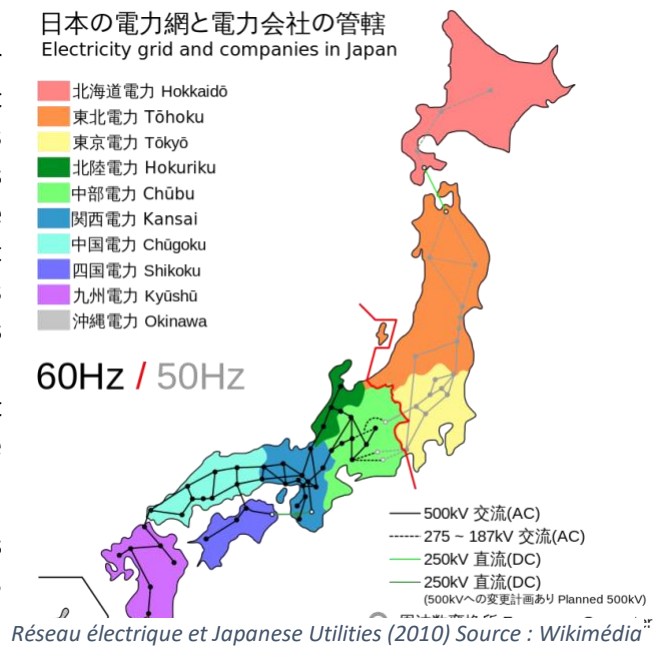
Le 11 mars 2021, le Japon commémorera le dixième anniversaire de la catastrophe de Fukushima. A cette occasion, les questions liées à la politique énergétique de l'Archipel et plus généralement à la place et au rôle du nucléaire vont sans doute ressurgir avec force dans le débat public, y compris en France. L'accident de 2011 a profondément modifié la trajectoire de l'industrie nucléaire mondiale, provoquant une crise de confiance pendant plusieurs années parmi les décideurs politiques et l'opinion publique. A présent que nous bénéficions d'un recul sur la catastrophe, ses conséquences et les changements stratégiques induits, nous dresserons ici un bilan de l'énergie nucléaire au Japon, dix ans après Fukushima, alors même que le Premier ministre Suga a annoncé, lundi 26 octobre lors d'une session extraordinaire de la Diète, son ambition de faire du Japon une société neutre en carbone en 2050.

Introduction

Un réseau électrique isolé et à double fréquence

Le Japon a plusieurs spécificités qui doivent être introduites avant que nous nous concentrons sur l'énergie nucléaire. Tout d'abord, le réseau électrique est **totalelement isolé**. L'Archipel n'a aucun lien avec ses voisins, même le plus proche, la Corée du Sud (les grandes villes de Fukuoka côté japonais et Busan côté coréen ne sont pourtant distantes que de 200 km environ ; cet isolement n'est pas dû à des difficultés techniques mais politiques). Le Japon ne pouvant se reposer sur des interconnexions pour palier une baisse de production ou une hausse de la demande, la génération d'électricité doit toujours être suffisamment forte et aisément pilotable pour éviter les *black-out*.

En addition à cela, de graves problèmes structurels limitent les échanges électriques entre les différentes régions ; le **Japon est coupé en deux pour ses fréquences** : l'est est à 50Hz et l'ouest est à 60Hz, cas unique dans un pays industrialisé. Les différents réseaux agissent dans une relative indépendance, n'étant



reliés que par trois convertisseurs de fréquences, et seulement entre les régions de Chūbu (centre, région de Nagoya) et du Kantō (aire urbaine de Tōkyō), d'une capacité de 1,2 GW (voir annexes pour les unités de l'énergie). Et même parmi les régions utilisant la même fréquence, les échanges peuvent être problématiques, comme entre Honshū et l'île septentrionale d'Hokkaidō : deux uniques lignes existent, d'une capacité de 0,9 GW. Enfin, Okinawa est totalement isolée du réseau principal¹. Cette séparation de l'Archipel en deux et l'interconnexion très limitée s'expliquent par la structure du marché de l'électricité au Japon.

Un réseau national fragile à cause de monopoles régionaux

En effet, dans chacune des dix grandes régions du pays, un producteur/fournisseur d'électricité (appelés *Japanese Utility*) a été historiquement en situation de monopole. Ainsi, jusqu'à récemment, chaque Japanese Utility s'occupait de son réseau, sans ressentir la nécessité de s'intégrer à celui de son voisin. Du nord au sud, nous trouvons **Hokkaidō EPCO**, **Tōhoku EPCO**, **Tōkyō EPCO**, **Hokuriku EPCO**, **Chūbu EPCO**, **Kansai EPCO**, **Chūgoku EPCO**, **Shikoku EPCO**, **Kyūshū EPCO** et **Okinawa EPCO**. Sans enracinement géographique, citons **EPDC (J-power)** et le cas très spécifique de **JAPCO**, qui ne possède en tout et pour tout que deux centrales nucléaires (Tsuruga et Tokai) et qui a servi à lancer le développement de réacteurs nucléaires japonais pour l'exportation. Cette régionalisation du réseau japonais a eu de lourdes conséquences après le tsunami du 11 mars 2011 et l'accident de Fukushima, car les régions les plus touchées par la perte de centrales électriques n'ont pas pu être correctement approvisionnées en électricité². Cela a entraîné une remise en question du découpage territorial qui s'est traduit par un renforcement des connexions et une libéralisation du marché de l'électricité³.

L'ouverture à la concurrence : affaiblissement des acteurs historiques, dynamisme des petits producteurs

Aujourd'hui, les Japanese Utilities ne sont plus circonscrites à une seule région, et depuis 2012, on assiste à une multiplication de petits producteurs d'électricité, généralement renouvelable, souvent sous-traitants pour les grands acteurs historiques⁴. Ces nouveaux entrants ont vendu pour 112,3TWh d'électricité en 2018, le triple de leur niveau de 2015 (et 12% du total d'électricité produite) ; dans le même temps, leur nombre est passé de 70 à 600. En 2017, 344 compagnies vendaient moins de 0,1TWh d'électricité, quand seulement 12 en vendaient plus de 1TWh. L'ouverture à la concurrence et les pertes de parts de marché qui en ont résulté, ainsi que de nouvelles contraintes légales, ont obligé les opérateurs historiques à réaliser des mutations profondes ; par exemple, Tokyo EPCO a été réorganisé en holding, contrôlant trois entités distinctes : génération (soumise à concurrence), distribution (monopole) et vente (soumise à concurrence).

Le nucléaire japonais, pierre angulaire de la stratégie énergétique jusqu'en 2011

En 2010, 54 réacteurs nucléaires produisaient 47,4GWe d'électricité, soit environ 30% de la génération totale d'électricité dans le pays. Trois autres réacteurs étaient en construction (2,9GWe), et une douzaine d'autres (15,9GWe) étaient envisagés. Le plan stratégique énergétique du Japon de 2010 prévoyait qu'en

¹ Japan's energy 2019, Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Agency for Natural Resources and Energy

² <https://www.japantimes.co.jp/news/2011/07/19/reference/japans-incompatible-power-grids/>

³ <https://www.tepco.co.jp/en/corpinfo/ir/kojin/jiyuka-e.html>

⁴ <https://www.eubusinessinjapan.eu/sectors/energy/renewable-energy>

2030, les sources de production bas carbone (renouvelables et nucléaires) produiraient environ 70% de l'électricité du pays, dont 50% venant du nucléaire⁵.

Tous les grands producteurs nippons avaient alors leur centrale nucléaire, excepté Okinawa EPCO et EPDC (ce dernier ayant néanmoins un réacteur en construction). Tokyo EPCO (TEPCO) possédait trois sites : **Kashiwazaki-Kariwa**, la plus grande centrales du monde avec 7 réacteurs et 8.212 MW de puissance installée totale⁶, **Fukushima Daiichi** avec 6 réacteurs et 4.546 MW de puissance installée totale, et **Fukushima Daini** avec 4 réacteurs et 4.400MWe de puissance installée totale. Kansai EPCO possédait également 3 sites (**Ohi**, **Mihama** et **Takahama**), JAPCO en avait deux (**Tsuruga** et **Tokai**), de même que Kyūshū EPCO (**Genkai** et **Sendai**) et Tōhoku EPCO (**Onagawa** et **Higashidori**). Enfin, Hokuriku EPCO avait une centrale (**Shika**), comme Chūgoku EPCO (**Shimane**), Shikoku EPCO (**Ikata**) et Hokkaidō EPCO (**Tomari**).

