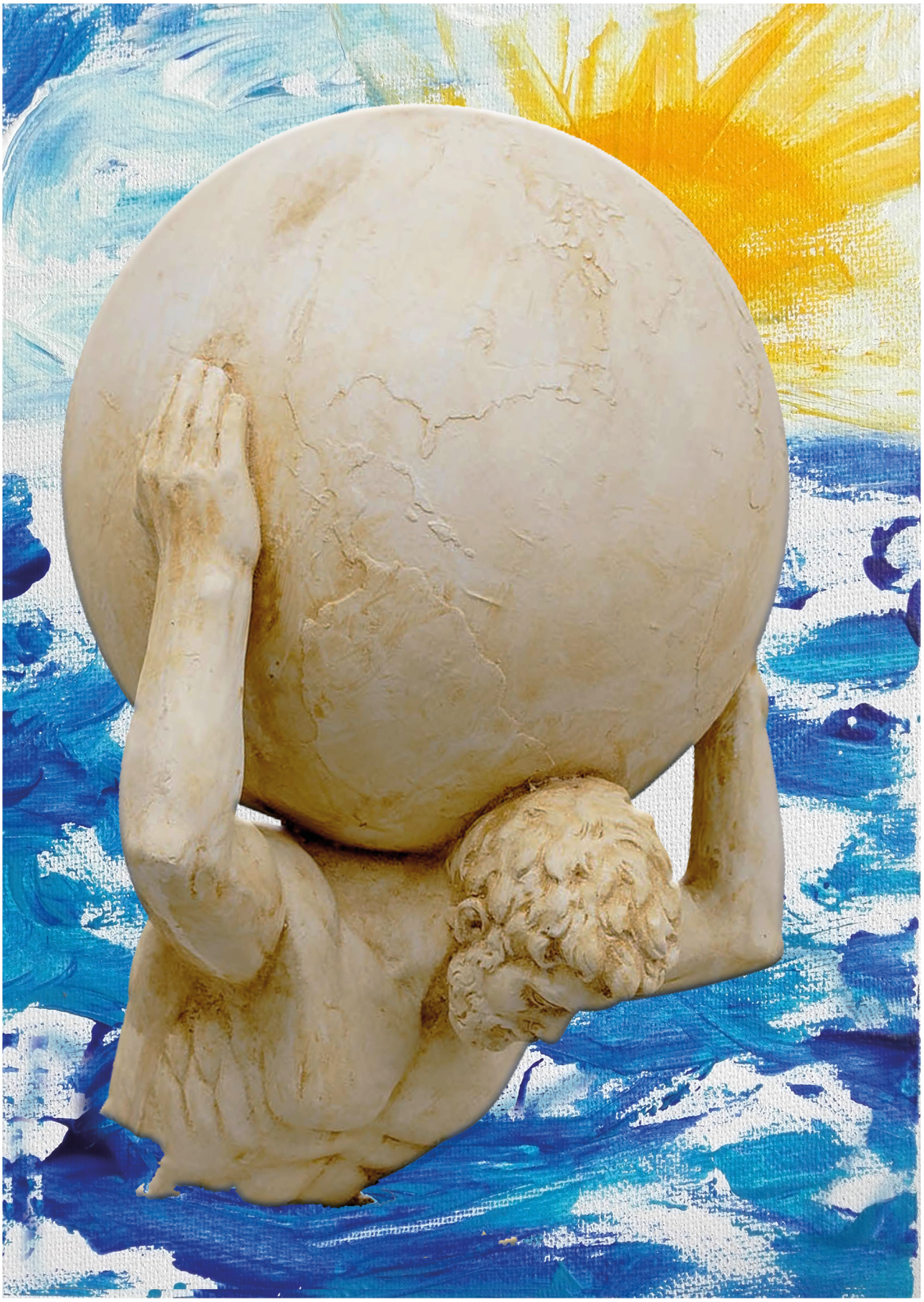
A Mycle Schneider Consulting Project
Paris, September 2021

The World Nuclear Industry Status Report 2021

Version française

Résumé · Conclusions

Premiers chiffres clés fin 2021



MacArthur Foundation | NRDC | HEINRICH BÖLL STIFTUNG | EWS Elektrizitätswerke Schönau | THE GREENS/EFA in the European Parliament | SES energiestiftung.ch

The World Nuclear Industry Status Report 2021

Foreword by

Naoto Kan
Former Prime Minister of Japan I Member of the House of Representatives, Japan

By

Mycle Schneider
Independent Consultant, Paris, France
Project Coordinator and Lead Author

Antony Froggatt
Independent Consultant, and Deputy Director and Senior Research Fellow, Environment and Society Programme, Chatham House, London U.K.
Lead Author