Le régulateur japonais, une clé de voûte défaillante

Le régulateur japonais de l'énergie atomique, instauré dès 1957, a connu plusieurs restructurations au fil des ans qui n'ont jamais permis de le rendre pleinement efficient. Etabli comme un comité administratif, son spectre d'actions trop réduit l'empêche de prévenir l'accident du Mutsu de 1974. Refondé en 1978 sous l'autorité du Premier ministre, il est de nouveau défaillant lors de l'accident de criticité de JCO en 1999 qui cause la mort de deux personnes et entraîne un rejet radioactif. Le régulateur est alors de nouveau refondé sous le nom de NISA (*Nuclear and Industrial Safety Agency*) et placé sous le contrôle du Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie (METI). Cette dépendance du régulateur à l'organe gouvernemental chargé de faire la promotion de l'énergie nucléaire a été sévèrement critiquée, pointant les risques évidents de conflits d'intérêts. Par ailleurs, de graves problèmes de communication entre les agences étatiques empêchaient la NISA d'être correctement informée sur les recherches scientifiques récentes, notamment un rapport de décembre 2010 de la *Japanese Nuclear Energy Safety Organization* (JNES) sur les probabilités statistiques de tsunami sur les centrales nucléaire et leurs conséquences⁷.

⁵ *Impacts of the Fukushima Daiichi Accident on Nuclear Development Policies*, OECD

⁶ <https://www.power-technology.com/projects/kashiwazaki/>

⁷ https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-12090-4_14

I. L'accident de Fukushima : un coup d'arrêt brutal pour le secteur nucléaire

1.1. Quelles causes pour quelles conséquences ?

Une centrale vieillissante aux normes de sécurité obsolètes

La centrale de Fukushima Daiichi est située dans la préfecture de Fukushima, sur les communes d'Okuma et de Futaba. Conçue à la fin des années 1960, exploitée par TEPCO, le premier réacteur est relié au réseau électrique en 1971. Cinq autres réacteurs sont ajoutés, entre 1974 et 1979. Le site est divisé en deux parties distinctes, géographiquement espacées d'une centaine de mètres avec, d'un côté les réacteurs 1 à 4, de l'autre les réacteurs 5 et 6. Les six réacteurs sont basés sur la même technologie BWR (réacteur à eau bouillante, voir II. 1.), conçus par Hitachi et General Electric. Lors de la conception de la centrale, le risque de raz-de-marée avait été établi en fonction des données recueillies après le séisme du Chili de 1960, qui avait provoqué un tsunami de 3 mètres de hauteur sur la côte du Tōhoku. En conséquence, la centrale avait été construite 10 mètres au-dessus du niveau de la mer, et les mesures anti-tsunami étaient calibrées pour une vague n'excédant pas 5,7 mètres⁸. A cette époque, la menace des groupes terroristes d'extrême-gauche au Japon (Armée Rouge Unifiée) avait poussé la direction de TEPCO à focaliser les défenses de la centrale contre une menace humaine, la catastrophe naturelle paraissant trop peu probable. Pourtant, en 1993, de nouvelles recherches scientifiques avaient conclu à la possibilité que le site puisse être touché par une vague de 15,7 mètres. Toutefois, ni TEPCO, ni la NISA n'avaient engagé le renforcement des mesures de sécurité ou changé de place les générateurs de secours, installés dans le sous-bassement de la centrale et donc très vulnérables en cas d'inondation.

Le tsunami du 11 mars, point de rupture pour l'industrie nucléaire nipponne

Le 11 mars 2011, à 14h46m23s (heure locale), un séisme de magnitude 9,1 se produisit au large du Tōhoku, dans le nord-est du Japon⁹. Ce tremblement de terre provoqua un tsunami, dont les vagues de plus de 10 mètres de haut déferlèrent sur toute la côte, atteignant même Sendai, la plus grande ville de la région¹⁰. Les centrales nucléaires japonaises s'arrêtèrent automatiquement, suivant la réglementation. A Fukushima Daiichi, les réacteurs 1,2 et 3 étaient en fonctionnement, à l'inverse des réacteurs 4, 5 et 6, à l'arrêt pour maintenance. Le tremblement de terre ayant provoqué la perte des alimentations électriques externes, les générateurs de secours à moteur diesel ont pris le relais pour faire fonctionner les pompes de refroidissement (afin de maintenir à basse température le combustible nucléaire). Dans le même temps, la réaction en chaîne au cœur des réacteurs était mise à l'arrêt par l'insertion des grappes de commande qui absorbent les neutrons. Cinquante-cinq minutes après le séisme, un tsunami d'une hauteur de 15 mètres touchait la centrale. La vague du 11 mars 2011 passa outre les digues et déferla sur la centrale, noyant les générateurs de secours et détruisant les routes alentours, coupant la centrale du reste du monde¹¹. Sans refroidissement, les cœurs entrent en fusion partielle, produisant de l'hydrogène ne pouvant être évacué et entraînant plusieurs explosions : le 12 mars dans le réacteur 1, puis le 14 mars

⁸ https://www.world-nuclear-news.org/RS_Fukushima_faced_14-metre_tsunami_2303113.html

⁹ https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20110311054624120_30/executive#executive

¹⁰ https://www.lemonde.fr/planete/article/2011/03/11/alerte-au-tsunami-apres-un-seisme-d-une-magnitude-de-7-9-au-japon_1491449_3244.html

¹¹ <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident.aspx>

dans le réacteur 3 et enfin le 15 mars dans le réacteur 2 (pour approfondissement, voir annexes). Des éléments radioactifs produits par la fusion des cœurs sont relâchés dans l'atmosphère, mais l'enceinte de confinement du réacteur n'est que faiblement touchée. La plus forte contamination est provoquée par le rejet du réacteur 2, car ce jour-là le vent soufflait vers l'intérieur des terres (nord-ouest) et il pleuvait et neigeait. Un incendie survenant le 15 mars dans les piscines combustibles de l'unité 4 dégage de nouveaux produits radioactifs.¹² Contrairement à Tchernobyl, les rejets radioactifs ne forment pas un « nuage » mais un « panache » : les émissions, peu denses, sont relâchées sur un temps plus long, diminuant grandement les conséquences sanitaires. Le gouvernement japonais évacue les populations dans un rayon de 20 kilomètres autour de la centrale, et doit gérer de concert les conséquences d'un tsunami catastrophique ayant fait plus de 18.000 victimes et ayant dévasté toute la côte du Tōhoku, et un accident nucléaire. Il convient ici de rappeler que l'accident de Fukushima est très différent de celui de Tchernobyl : dans la centrale ukrainienne, il n'y avait pas d'enceinte de confinement et l'incendie a duré 12 jours. Les rejets d'iodes et de tellure de Fukushima sont dix fois inférieurs à ceux de Tchernobyl. Pour les césiums, il y a eu 3 fois moins de rejets à Fukushima.¹³ Également, la technologie des deux centrales est très peu semblable (Réacteur à eau bouillante BWR pour Fukushima, Réacteur de puissance à tube de force RBMK pour Tchernobyl).

1.2. Une perte de confiance durable de la part de la société japonaise

Une opinion publique réceptive aux thèses anti-nucléaires

Fortement marquée par les bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki, la société japonaise est historiquement réceptive aux groupes japonais anti-nucléaires, qui combattaient à la fois nucléaire militaire et civil. En 1975, le *Hangenpatsu Undō Zenkoku Renraku kai* (National Liaison Conference of Anti-Nuclear Movements) initie la publication du *Hangenpatsu Shinbun*, le *Journal Anti-nucléaire*¹⁴. Dans les années 90, plusieurs incidents survenus dans des centrales érodent la confiance du public, dont les accidents de Mihama¹⁵ et de l'usine de Tokaimura¹⁶. Au milieu des années 2000, la construction de l'usine de traitement de Rokkasho, dans l'extrême nord de Honshū, avait rencontré une opposition qui a ensuite disparu. Après l'accident de Fukushima, l'opinion publique japonaise se détourne très massivement de l'énergie nucléaire. En novembre 2014, un sondage commandé par la *Japan Atomic Energy Relations Organization* (JAERO) montre que seulement 1,3% des Japonais souhaitent une augmentation de la capacité nucléaire du pays, et 64% demandent une sortie progressive ou immédiate du nucléaire¹⁷. Depuis Fukushima, les anti-nucléaires sont très largement majoritaires dans le débat public nippon.