With

Julie Hazemann
Director of EnerWebWatch, Paris, France
Documentary Research, Modelling and Datavisualization

Ali Ahmad
Research Fellow, Project on Managing the Atom and International Security Program (ISP), Harvard Kennedy School, U.S.
Contributing Author

Mariana Budjeryn
Research Associate, Project on Managing the Atom, Harvard Kennedy School, U.S.
Contributing Author

Yuichi Kaido
Lawyer, Japan
Contributing Author

Thibault Laconde
Consulting Engineer and Founding President of Callendar, France
Contributing Author

Mathilde Le Moal
Criminologist, Research Associate at Realist Revolt, France
Contributing Author

M.V. Ramana
Simons Chair in Disarmament, Global and Human Security at the Schoool of Public Policy and Global Affairs (SPPGA), University of British Columbia, Vancouver, Canada
Contributing Author

Hisako Sakiyama
Chair of the Board of Directors of the 3/11 Fund for Children with Thyroid Cancer, Former Member of the National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, Japan.
Contributing Author

Tatsujiro Suzuki
Vice Director, Research Center for Nuclear Weapons Abolition, Nagasaki University (RECNA), Former Vice-Chairman of the Japan Atomic Energy Commission, Japan
Contributing Author

Ben Wealer
Research Associate, Workgroup for Economic and Infrastructure Policy, Berlin University of Technology (TU Berlin), Germany
Contributing Author

Agnès Stienne
Artist, Graphic Designer, Cartographer, Le Mans, France
Graphic Design & Layout

Nina Schneider
Freelance
Proofreading, and Production

Friedhelm Meinass
Visual Artist, Painter, Rodgau, Germany
Cover-page Design, Painting and Layout

Paris, 2021 © A Mycle Schneider Consulting Project

LE NUCLÉAIRE DANS LE MONDE
PREMIERS CHIFFRES CLÉS À FIN 2021

2021 en quelques chiffres *– Six mises en services (10 de moins que prévu en début d'année), huit fermetures et deux annonces de fermetures. 10 mises en construction. Trois réacteurs en LTO ont redémarré et deux ont été définitivement arrêtés. On comptait 212 réacteurs en service au 1er janvier 2022, soit un de plus qu'au début de l'année 2021. Il y avait également 25 réacteurs en LTO (dont 23 au Japon) et 55 réacteurs en construction.*

L'année 2021 a été marquée par le plus grand nombre d'arrêts de réacteurs nucléaires depuis dix ans, et l'année 2011 dominée par le début de la catastrophe de Fukushima. On notera la fermeture de trois des six derniers réacteurs allemands, ainsi qu'une fermeture de réacteur et l'annonce de deux autres au Royaume-Uni. Ces derniers étaient alors en arrêt longue durée (LTO)[1] et n'avaient plus produit d'électricité depuis 2018[2]. Quatre autres tranches ont été fermées, aux États-Unis, au Pakistan, en Russie et à Taïwan.

Dans le courant de l'année 2021, six nouveaux réacteurs ont été mis en service dans quatre pays, trois en Chine, et un en Inde, au Pakistan et aux Émirats arabes unis. En début d'année, 16 couplages au réseau étaient attendus. Au nombre des réacteurs démarrés en Chine, on notera le premier des réacteurs jumeaux de Shidao Bay (100 MW chacun), dont le début de construction remonte à 2012.

Le solde des fermetures (hors fermeture de deux réacteurs en LTO) et des démarrages s'établit donc à deux réacteurs en moins soit –2,4 GW. Le nombre de réacteurs en service n'a pu augmenter – d'une unité, de 411 à 412 – que grâce au redémarrage de trois réacteurs en LTO.

Au Japon, le réacteur de Mihama-3, arrêté depuis mai 2011, a été remis en service en juin 2021, avant d'être de nouveau arrêté en octobre 2021 à cause de retard dans la mise en place de mesures exigées par les autorités de sûreté. C'est le premier réacteur de plus de 40 ans à avoir redémarré au Japon. Celui d'Ikata-3, qui répondait aux critères de LTO depuis juillet 2021 a été remis en service en décembre 2021.

Ce bilan nucléaire 2021 est à comparer aux premières estimations d'expansion des énergies renouvelables avec un nouveau record annuel de +290 GW.

Sur la décennie 2012–2021, 62 réacteurs ont été mis en service, dont 37 en Chine, et 44 ont été fermés, dont aucun en Chine, soit un solde négatif hors Chine de 19 réacteurs. En incluant 2011, année du début de la catastrophe de Fukushima, on compte 69 mises en service face à 69 fermetures et le solde négatif hors Chine monte à 40 unités. Le déclin du nucléaire en dehors Chine est évident.