Un gouvernement silencieux, une classe politique divisée

Le gouvernement actuel, mené par le Parti Liberal-Démocrate (PLD, droite), ne soutient que discrètement l'industrie nucléaire, par peur de s'aliéner son électorat. L'opposition, elle, est unie dans son

¹² <https://www.laradioactivite.com/site/pages/Fukushima.htm>

¹³ <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-accidents-comparaison-tchernobyl-fukushima/Pages/1-impact-environnemental-fukushima-tchernobyl.aspx#.X83hEogzYdU>

¹⁴ https://www.researchgate.net/publication/319548038_Antinuclear_Movement_in_Japan

¹⁵ https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiqués_et_dossiers_de_presse/Pages/accident_Mihama_tranche_3.aspx#.X9Hp6ogzblU

¹⁶ https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiqués_et_dossiers_de_presse/Pages/tokaimura_point_accident_0999.aspx#.X9HqY4gzblU

¹⁷ <https://www.jaif.or.jp/en/japanese-opinion-poll-finds-that-views-on-nuclear-power-turn-slightly-positive/>

rejet de l'énergie nucléaire. Même au sein du PLD, certains s'en détournent, comme l'ancien Premier ministre Jun'ichiro Koizumi et son fils Shinjirō Koizumi, l'actuel ministre de l'écologie, ou encore le ministre de la réforme administrative en poste, Tarō Kōno. A noter également que le peu d'intérêt que suscitent les questions environnementales dans la société japonaise rend difficile la mise en valeur du bilan bas-carbone de l'énergie atomique.

1.3. Des conséquences sur les filières nucléaire et électrique

Tokyo EPCO, alors la plus importante compagnie électrique privée du monde, rendue insolvable par l'accident, est nationalisée le 27 juin 2012 pour assurer l'indemnisation des populations déplacées et des entreprises touchées¹⁸. Le coût direct de l'accident oscille entre 80 et 200 milliards d'euros. La catastrophe a également un coup économique pour tous les Japonais : les 300TWh nucléaires, produits à un coût de 50€/MWh, doivent être remplacés par des énergies fossiles au coût de 150€/MWh environ, soit une surfacturation de l'ordre de 30 milliards d'euros¹⁹.

Dans l'immédiat post-Fukushima, pour permettre la survie d'un réseau soumis à de très fortes contraintes, le gouvernement a lancé la campagne « setsuden²⁰ » (*économie d'électricité* en français) afin d'empêcher des coupures de courant durant l'été 2011 (à l'inverse de l'Europe, l'été japonais est très demandeur d'électricité à cause de l'utilisation intensive des climatiseurs pour faire face à la chaleur écrasante). Cette opération a été un succès, mais son souvenir est toujours vif parmi les Japonais.

Des régulateurs décrédibilisés

Dès avril 2011, le gouvernement japonais décide de geler toute nouvelle construction de centrale nucléaire. Les réacteurs existants sont progressivement fermés pour maintenance. La NISA et la NSC, organes régulateurs, et l'AEC (*Atomic Energy Commission*) qui dirigeait la politique nucléaire japonaise, sont complètement décrédibilisés alors que des manquements graves à la sécurité sont mis à jour ; elle est dissoute et un nouveau régulateur, la NRA (Agence de Sûreté Nucléaire) est créé *ad hoc*²¹. A l'inverse de son prédécesseur, la NRA est une administration externe, rattachée au ministère de l'environnement. La loi de création de la NRA établit que la NRA exerce son autorité en toute indépendance, en adoptant un point de vue neutre et équitable sur la base de son expertise technique. La NRA est responsable de la réglementation de la sûreté et de la sécurité nucléaires, de la réglementation de l'utilisation de rayonnement ionisant et de la préparation aux situations d'urgence nucléaire²².

Des constructeurs japonais sans horizon

Pour les constructeurs japonais de centrales nucléaires, Mitsubishi Heavy Industries, Hitachi et Toshiba, l'arrêt brutal des constructions est très pénalisant, même si la filière nucléaire de ces trois grands conglomérats n'est pas prépondérante parmi leurs activités. C'est Toshiba qui est le plus touché, car l'entreprise avait racheté en 2006 le géant américain Westinghouse ; la disparition du marché nippon et les déboires de Westinghouse dans la construction des réacteurs de troisième génération (réacteur

¹⁸ https://www.lemonde.fr/japon/article/2012/06/27/tepcu-qui-gere-la-centrale-de-fukushima-nationalisee-par-le-japon_1725037_1492975.html

¹⁹ http://i-tese.cea.fr/_files/Lettreltese16/ImpactsEcoFukushima.pdf

²⁰ <https://www.theguardian.com/environment/2011/aug/22/energy-saving-setsuden-japan-fukushima>

²¹ https://www.nsr.go.jp/english/e_nra/idea.html

²² <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/fr/japon.pdf>

AP1000) dus à une perte de compétences, a contraint Toshiba à déprécier fortement ses actifs, avant de se résoudre à mettre en faillite l'entreprise américaine. Dans le même temps, en 2015, un scandale d'irrégularités comptables chez Toshiba sème le trouble quant à la pérennité de la société²³. En décembre 2020, les entreprises japonaises ne sont plus impliquées dans aucun projet de centrale à l'étranger, depuis le retrait d'Hitachi du projet gallois Wylfa Newydd²⁴.

Une hausse des prix de l'électricité

L'arrêt du parc nucléaire a également eu de fortes répercussions sur les prix de l'électricité dans l'Archipel. Entre 1995 et 2010, le coût de l'électricité avait été en constante diminution, diminuant de 17JPY/kWh à 13,65JPY/kWh pour l'industrie et de 24,5kWh à 20,37JPY/kWh pour les résidences. La nécessité de financer la construction en urgence de nouvelles centrales et la forte proportion de coûts variables induite par les énergies fossiles a entraîné une hausse de 25,2% du prix de l'électricité pour les particuliers entre 2010 et 2014 (de 20,37JPY/kWh à 25,51JPY/kWh) et de 38,2% pour les entreprises (de 13,65JPY/kWh à 18,86JPY/kWh). Dans le même temps, entre 2010 et 2014, la demande d'électricité est passée de 906TWh à 823 TWh, soit une diminution de 12%.

²³ <https://www.lecho.be/entreprises/technologie/gros-scandale-chez-toshiba/9656796.html>

²⁴ <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/le-grand-malaise-du-nucleaire-britannique-1249785>

II. Les centrales nucléaires et le cycle du combustible au Japon

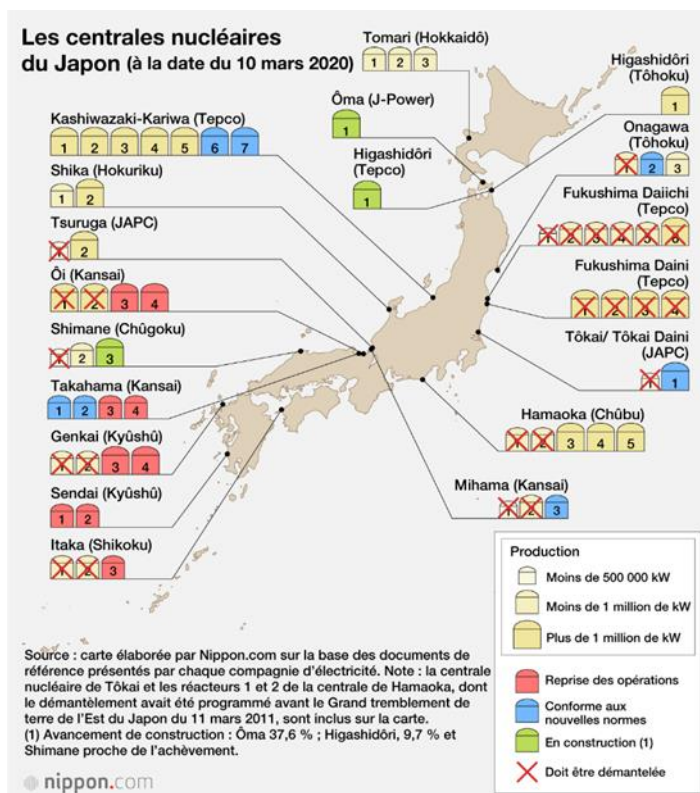
2.1. Les types de centrales : le choix de la diversité

A l'inverse de la France, le Japon a fait le choix de recourir à différents constructeurs et différentes technologies pour ses centrales nucléaires. Pour rappel, et de manière très schématique, un réacteur nucléaire chauffe de l'eau grâce à la chaleur dégagée par la réaction en chaîne se produisant dans le combustible nucléaire. Cette eau se transforme en vapeur et met en action un alternateur produisant de l'électricité. **Ainsi, une centrale nucléaire n'émet directement aucun rejet carboné (CO₂)**. L'impact carbone de la filière nucléaire dans son ensemble génère **12gCO₂/kWh** d'après le GIEC (moyenne mondiale), **6gCO₂/kWh** d'après l'ADEME (France). Pour comparaison, l'éolien terrestre produit 14,1gCO₂/kWh et le photovoltaïque, 55gCO₂/kWh (France)²⁵.

La première centrale nipponne était issue d'un transfert de technologie : un réacteur britannique dit graphite-gaz Calder Hall de 166MWe. L'Archipel va ensuite développer les deux grands types de technologies existants dans le monde, à savoir les réacteurs à eau bouillante (BWR) et les réacteurs à eau pressurisée (PWR), qui font partie de la deuxième génération de réacteurs nucléaires²⁶ (voir annexes). Au Japon en 2011, 28 réacteurs sont des BWR, 24 sont des PWR et 4 sont des ABWR (réacteur de 3^e génération, variante avancée des BWR)²⁷. Ces centrales sont construites par trois fabricants japonais : Mitsubishi Heavy Industries (MHI) est spécialisé dans la conception de réacteurs à eau pressurisée, quand ses concurrents Hitachi et Toshiba se concentrent sur les réacteurs à eau bouillante. Certains réacteurs sont construits en formant des partenariats, comme les 5 réacteurs de la centrale de Hamaoka construits à la fois par Toshiba et Hitachi.

2.2. Le traitement du combustible utilisé au Japon : la volonté de « fermer le cycle »

La vaste flotte de réacteurs nucléaires avait conduit le Japon à envisager la construction d'une usine de traitement du combustible nucléaire usé. Pour rappel, le combustible utilisé dans les centrales nucléaires contient environ 4% d'uranium 235 fissile (pouvant se scinder en libérant une grande quantité d'énergie sous un flux de neutron), le reste étant de l'uranium 238. Si l'uranium 235 est fissile, l'uranium 238, bien plus abondant à l'état naturel, est lui « fertile » : il peut donner des éléments fissiles après capture de neutron. En sortie de réacteur, dans le combustible usé, il reste encore l'essentiel de l'uranium 238, une



²⁵ https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?renouvelable.htm

²⁶ https://www.laradioactivite.com/site/pages/Reacteurs_Generation_II.htm

²⁷ <https://www.asn.fr/Lexique/A/ABWR>

partie de l'uranium 235 ainsi que des produits de fissions (xénon, krypton, iode, strontium, césium, tellure...), du plutonium et des actinides mineurs²⁸. Le combustible utilisé n'est donc pas un déchet. À l'inverse, les produits de fission et les actinides mineurs sont eux considérés comme des déchets ultimes, et sont vitrifiés et stockés²⁹. Le traitement du combustible utilisé présente un triple intérêt :

- Recyclage de matières énergétiques (uranium et plutonium), avec 96% de la matière valorisable
- Simplification de l'entreposage (provisoire) ou du stockage (définitif) des déchets non valorisables qui sont isolés et conditionnés pour en réduire le volume d'un facteur 5
- Réduction par 10 de la toxicité à long terme des déchets ultimes.

Le MOX, un combustible recyclé aux multiples avantages

L'usine prévue par le Japon devait également permettre la production de **combustible MOX** à partir du combustible utilisé. Le MOX (Mélange d'Oxydes, ou Mixed Oxides) est un mélange d'oxyde d'uranium (93%) et d'oxyde de plutonium (7%). Ce combustible permet de réutiliser le plutonium produit par les centrales et donc d'en limiter la quantité, tout en réduisant la toxicité à long terme et en permettant des économies importantes d'uranium enrichi et donc d'uranium naturel³⁰. Au Japon en décembre 2020, 4 réacteurs ayant redémarré peuvent utiliser du combustible MOX : Takahama 3 et 4, Genkai 3, Ikata 3. Plusieurs autres réacteurs MOX sont actuellement à l'arrêt mais sont susceptibles de redémarrer dans les années à venir. Le réacteur en construction d'Ohma sera, lui, le premier au monde à pouvoir fonctionner à 100% au MOX.

Parvenir à fermer le cycle : les nombreuses difficultés du Japon

Dans les années 1970, le Japon lance la construction de sa première usine de traitement du combustible nucléaire à Tokai, avec le concours de la France (SGN). Tokai RPP est en activité entre 1983 et 2006. Rapidement, le besoin d'une usine de traitement de génération plus avancée se fait sentir. La construction de cette nouvelle usine, inspirée de celle de La Hague (Normandie), commence en 1993, sur le territoire de la commune de Rokkasho situé dans la préfecture d'Aomori, tout au nord de l'île principale de Honshū. Le site doit couvrir tout le cycle du combustible, avec une usine d'enrichissement de l'uranium, un centre de stockage des déchets radioactifs, un centre de stockage temporaire des déchets radioactifs de haute activité et une usine de traitement des combustibles usés. À l'origine, la fin des travaux était prévue pour 1997, mais en décembre 2020, l'usine n'est toujours pas terminée, bien que certaines parties soient entrées en fonctionnement dans le courant des années 2000, avant la mise à l'arrêt totale du site suite au séisme de 2011. Les premiers retards sont dus à des difficultés techniques pour la maîtrise de technologies clés, notamment la vitrification. Ces problèmes opérationnels découlaient de la volonté japonaise de développer son propre procédé de vitrification à partir des travaux préliminaires de l'usine de Tokai plutôt que de procéder à un transfert de technologie avec la France, comme cela avait été le cas pour tous les autres éléments du site, eux en état de fonctionner³¹. Puis, après l'accident de Fukushima de 2011, le renforcement des mesures de sécurité pour être en conformité avec les nouveaux standards de sûreté

²⁸ <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/dossier-cycle-du-combustible-nucleaire.aspx?Type=Chapitre&numero=1#:~:text=Le%20C2%AB%20cycle%20ferm%C3%A9%20C2%BB%20con siste%20C3%A0,ultimes%2C%20sont%20vitrifi%C3%A9s%20et%20stock%C3%A9s.>

²⁹ <https://www.sfen.org/rgn/vitrification-dechets-radioactifs-procede-francais>

³⁰ <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/combustible-mox>

³¹ <https://thediplomat.com/2016/04/why-japans-rokkasho-nuclear-reprocessing-plant-lives-on/>

post-Fukushima a obligé le site à subir de lourds travaux d'aménagement. En juillet 2020, le dossier de sûreté de l'usine de traitement a été validé par la NRA, suivi de peu par l'approbation du plan de construction. Le 9 décembre 2020, la NRA a annoncé que l'usine MOX répondait aux nouvelles normes de sécurité. Le site dans sa totalité devrait être mis en service en 2024, et à partir de cette date, pourrait traiter 800 tonnes de combustibles usés par an. En l'absence d'usine fonctionnelle au Japon, du combustible usé a été envoyé en France et en Angleterre pour traitement. Depuis plusieurs années, seul l'entreposage se poursuit dans ces deux pays.

L'avenir des déchets à vie longue nippons

Le Japon cherche également à bâtir un site de stockage géologique profond pour les déchets ultimes vitrifiés. En octobre 2020, deux villages ont fait part de leur intérêt pour abriter une telle installation : Suttu-cho et Kamoenai-mura, tous deux situés à Hokkaidō. Actuellement, des discussions sont en cours entre le gouvernement et ces deux municipalités. La préfecture de Hokkaidō est, elle, peu favorable au projet : il y a déjà sur l'île, à Horonobe, un centre de recherche et développement sur le stockage géologique profond, et la condition pour que cette installation ait vu le jour avait été que le site de stockage final ne se fasse pas à Hokkaidō...

2.3. Etat actuel du parc : entre démantèlement et redémarrage progressif

Toutes les centrales nucléaires japonaises ont été arrêtées peu après la catastrophe de Fukushima. Le redémarrage est conditionné à une série de vérifications et de travaux de mises aux normes dans les centrales. Trois revues sont menées en parallèle :

- L'opérateur doit requérir l'examen de sa demande de modification du réacteur pour les mises aux normes, avec une revue des conséquences d'un tremblement de terre et d'un tsunami, et une analyse des installations de la centrale. Ces examens faits, des amendements peuvent être réalisés, puis une consultation publique est lancée et enfin, éventuellement, la permission de redémarrage est accordée.
- Dans le même temps, un examen du plan de construction des travaux est réalisé, soumis lui aussi à approbation
- Enfin, des examens de spécifications techniques sont lancés.

A noter que la centrale doit également recevoir l'accord des autorités locales : mairie et préfecture.