1 - LTO pour Long-Term Outage ou arrêt de longue durée.

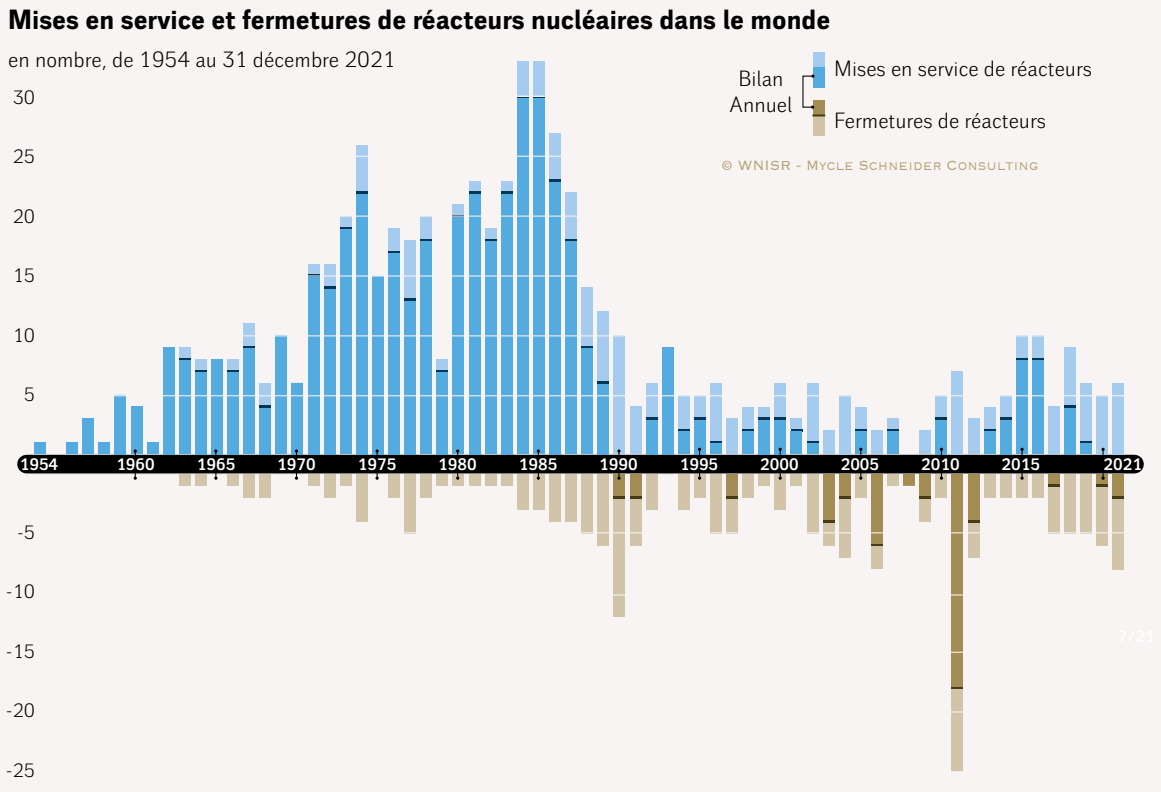
2 - Les deux réacteurs de Dungeness n'ayant pas produit, ils sont donc considérés comme fermés depuis cette date, conformément au mode de calcul du WNISR. Le nombre de réacteurs fermés pour 2021 est donc huit, plus deux annonces.

Sur les 10 réacteurs mis en construction en 2021, la Chine en comptait six à elle seule. La Russie a elle affirmé sa présence sur ce terrain essentiellement en dehors de ses frontières, en tant que maître d'ouvrage de six de ces dix projets, dont un seul en Russie mais deux en Inde, un en Turquie, ainsi que deux… en Chine. Ce bilan reflète assez bien la situation mondiale **:** la Chine construit chez elle, la Russie à l'étranger, et peu de mouvement industriel sur le terrain en dehors.

Avec 31 réacteurs, la Chine représente près de la moitié des 63 mises en construction de la période 2012–2021, dont trois ont été abandonnées en cours de route (deux aux États-Unis et un en Russie) .

Fin 2021 on comptait 55 réacteurs en construction dans 17 pays, en légère augmentation par rapport aux quatre dernières années, mais inférieur aux 64 réacteurs en construction fin 2012. La Chine et l'Inde, qui comptent respectivement vingt et huit chantiers, représentent à elles-seules plus de la moitié de ces constructions.