Toutes ces vérifications incluent des analyses poussées du sous-sol de la centrale pour évaluer les risques sismiques, les calculs des capacités maximales d'accélération sismiques que peut subir la centrale, la réalisation de lourds travaux d'amélioration des normes de sécurité et de mise en place de dispositifs de contre-terrorisme... Ainsi, la découverte d'une faille active sous l'unité 2 de la centrale de Tsuruga rend son redémarrage très peu plausible. Enfin, notons que les citoyens peuvent contester en justice le redémarrage, comme c'est le cas actuellement pour le réacteur 3 de la centrale d'Ikata : la cour de Hiroshima a estimé que les procédures en cas d'éruption du mont Aso, distant de 130 kilomètres, sont insuffisantes³². La sécurité des centrales nucléaires japonaises et les mesures préalables au redémarrage sont si draconiennes que moins d'une dizaine de réacteurs ont pu redémarrer depuis 2011, à savoir :

³² <https://english.kyodonews.net/news/2020/01/81a6d2056fee-shikoku-electric-not-to-appeal-injunction-over-ikata-nuclear-plant.html>

- Takahama 3 et 4
- Ohi 3 et 4
- Ikata 3
- Genkai 3 et 4
- Sendai 1 et 2

En 2010, 3 réacteurs étaient en démantèlement, celui de Tokai 1 (1998) et ceux de Hamaoka 1 et 2 (2009). Après 2011, les opérateurs ont choisi d'arrêter définitivement 21 autres réacteurs :

- Fukushima Daiichi 1, 2, 3, 4 (2012), 4 et 6 (2018)
- Fukushima Daini 1, 2, 3, 4 (2019)
- Onagawa 1 (2018)
- Mihama 1 et 2 (2014)
- Ohi 1 et 2 (2017)
- Shimane 1 (2014)
- Ikata 1 (2017) et 2 (2018)
- Genkai 1 (2016) et 2 (2019)
- Tsuruga 1 (2014)

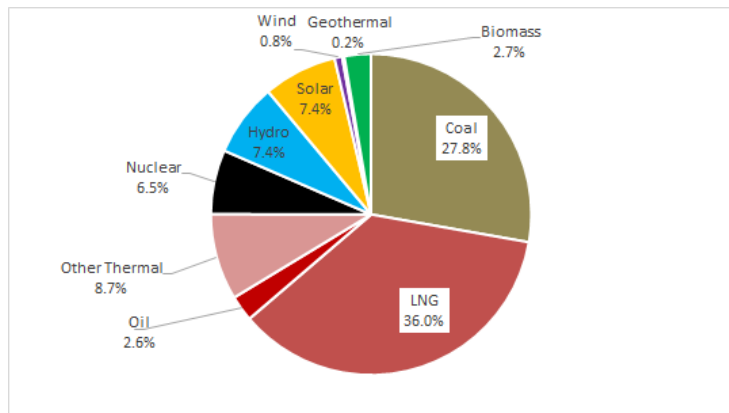
Ces réacteurs vont être progressivement démantelés, un chantier qui durera environ trois décennies. Tout d'abord, le combustible nucléaire est déchargé hors du réacteur, et la décontamination du site est lancée (6 ans). Puis, les installations autour du réacteur sont démantelées (8 ans). C'est ensuite au tour du réacteur d'être démantelé (7 ans), avant le bâtiment lui-même (7 ans).

Bien que toute construction de nouvelle centrale ait été suspendue, il a fallu statuer sur trois chantiers qui étaient en cours en 2011. Ces trois réacteurs sont toujours en construction, mais les nouvelles normes de sécurité ont considérablement repoussé leur date de mise en service. Shimane 3 devrait être raccordée au réseau au milieu des années 2020, quant à Ohma et Higashidori l'échéance est encore incertaine.

III. Le mix électrique japonais

3.1. Un recentrage sur le fossile suite à Fukushima

L'arrêt brutal de son parc nucléaire a obligé le Japon à repenser la composition de son mix énergétique et son approvisionnement. En 2010, 81,2% de la production énergétique primaire était dépendante de combustibles fossiles. La catastrophe de Fukushima a contraint l'Archipel à ouvrir de nombreuses centrales thermiques fossiles, augmentant cette proportion à 87,4% en 2017³³. En effet, le Japon s'est tourné majoritairement vers le charbon, le pétrole et le gaz naturel liquéfié (GNL)



Mix électrique japonais (2019) Source : ISEP (d'après METI)

³³ https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/energyissue2019_01.html

pour assurer sa production électrique. En 2018, le pays a importé environ 1,1 milliard de barils de pétrole, dont près des deux-tiers provenaient d'Arabie Saoudite et des Emirats Arabes Unis, ainsi que 113,67 millions de tonnes de charbon (71,5% d'Australie et 11,8% d'Indonésie) et 82,9 millions de tonnes de GNL (34,6% d'Australie et 13,6% de Malaisie). En conséquent, les émissions de gaz à effet de serre ont atteint un pic en 2013, avec 1.410Mt relâchées, avant de redescendre progressivement et atteindre 1.244 Mt en 2018, en diminution de 11,8% par rapport à 2013³⁴. En 2019, le Japon était le 5^e plus important émetteur de dioxyde de carbone du monde (France : 21^e), le 24^e en tonnes équivalent CO₂ par habitant (2016) avec 8,9 teqCO₂/hab (Allemagne : 8,8teqCO₂/hab, soit 25^e mondial ; France : 4,6teqCO₂/hab, soit 70^e mondial)³⁵.

Le Japon est maintenant extrêmement dépendant de fournisseurs étrangers pour sa production électrique. Jusqu'à présent, le **charbon** avait la préférence du gouvernement en raison de son faible coût de génération, sa simplicité d'approvisionnement et les bonnes relations entretenues avec le principal fournisseur, l'Australie. 140 centrales électriques à charbon sont en activité dans l'Archipel, et une dizaine d'autres sont en projet³⁶. La production d'électricité était responsable de 60% de la consommation totale de charbon nippon en 2018 (les 40% restant étant consommés par les aciéries et les industries du fer).

L'Archipel s'est également tourné vers le **gaz naturel liquéfié**, du gaz naturel refroidi à environ -160°C, ce qui permet de réduire son volume d'un facteur 600 pour un même pouvoir calorifique, facilitant son transport par voie maritime. Il est transporté par méthanier. A destination, il est regazéifié puis acheminé par gazoduc du terminal aux réseaux de distribution. En 2019, Tokyo était le principal importateur mondial, en captant 21,7% du marché³⁷. Le Japon possède 37 terminaux gaziers compatibles avec le GNL, et a la plus grande capacité mondiale de stockage du GNL, avec 643 millions de pieds-cubique en 2020. Cependant, cette capacité n'équivaut qu'à quinze jours de consommation, ce qui pose un véritable problème en cas de coupure d'approvisionnement. Des contrats de GNL flexibles et des prix du gaz relativement bon marché ont conduit Tokyo à augmenter sa production électrique à partir de gaz (36% en 2019). De plus, le GNL étant deux fois moins polluant que le charbon et le pétrole, le gouvernement japonais le voit comme complémentaire aux énergies renouvelables³⁸, permettant au pays de se doter d'une production pilotable qui puisse verdir le mix énergétique.

A l'horizon 2030, le Japon veut abaisser sa part des énergies fossiles à 56%, avec 26% de charbon, 27% de GNL et 3% de pétrole.

3.2. Une percée du renouvelable comme objectif

La fermeture contrainte des centrales nucléaires a obligé Tokyo, on l'a vu, à fortement augmenter sa dépendance énergétique. Le Japon a donc lancé un vaste programme de développement des énergies renouvelables, qui ont l'avantage de ne pas dépendre des importations, et qui permettent de créer des emplois directement sur le sol nippon, surtout dans les territoires nécessitant une revitalisation économique. Le modèle japonais est porté par des acteurs locaux, à travers la création d'une multitude de petites entreprises énergétiques, rendue possible grâce à la libéralisation du marché de la production.

³⁴ <https://www.nies.go.jp/whatsnew/jqjm1000000hqwip-att/jqjm1000000hqwzk.pdf>

³⁵ <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EN.ATM.CO2E.PC?locations=JP-DE-FR> (classement mondial par calcul de l'auteur depuis les données brutes de la Banque Mondiale)

³⁶ <https://www.lemondedelenergie.com/japon-arret-charbon/2020/07/03/>

³⁷ <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gaz-naturel-liquefie-gnl>

³⁸ <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2017/05/09/liberalisation-et-evolution-du-marche-du-gaz-au-japon>

En parallèle, le gouvernement a mis en place un système de rachat préférentiel de l'électricité renouvelable à partir de 2012, permettant à des projets de toute taille de se développer et attirant les investisseurs et le savoir-faire étranger. Le **photovoltaïque** est le grand gagnant de cette politique qui a démultiplié en quelques années la capacité totale installée et a permis à cette énergie d'être, en 2019, à égalité avec l'hydroélectrique pour la production électrique (7,4% du mix total)³⁹. L'**hydroélectrique** est lui solidement implanté au Japon depuis des décennies et fournit bon an mal an environ 10 du mix énergétique avec 49,9GW installés en 2016. Cependant, ses capacités de croissance sont très limitées, la majeure partie du potentiel de développement de cette énergie étant déjà exploitée. Le Ministère japonais de l'économie estime qu'il ne reste que 12GW économiquement exploitable dans le pays⁴⁰. L'**éolien**, qui ne représente aujourd'hui que 0,8% du mix, devrait gagner lentement en capacité : en 2030, c'est 1,8%, soit 10GW de capacité installée, qui sont attendus. L'exploitation de plusieurs sites off-shore dans les préfectures de Chiba et d'Akita devrait être mise aux enchères sous peu⁴¹. Le gouvernement réfléchit à changer son mécanisme tarifaire : plutôt qu'acheter à prix fort l'électricité produite par les entreprises d'énergie renouvelable, proposer des incitations fiscales à travers une réforme du système d'imposition⁴².