Figure 1 · Couplages au réseau et fermetures de réacteurs nucléaires dans le monde



Sources : WNISR, avec IAEA-PRIS, 2022

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Le *World Nuclear Industry Status Report 2021* (*WNISR2021*) dresse un panorama exhaustif du parc nucléaire mondial, et fournit des données relatives à l'âge, l'exploitation, la production et les constructions de réacteurs. Marquant le 10ème anniversaire du début de la catastrophe de Fukushima au Japon, le rapport de l'année 2021 en analyse de façon plus détaillée les conséquences – sur et hors-site – et en particulier la problématique des eaux contaminées et de la gestion des déchets, l'impact sanitaire, les estimations de coûts et les actions en justice. Un chapitre est consacré aux conséquences de l'accident de Tchernobyl en Ukraine, 35 ans plus tard.

Alors que le monde poursuit sa lutte contre la pandémie de COVID-19 et fait face à des températures record, feux de forêt, inondations, et autres événement climatiques extrêmes, le WNISR2021 apporte un premier éclairage sur le *Nucléaire et la résilience au changement climatique*, intégrant une étude de cas sur la France.

Depuis des années, le WNISR fait état d'irrégularités, fraudes, falsifications, cas de corruption et autres activités criminelles dans le secteur nucléaire. Le WNISR2021 y consacre pour la première fois un chapitre entier, *Nucléaire et énergie criminelle*, documentant de nombreuses pratiques criminelles associées au nucléaire dans différents pays.

Le WNISR fait le point sur les programmes de construction dans les 33 pays, qui, à la mi-2021, exploitaient un parc nucléaire, ainsi que dans les potentiels « *Newcomer* » (potentiels futurs exploitants). Le chapitre « *Focus Countries* », porte plus particulièrement sur dix pays – dont quatre des cinq plus importants producteurs nucléaires – représentant environ deux tiers du parc mondial. Le « *Decommissioning Status Report 2021* » présente une vue d'ensemble de la situation des réacteurs définitivement fermés. Le chapitre *Le nucléaire face aux énergies renouvelables* apporte des éléments de comparaison sur les investissements, l'évolution des capacités et des productions nucléaires, éoliennes et solaires, et autres sources renouvelables dans le monde. Enfin, la traditionnelle *Annexe 1* est une présentation synthétique de la situation dans les pays exploitant des centrales nucléaires – non couverts dans « *Focus Countries* ».

MISES EN SERVICE ET FERMETURES DE RÉACTEURS

Mises en service. Le WNISR2019 listait 13 réacteurs dont la mise en service était attendue au cours de l'année 2020 : seuls trois d'entre eux ont démarré à cette échéance, ainsi que deux ne figurant pas sur cette liste, alors que la mise en service de 10 autres était repoussée à 2021 au plus tôt. Quatre réacteurs ont démarré au premier semestre 2021.

Certains programmes de mise en service ont été affectés par la pandémie de COVID-19.

Fermetures.[1] Six réacteurs ont été fermés en 2020, deux en France et aux États-Unis, et un en Russie et en Suède. Deux réacteurs ont également été fermés au cours du premier semestre 2021 : un à Taïwan et un aux États-Unis.

Au cours des deux décennies 2001–2020, il y a eu 95 mises en service et 98 fermetures dans le monde. Sur cette période – hors Chine, où il y a eu 47 mises en service sans aucune fermeture –

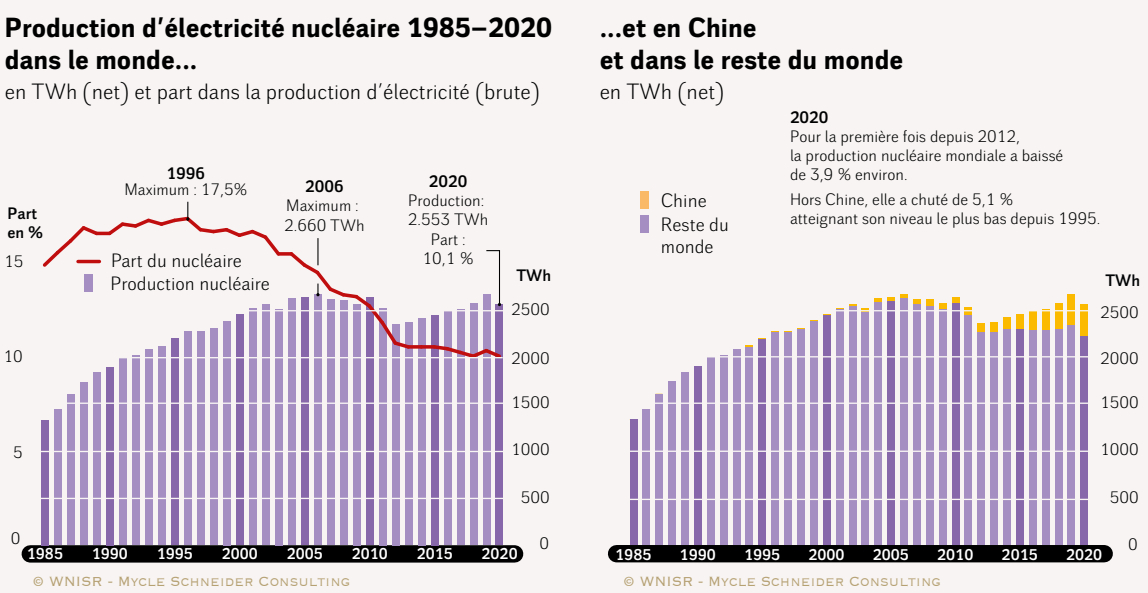
1 - Le WNISR considère comme année de fermeture d'un réacteur l'année de la fin de production d'électricité et corrige rétroactivement ses statistiques si les réacteurs n'ont pas fourni d'électricité au cours de l'année étudiée.