3.3. Quel avenir pour le nucléaire au Japon ?

Le nucléaire japonais a produit en 2019 seulement 6,5% du mix énergétique total, soit moins que le solaire. Pour parvenir à un mix énergétique avec 20-22% de nucléaire en 2030 (équivalent à 30GWe), il faut soit environ 35 réacteurs nucléaires en fonctionnement avec un facteur de charge de 80%, soit environ 27 réacteurs avec un facteur de charge de 90% (France : 75% en moyenne, Etats-Unis : 90% en moyenne). Or, en décembre 2020, seuls 9 ont officiellement redémarré. Cet objectif semble ambitieux, surtout si aucune nouvelle construction de centrale n'est lancée. De plus, la question de l'âge des centrales nucléaires refait surface : construites pour durer quarante années au minimum, l'accident de Fukushima les a presque toutes immobilisées pendant une dizaine d'années. Les opérateurs demandent donc que cette période d'arrêt forcé ne soit pas prise en compte par le régulateur, qui doit se prononcer pour permettre l'exploitation des centrales jusqu'à leur soixantième anniversaire. Ainsi, Kansai EPCO devrait bientôt être en mesure de redémarrer les réacteurs de Mihama 3 et de Takahama 1 et 2, trois réacteurs qui ont été construits il y a presque 50 ans.

Nous pouvons donc nous attendre à une montée progressive de la proportion d'électricité d'origine nucléaire au sein du mix énergétique nippon dans la décennie à venir grâce au redémarrage de réacteurs. A plus long terme, il est difficile de se prononcer avant la publication du plan énergétique du gouvernement japonais, prévu pour 2021.

³⁹ <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2019/07/04/la-decentralisation-des-energies-renouvelables-au-japon-un-processus-enclenche-apres-la-catastrophe-de-fukushima-qui-peine-a-trouver-un-second-souffle>

⁴⁰ <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2018/01/31/l-energie-hydroelectrique-au-japon-etat-des-lieux-et-politique-de-developpement>

⁴¹ <https://www.renewable-ei.org/en/activities/column/REupdate/20200731.php>

⁴² <https://www.japantimes.co.jp/news/2020/11/13/business/applications-wind-power-plants/>

Conclusion

L'accident de Fukushima a eu des conséquences très profondes sur le mix électrique japonais, poussant Tokyo à abandonner précipitamment l'énergie nucléaire pour se concentrer sur la production fossile (pilotable et aisément déployable, mais dont le coût est trois fois supérieur à celui du nucléaire). La sécurité d'approvisionnement du Japon en a été fortement altérée, rendant le pays vulnérable aux crises exogènes. Dans le même temps, les coûts de l'électricité ont fortement augmenté pour les particuliers et les entreprises, et les opérateurs nippons se sont retrouvés très fragilisés. Enfin, la mise au ban soudain du nucléaire a entraîné une forte hausse des émissions de carbone, transformant le Japon en « mauvais élève » alors que la menace climatique se fait toujours plus pressante. En effet, sur la base de l'analyse du cycle complet, les émissions de carbone de l'électricité d'origine nucléaire sont 80 fois inférieures à celles du charbon, 40 fois moins que celles du gaz et même 4 fois inférieures à celles du solaire, selon les données du GIEC.

Pourtant, le Japon voit le futur en vert. La crédibilité de la récente « conversion » du gouvernement nippon à l'écologie, après l'annonce par le Premier ministre Yoshihide Suga de la neutralité carbone du pays pour 2050, s'évaluera à l'aune des moyens réellement mis en œuvre pour y parvenir. Notamment, en début d'année 2021, la présentation du nouveau plan énergétique, qui indiquera les grandes orientations à moyen-terme (au moins jusqu'en 2030), sera donc particulièrement importante pour les acteurs énergétiques comme pour les citoyens.

Annexes

Quelques notions des unités d'énergie

Watt : de symbole **W**, c'est l'unité de mesure de la puissance (en électricité, le produit de la tension par l'intensité). Ses multiples sont le **kW** (10^3), le **MW** (10^6), le **GW** (10^9) et le **TW** (10^{12}).

Watt-heure : de symbole **Wh**, cette unité correspond à l'énergie consommée ou délivrée par un système d'une puissance de 1 Watt pendant une heure. Ses multiples sont le **kWh** (10^3), le **MWh** (10^6), le **GWh** (10^9) et le **TWh** (10^{12}).

Watt électrique : de symbole **We**, il correspond à la puissance produite sous forme électrique, pour distinguer la production électrique de la dissipation thermique d'une centrale.

Rappels : le Japon, chiffres-clés

Le Japon est un archipel d'Extrême-Orient de 364.485 km², formé de quatre îles majeures : du nord au sud, citons Hokkaidō, Honshū (l'île principale), Shikoku et Kyūshū. S'y agrègent plus de 6.848 petites îles et îlots. Le pays est très densément peuplé : environ 125,5 millions d'habitants, dont un tiers concentré dans la plaine du Kantō (Tōkyō et son aire urbaine), et un sixième dans le Keihanshin (conurbation de Kyōto, Osaka et Kōbe)⁴³. La population est localisée sur les côtes, alors que les régions montagneuses (63% du territoire) sont peu urbanisées. Le Japon est très pauvre en ressources minières et ses maigres gisements sont de mauvaise qualité. Citons des veines de charbon (Hokkaidō et Kyūshū), fer, or, zinc, soufre ou encore tungstène. Ses réserves de pétrole et de gaz naturel sont anecdotiques.⁴⁴ Le Japon est une économie avancée, la troisième mondiale en termes de PIB nominal en 2019 avec 5.000 milliards de dollars américains⁴⁵. En 2019, la consommation d'énergie dans le pays s'élevait à 420 mégatonnes équivalent pétrole⁴⁶. Toujours cette même année, la génération d'électricité était d'environ 950 TWh, en baisse de 3,6% par rapport à 2018⁴⁷ (France 2018 : 450 TWh). La consommation d'électricité est en baisse constante depuis une dizaine d'années, notamment à cause de la chute démographique.

⁴³ <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ja.html>

⁴⁴ <https://www.britannica.com/place/Japan/Resources-and-power>

⁴⁵ https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NY.GDP.MKTP.CD?most_recent_value_desc=true

⁴⁶ <https://www.enerdata.net/estore/energy-market/japan/>

⁴⁷ <https://www.eia.gov/international/analysis/country/JPN>

Les deux types de réacteurs nippons

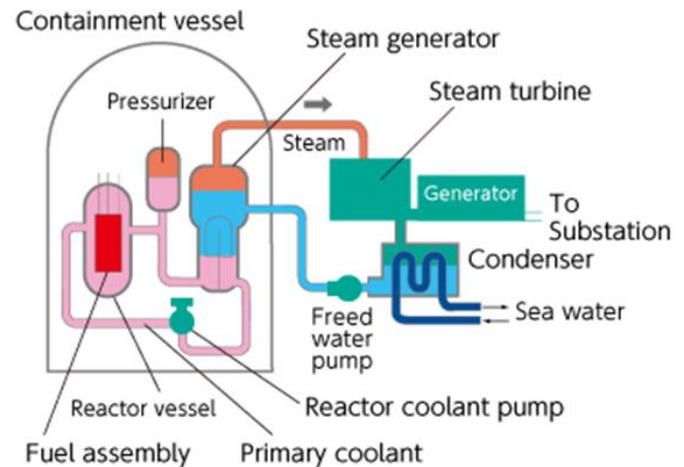
Réacteurs à eau pressurisée

Ce type de réacteur, qui constitue 60% du parc mondial, est originellement de conception américaine. Le **combustible** utilisé est de l'uranium 235 enrichi (de 3 à 5%), qui se trouve dans un **assemblage de combustibles nucléaires**, un faisceau de crayons constitués d'un tube de zirconium dans lequel sont empilées des pastilles d'oxydes d'uranium⁴⁸. Ces assemblages constituent le **cœur**, lui-même dans une **cuve** se trouvant dans une **enceinte de confinement**. Les réactions en chaîne qui se produisent dans le cœur entraînent un fort dégagement

thermique. Il faut à la fois refroidir le cœur, modérer les neutrons pour favoriser les réactions en chaîne (grâce à de l'acide borique dissous) et capter le dégagement thermique. Dans ce type de réacteur, c'est de **l'eau sous pression** (environ 150 bar) qui remplit ce rôle (on dit que c'est le **fluide caloporteur et modérateur**). Au contact du cœur, l'eau refroidit les assemblages combustibles et voit sa température augmenter jusqu'à 330°C environ, sans pour autant devenir de la vapeur grâce à la forte pression. L'eau chauffée passe ensuite dans un échangeur de chaleur, où sa chaleur va être transférée à de l'eau maintenue sous pression plus faible, qui va, elle, devenir de la vapeur. Il y a donc transfert entre un **circuit d'eau primaire** et un **circuit d'eau secondaire**. L'eau du circuit primaire, refroidie, va retourner au contact du cœur du réacteur, alors que la vapeur du circuit secondaire va entraîner un alternateur produisant de l'électricité. L'eau du circuit secondaire va être elle-même refroidie par l'eau d'un **circuit tertiaire**, prélevée directement dans son milieu naturel comme une rivière, un lac ou une mer. La vapeur secondaire n'est pas en contact avec des éléments radioactifs et est recyclée après avoir été condensée⁴⁹.

Dans un réacteur à eau sous pression, il existe donc trois barrières de confinement des produits radioactifs :

- **La gaine** enveloppant les crayons de combustible, qui retient les produits radioactifs formés dans les pastilles de combustible
- **Le circuit primaire**, capable de retenir la dispersion des produits radioactifs si les gaines sont défectueuses
- **L'enceinte de confinement**, un bâtiment en béton qui abrite le circuit primaire⁵⁰



[PWR (Pressurized water reactor) Power Plant]

Source : Mitsubishi Nuclear Fuel

⁴⁸ https://www.cea.fr/Documents/monographies/combustibles-nucl%C3%A9aires_r%C3%A9acteurs-eau.pdf

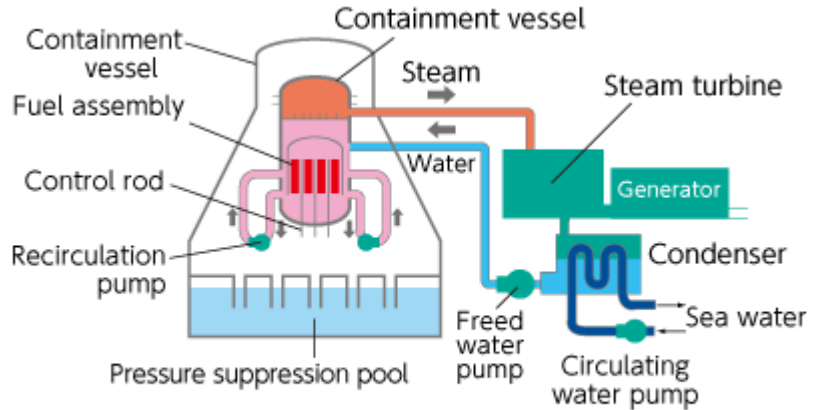
⁴⁹ <https://www.laradioactivite.com/site/pages/reacteursaeupressurisee.htm>

⁵⁰ https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/risque-nucleaire/demarche-prevention/Pages/2-barrieres-de-confinement.aspx#.X82g9ogzYdU

Réacteurs à eau bouillante

Ce type de réacteur, dont le premier a également été conçu aux Etats-Unis, représente le quart du parc mondial des réacteurs en exploitation. Les six réacteurs de la centrale de Fukushima étaient des réacteurs à eau bouillante (BWR). Cette technologie est assez similaire à celle des réacteurs à eau pressurisée, si ce n'est qu'il n'y a que deux circuits et non pas trois : le cœur fait directement bouillir

l'eau et la change en vapeur. Cette dernière va ensuite mettre en mouvement un turboalternateur, produisant de l'électricité. La vapeur entre ensuite au contact d'une source froide (de nouveau, eau de rivière, lac ou de mer), se condense, est reprise à basse pression par des pompes avant d'être réinjectée dans le cœur du réacteur. La température de la vapeur est d'environ 300°C, et la pression entre 70 et 80 bar. Le rendement thermodynamique de la transformation de la chaleur en électricité est voisin d'un tiers. Dans un réacteur BWR, les mécanismes de manœuvre sont situés en-dessous du cœur (dans un REP, les grappes de contrôle sont placées au-dessus du cœur). Les enceintes de confinement de ces réacteurs sont placées sous une atmosphère inerte en dépression afin d'éviter les risques d'incendies et surtout les explosions d'hydrogène. Les enceintes de confinement sont généralement équipées de recombiners d'hydrogène, mais cela n'était pas le cas pour les réacteurs de Fukushima ⁵¹.

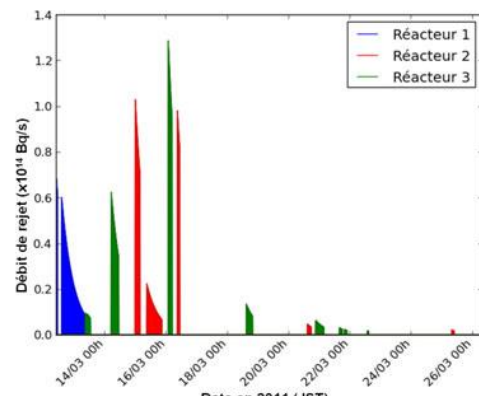


[BWR (Boiling water reactor) Power Plant]

Source : Mitsubishi Nuclear Fuel

Comprendre les fuites radioactives de Fukushima

Malgré la mise à l'arrêt des réactions de fission, les cœurs des réacteurs continuaient à générer environ 1,5% de leur puissance thermique nominale, à cause de la désintégration toujours en cours des produits de fission. La dégradation des prises d'eau en mer (servant à refroidir l'eau du circuit primaire), puis la perte des générateurs de secours des unités 1 à 4 et finalement la défaillance des batteries électriques empêchent le fonctionnement des systèmes de refroidissement. L'opérateur dut alors injecter de l'eau dans l'enceinte de confinement pour que la température des cœurs n'atteigne pas un niveau critique. Dans le même temps, il était nécessaire de décompresser régulièrement les enceintes pour libérer la vapeur se formant par contact entre l'eau et les combustibles. Tant que les gaines des combustibles n'étaient pas détériorées, la radioactivité de ces bouffées de décompression restait faible. Mais si le cœur n'est pas refroidi pendant un certain temps, la chaleur provoquée par la réaction nucléaire atteint un point critique et la gaine se fissure, laissant s'échapper des éléments



Évolution du débit de rejet par réacteur Source : IRSN

⁵¹ https://www.laradioactivite.com/site/pages/Reacteurs_REB.htm

radioactifs volatils. C'est ce qui se produit dans trois réacteurs de Fukushima Daiichi : l'eau n'étant pas renouvelée suffisamment rapidement, elle est transformée en vapeur, laissant à nu une partie des combustibles. Non refroidi, le combustible est entré en fusion partielle. A 2800°C, le zirconium de la gaine a réagi avec l'eau et a produit de l'hydrogène et des gaz radioactifs⁵². L'hydrogène s'est ensuite accumulé dans les parties hautes des réacteurs et, au contact de l'oxygène ambiant et à haute température, a finalement explosé.

La contamination radioactive du site, conséquence visible et persistante de l'accident

La contamination radioactive des environs de la centrale a profondément marqué la population japonaise et explique en partie leur méfiance persistante envers cette source d'énergie, alors que dix ans se sont écoulés. En effet, la fusion des réacteurs a entraîné le rejet d'éléments radiotoxiques dans l'enceinte de confinement. Les quelques jours qui se sont écoulés entre l'arrêt des réacteurs et les rejets atmosphériques ont permis aux radioéléments les plus radiotoxiques mais à très courte vie de se désintégrer sans provoquer de contamination. L'élément le plus dangereux relâché par la centrale a été l'iode 131 (isotope de l'iode à la demi-vie de 5,3 jours). En effet, une fois ingéré, l'iode 131 peut se fixer au niveau de la thyroïde et entraîner des cancers. On estime à 90PBq (90.10¹⁵ Bq, un Becquerel étant l'unité de mesure de la radioactivité d'un corps, équivalent à une désintégration par seconde⁵³) le rejet total d'iode 131 à Fukushima. Depuis 2011, trois campagnes de dépistage du cancer de la thyroïde chez les enfants ont eu lieu dans la préfecture de Fukushima et dans d'autres préfectures du Japon (groupes témoins). A Fukushima, 202 cas ont été détectés sur 788.445 enfants testés. Comme la fréquence élevée de nodules tumoraux thyroïdiens observés est liée à l'effet de dépistage plutôt qu'à un effet des rayonnements ionisants, il est impossible de se prononcer actuellement sur une éventuelle augmentation des cancers de la thyroïde chez les enfants causée par le panache de Fukushima⁵⁴. Le césium 137, isotope du césium à la demi-vie de 30,1 ans, est un élément problématique à cause de sa demi-vie dite *moyenne*. Depuis 2011, une surface de 9.000m² de terre dans les environs de la centrale de Fukushima a été décapée sur une épaisseur de 5 centimètres, permettant de réduire les concentrations en césium de 80%. Un tel procédé est impossible à faire dans les forêts de la préfecture où le césium est intégré à l'écosystème et rend impropre à la consommation plusieurs espèces végétales et certains champignons⁵⁵. Les études sur la faune et la flore dans les forêts de Fukushima sont encore incomplètes et ne permettent pas de dégager un consensus scientifique, d'après IRSN.