les 98 fermetures n'ont été compensées que par 48 mises en service, soit une baisse de 50 réacteurs.

DONNÉES SUR L'EXPLOITATION ET LA CONSTRUCTION

Exploitation et production. Au 1er juillet 2021, 33 pays exploitaient un parc nucléaire de 415 réacteurs – hors réacteurs en LTO (Long-Term Outage ou « arrêt de longue durée ») – soit 7 réacteurs de plus que dans le WNISR2020.[2] C'est cependant moins qu'à la mi-2019, trois de moins qu'en 1989 et 23 de moins que le record historique de 438 réacteurs en 2002. Deux pays, la Biélorussie et les Émirats arabes unis, ont mis en service leur premier réacteur.

Figure 2 · Production nucléaire dans le monde… et en Chine



Sources: WNISR, with BP, IAEA-PRIS, 2021[3]

Vingt-six réacteurs étaient en LTO à la mi-2021, cinq de moins que dans le WNISR2020 : 24 au Japon, un en Corée du Sud et en Inde, tous considérés en service par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

Avec une hausse de 1,9 % en un an, la capacité en service atteignait un record de 369 GW à la mi-2021, dépassant tout juste le maximum de 367 GW en 2006.[4]

En 2020, pour la première fois depuis 2012, la production nucléaire a enregistré une baisse (104 TWh ou 3,9 %), pour atteindre 2.553 térawattheures nets. Hors Chine, la production a chuté de 5,1 %, atteignant son niveau le plus bas depuis 1995.

2 - Sauf mention contraire, les données sont arrêtées au 1er juillet 2021.

3 - WNISR=World Nuclear Industry Status Report; et BP=BP plc.

4 - L'ensemble des puissances sont données en puissance nominale nette. GW=gigawatt ou millier de kilowatt.

Pour la première fois, la Chine a produit plus d'électricité nucléaire que la France.

Les « cinq grands » producteurs nucléaires – par ordre d'importance États-Unis, Chine, France, Russie et Corée du Sud – ont fourni 72 % de l'électricité nucléaire dans le monde, et 58 % rien que pour les trois premiers.

Part de l'électricité et de l'énergie. La part du nucléaire dans la production électrique brute mondiale n'a pas maintenu ses 0,2 points de pourcentage d'augmentation de l'année 2019 ; avec 10,1 % en 2020 elle a repris son déclin, lent mais régulier, entamé depuis le pic de 17,5 % en 1996.

La part du nucléaire dans la consommation mondiale d'énergie primaire reste stable depuis 2014 aux alentours de 4,3 %.

Âge des réacteurs. En l'absence de programmes importants de construction, exception faite de la Chine, on observe une hausse continue de la moyenne d'âge du parc nucléaire mondial, soit 30,9 ans à la mi-2021. L'âge moyen du parc mondial augmente depuis 1984.

Deux-tiers du parc mondial, soit 278 réacteurs, ont fonctionné 31 ans ou plus, dont 89 – plus d'un sur cinq – ont atteint ou dépassé une durée d'exploitation de 41 ans. Six réacteurs ont fonctionné 51 ans ou plus.

Projections. Si l'ensemble des réacteurs actuellement en service étaient arrêtés à l'issue de leur durée de fonctionnement autorisée – en tenant compte des prolongements ayant déjà reçu une autorisation (Projection PLEX) – et si l'ensemble des réacteurs actuellement en construction étaient effectivement mis en service à la date prévue, maintenir le statu quo à l'horizon 2030 nécessiterait la mise ou remise en service de 123 réacteurs supplémentaires (ou 95 GW) – soit un réacteur ou 0,8 GW par mois – par rapport à la situation à fin 2020. Cela reviendrait, au cours de la décennie *actuelle*, à multiplier par plus de deux le rythme annuel de mises en service observé au cours de la *dernière* décennie, et passer de 6 à 12 par an. Or le nombre de mises en construction est en recul. De plus, le besoin de nouveaux réacteurs pourrait même être supérieur, la fermeture de nombreux réacteurs intervenant bien avant l'expiration de leur autorisation ; ainsi l'âge moyen des 23 réacteurs fermés entre 2016 et 2020 était de 42,6 ans.

Construction. Dix-sept pays construisent actuellement des réacteurs. Au 1er juillet 2021, on comptait 53 réacteurs en construction – un de plus que ne le rapportait le WNISR à la mi-2020, mais 16 de moins qu'en 2013 – dont 18 en Chine pour une capacité de 17 GW.

La capacité en construction dans le monde a augmenté de 0,5 GW pour atteindre 54 GW. La durée moyenne depuis la mise en construction de ces 53 réacteurs est de 7 ans, contre une moyenne de 7,3 ans un an plus tôt, et une moyenne de 6,2 ans à la mi-2017. La construction de nombreux d'entre eux est toutefois loin d'être achevée.

- La construction *de l'ensemble* des réacteurs dans au moins 12 de ces 17 pays subit un retard, souvent de plusieurs années. Au total, au moins 31 réacteurs font face à des retards.
- Pour au moins 13 de ces 31 constructions, les retards se sont *allongés* au cours de l'année écoulée et pour quatre autre un retard a été annoncé pour la première fois.
- Le démarrage de treize réacteurs était prévu en 2020, seuls cinq ont démarré.
- Deux projets de construction remontent à 36 ans ou plus : Mochovce-3 et -4 en Slovaquie, dont la mise en service a été repoussée une nouvelle fois, à fin 2021 et 2023 respectivement,

ainsi que Bushehr-2 dont la construction, initialement commencée en 1976, il y a 45 ans, a repris en 2019 après 40 ans d'interruption. Sa mise en service est actuellement prévue pour 2024.

- Cinq réacteurs sont sur la liste des réacteurs en construction depuis au moins 10 ans : le PFBR (Prototype Fast Breeder Reactor) et Kakrapar-4 en Inde, Olkiluoto-3 (OL3) en Finlande, Shimane-3 au Japon, et Flamanville-3 (FL3) en France. La mise en service du réacteur finlandais a de nouveau été reportée au cours de l'année écoulée, et celle des réacteurs français et indiens le sera vraisemblablement aussi, tandis qu'il n'y a pas même d'estimation de mise en service pour le réacteur japonais.
- Dix pays ont mis en service 63 réacteurs (dont 37 pour la Chine) au cours de la dernière décennie, avec une durée moyenne de 10 ans entre le début de construction et le démarrage.

NOUVELLES CONSTRUCTIONS

Mises en construction. En 2020, cinq réacteurs ont été mis en construction – quatre en Chine et un en Turquie – ainsi que six au cours du premier semestre 2021, dont trois en Chine. Il faut rapporter ces chiffres aux 15 mises en construction de 2010, et au maximum historique de 44 en 1976.

La construction de 57 réacteurs a commencé dans le monde au cours de la décennie 2011-2020 : mi-2021 seuls 15 avaient démarré, 39 étaient toujours en construction et trois avaient été abandonnés.

Abandons de construction. Entre 1970 et mi-2021, ce sont en tout 93 réacteurs dans 19 pays sur un total de 783 réacteurs mis en construction, soit un sur huit, dont la construction a été suspendue ou abandonnée à différents stades d'avancement.

FOCUS COUNTRIES

Les dix pays focus, analysés de façon approfondie dans ce rapport, représentent près du tiers des pays exploitant des réacteurs et deux-tiers environ du parc mondial. Faits et chiffres clés pour 2020 :

Belarus. Le 3 novembre 2020, le Belarus a couplé au réseau son premier réacteur, Belarusian-1 à Ostrovets, devenant ainsi le 33ème pays exploitant de centrales nucléaires. Cette centrale est très critiquée par les pays voisins, et la Commission Européenne a demandé un renforcement de la sûreté.

Chine. La production nucléaire a enregistré une croissance de 4,4 % en 2020, son taux de croissance le plus faible depuis 2009, permettant toutefois à la Chine de détrôner la France de sa place de deuxième producteur nucléaire mondial.