⁵² <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/accident-nucleaire-de-fukushima-causes-et-consequences-3980/>

⁵³ <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/mesure-de-la-radioactivite-unites>

⁵⁴ https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Pages/20200310_NI-Bilan-surveillance-sanitaire-etudes-epidemiologiques-Fukushima.aspx#.X8dKe4gzYdU

⁵⁵ Miura S. (2016) *The Effects of Radioactive Contamination on the Forestry Industry and Commercial Mushroom-Log Production in Fukushima, Japan*. In: Nakanishi T., Tanoi K. (eds) *Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident*. Springer, Tokyo

Carte du Japon et de ses régions (source : JNTO)

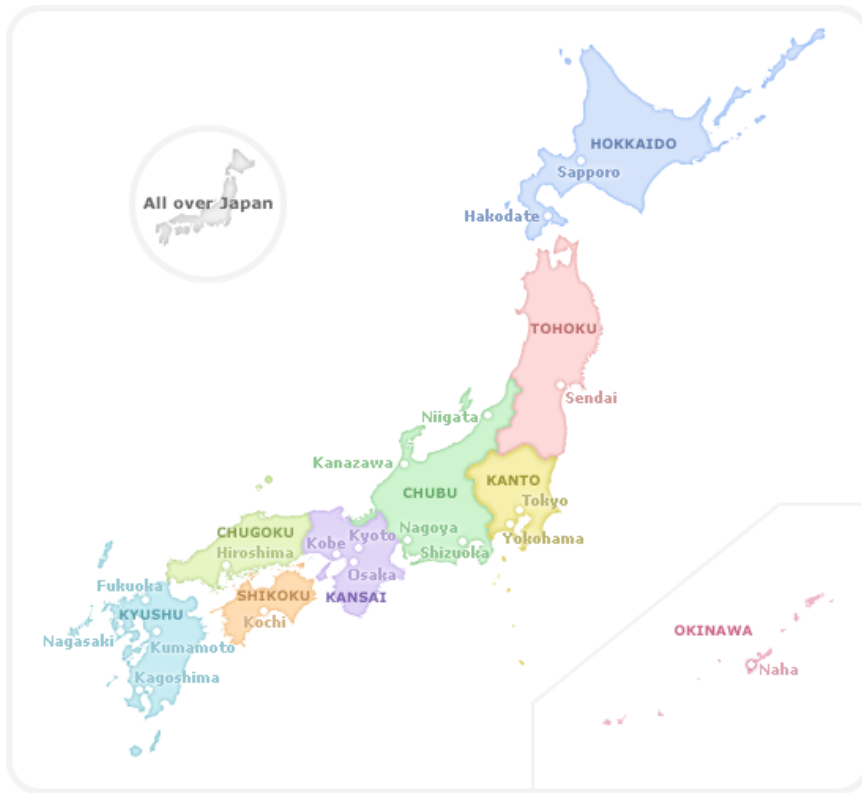
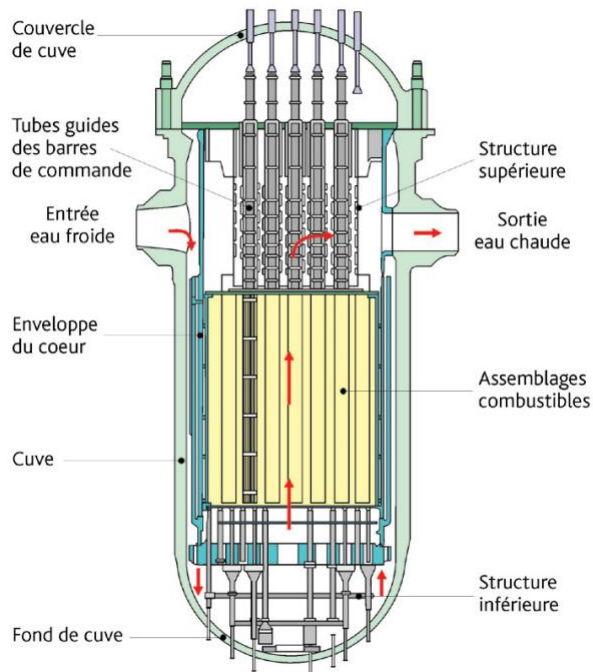
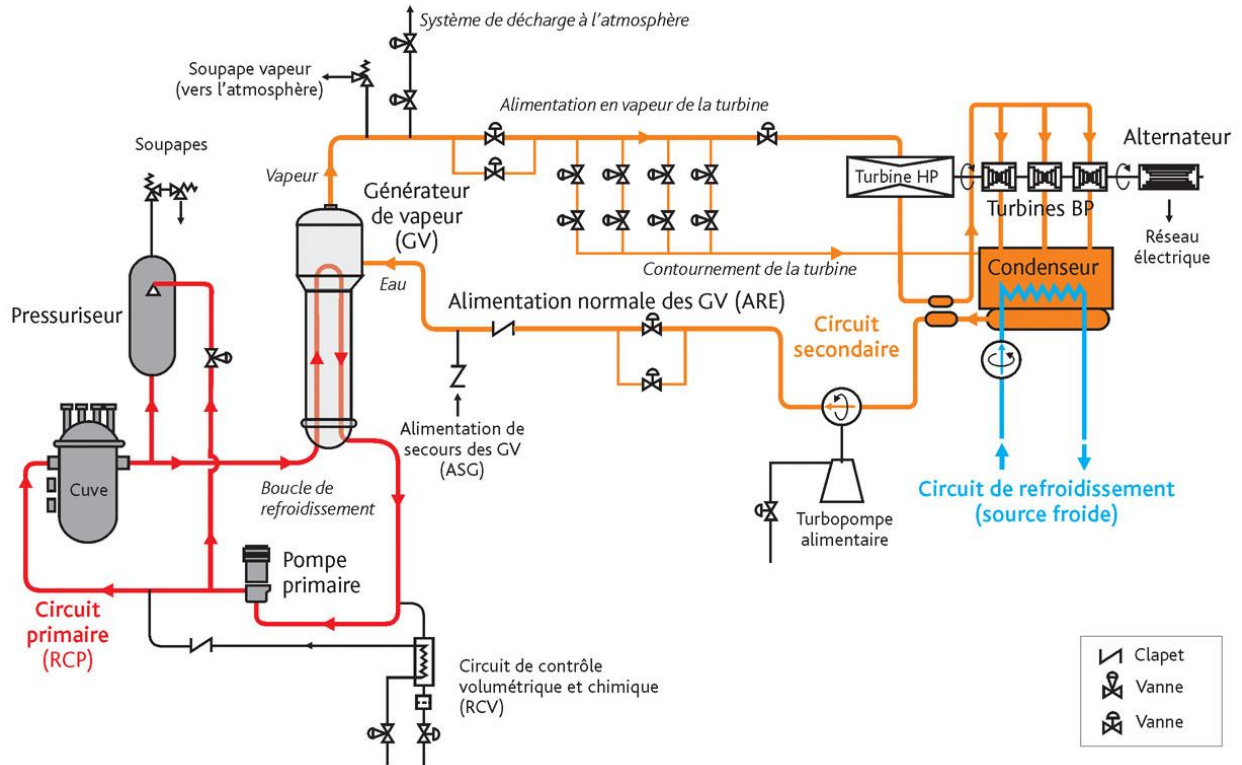


Schéma d'un réacteur à eau pressurisée (source : IRSN)



Principaux composants du circuit primaire et des circuits secondaires d'un réacteur à eau pressurisée (source : IRSN)



Le cycle du combustible nucléaire (source : ASN)