Finlande. L'EPR d'Olkiluoto-3 a subi un nouveau retard, imputable cette fois à l'« extension de la révision des turbines ». Selon les annonces faites en août 2021, la « production régulière

d'électricité » n'interviendra pas avant juin 2022, un retard de 13 ans par rapport à la date de démarrage initialement prévue.[5]

France. Les réacteurs ont produit près de 12 % de moins qu'en 2019, et leur part dans la production d'électricité s'élevait à 67 %, le niveau le plus faible depuis 1985. Le cumul des indisponibilités totales (0 MW de capacité disponible) a représenté plus de 6.475 jours-réacteurs, soit en *moyenne* un tiers de l'année par réacteur. La construction de l'EPR de Flamanville-3 a accusé un nouveau retard, le démarrage du réacteur étant désormais prévu mi-2023. Fin 2020, les concurrents de l'électricien national, EDF, avaient capté la moitié de ses clients commerciaux et 26 % des clients résidentiels.

Inde. La mise en service de Kakrapar-3 est finalement intervenue en janvier 2021 après 10 ans de construction. Les centrales nucléaires fournissent 3 % à la production d'électricité du pays. La production des installations solaires et éoliennes surpasse individuellement celle des réacteurs nucléaires ; solaire et éolien cumulés génèrent trois fois plus d'électricité que le nucléaire.

Japon. Les réacteurs nucléaires ont fourni 5 % de l'électricité du pays en 2020, en baisse par rapport aux 7,5 % de 2019. À la mi-2021, dix réacteurs avaient redémarré à différents moments, mais pratiquement sans fonctionner simultanément. Ainsi, pendant six semaines, en novembre-décembre 2020, un seul était en service. Un de ces dix réacteurs est de nouveau en LTO.

Corée du Sud. Pour la deuxième année consécutive, suite à une forte baisse enregistrée à partir de 2015, la production nucléaire a marqué une hausse de près de 10 %, pour s'établir à 29,6 % de la production électrique du pays. Conformément au « 9ème plan sur l'énergie », la part du nucléaire doit être réduite et ne plus représenter que 10 % de l'électricité d'ici 2034. Cette politique pourrait toutefois être inversée à l'issue des prochaines élections.

Taïwan. Trois réacteurs ont été fermés, dont le dernier en juillet 2021 ; les trois restants le seront d'ici 2025. Avec la réélection en 2020 du Président Tsai Ing-wen, la politique de sortie du nucléaire a été maintenue. La part du nucléaire dans production d'électricité a déjà chuté de 41 % en 1988 à 13 % en 2020.

Royaume-Uni. La production nucléaire a subi une nouvelle baisse de 11 %, alors que la production renouvelable enregistrait une augmentation de 11 %. Deux réacteurs alors en LTO ont été fermés, et quatre autres doivent l'être d'ici mi-2022. Le parc vieillissant, dont la moyenne d'âge dépasse 37 ans, rencontre de nombreux problèmes techniques, en particulier des dommages non-réparables au niveau des briques de graphite, qui se traduisent par l'arrêt prolongé des réacteurs AGR (Advanced Gas-cooled Reactors). Les prévisions de mise en service de la première tranche de Hinkley Point C a été repoussée à mi-2026, et les coûts de nouveau réévalués à la hausse.

États-Unis. Le parc nucléaire continue à vieillir, et son âge moyen atteignait 40,7 ans en juillet 2021, franchissant pour la première fois le seuil des 40 ans. Toutefois les réacteurs peinent de plus en plus à être compétitifs. Des subventions d'État ont été accordées à quatre réacteurs non-rentables afin d'en éviter une « fermeture anticipée ». Suite aux révélations

5 - TVO, « The regular electricity production of OL3 EPR will be postponed due to extension of turbine overhaul », 20 août 2021, voir https://www.tvo.fi/en/index/news/pressreleasesstockexchangereleases/2021/theregularelectricityproductionofol3eprwillbepostponedduetoextensionofturbineoverhaul.html, consulté le 23 août 2021. Comme en 2020, cette annonce est survenue après la clôture éditoriale du corps principal du WNISR.

concernant un système de corruption sans précédent en Ohio, impliquant le président de la Chambre des représentants de l'État, quatre de ces « renflouements » pourraient être renversés. De nombreux autres réacteurs sont toujours menacés de fermeture anticipée pour des raisons économiques. L'ancien directeur général de SCANA a plaidé coupable du chef d'inculpation de conspiration pour fraude, en lien avec la dissimulation de problèmes financiers dans le cadre du projet de construction de V.C. Summer désormais abandonné. Le plus haut responsable de Westinghouse chargé de la gestion du projet a été accusé d'avoir menti au FBI sur son rôle dans le scandale.

FUKUSHIMA STATUS REPORT – DIX ANS APRÈS

Dix ans se sont écoulés depuis le début du désastre nucléaire de Fukushima Daiichi, provoqué par le « grand séisme de l'Est du Japon », le 11 mars 2011 (également désigné par 3/11 dans ce rapport) et les évènements qui ont suivi.

Cette édition anniversaire dépasse le traditionnel panorama des enjeux sur site et hors-site et laisse une large part à la question complexe des effets sanitaires, des évaluations de coûts, ainsi qu'aux décisions juridiques relatives à la responsabilité des exploitants et de l'État dans la catastrophe ou les conditions de redémarrage des réacteurs.

Panorama des enjeux sur et hors-site

Enjeux sur site

Le retrait des combustibles usés de la piscine du réacteur 3 a été achevé en février 2021. Celui des tranches 1 et 2 n'a pas dépassé l'étape préparatoire.

Le retrait des débris de combustible fondu, qui devait commencer par le réacteur 2 à l'horizon 2021, a été retardé « d'un an environ, en raison de l'épidémie de COVID-19 ».

Gestion de l'eau contaminée. De l'eau continue à être injectée en permanence pour refroidir les combustibles fondus des tranches 1 à 3. Cette eau hautement contaminée par son contact avec le combustible fondu, s'écoule par des fissures dans le confinement vers les sous-sols, où elle se mélange à de l'eau provenant d'une rivière souterraine. La mise en place d'un système de bypass spécifique et le pompage de l'eau souterraine avait permis de réduire le flux de 400 m^3/jour à quelques 170 m^3/jour. Cependant, durant l'année fiscale 2019, le pompage d'eau contaminée a de nouveau atteint les 180 m^3/jour et 228 m^3/jour à la mi-2021. Un volume équivalent est partiellement décontaminé puis stocké dans de grands réservoirs de 1.000 m^3. Il faut donc un nouveau réservoir tous les quatre jours et demi. La capacité de stockage sur site de 1,4 million de m^3 devrait arriver à saturation d'ici la fin 2022. Le projet de déversement d'eau contaminée dans l'océan reste très largement contesté, y compris à l'étranger. Si ce projet était réalisé, plus de 70 % de l'eau devrait à nouveau être traitée, et la totalité diluée d'un facteur 100. Ces opérations prendraient au moins 30 ans.

Santé des travailleurs. En date de février 2021, près de 7.000 travailleurs participaient aux travaux de démantèlement du site, dont 86 % de sous-traitants et 14 % seulement travaillant directement pour TEPCO (Tokyo Electric Power Company).

Enjeux hors-site

Les défis majeurs hors site concernent entre autres l'avenir de dizaines de milliers de personnes évacuées, la contamination des denrées alimentaires et la gestion des déchets de décontamination.

Évacuations. En avril 2021, selon les données officielles, le nombre d'habitants de la préfecture de Fukushima évacués s'élevait toujours à près de 35.500 – sans compter les « auto-évacués ». Selon la préfecture, leur nombre a atteint près de 165.000 au plus fort, en mai 2012. Le gouvernement envisage de continuer à lever les ordres de restriction pour les municipalités impactées. Toutefois, selon une enquête récente, 2,5 % seulement de la population est retournée à Okuma, et 9,2 % à Tomioka.

Contamination des denrées alimentaires. Selon les statistiques officielles, sur 54.412 échantillons prélevés durant les 11 premiers mois de l'année fiscale 2020 (5 fois moins que l'année précédente), seuls 127 produits ont été identifiés comme dépassant les limites réglementaires. En mars 2021, des restrictions d'importation post-3/11 étaient encore en vigueur dans 20 pays/régions (six de moins que l'année précédente), y compris dans l'Union Européenne.

Décontamination. La terre contaminée placée dans les zones d'entreposage temporaire de la préfecture de Fukushima est en cours de transfert vers des installations d'entreposage intermédiaire réparties sur huit secteurs. En date d'avril 2021, environ 76 % d'un volume total de 14 millions de m^3 avaient été transférés. Ces terres doivent subir plusieurs traitements successifs destinés à en réduire les volumes, avant d'être de nouveau transférées vers un site de stockage définitif.

Effets sanitaires

Dans la foulée des événements de mars 2011, le gouvernement japonais a relevé les limites d'exposition du public d'un facteur 20, les portant de 1 à 20 millisieverts par an. En mars 2017, il a mis fin aux aides au logement pour les personnes évacuées provenant de l'extérieur de certaines zones d'évacuation, dans le but d'encourager les résidents à retourner vers (ce qu'il reste) de leurs maisons.

Les accidents de Fukushima n'ont pas entrainé de décès liés à une exposition aigüe, mais l'exposition à des faibles doses de très nombreuses personnes, ainsi que plusieurs milliers de victimes d'effets indirects à la suite de l'évacuation.

Doses à la thyroïde et iodure de potassium. Sur la base des résultats des dépistages de la contamination externe du corps, au moins 1.000 personnes évacuées ont reçu des niveaux de doses à la thyroïde supérieurs à 100 millisieverts. Ceci aurait dû entrainer une décontamination et la prise d'iodure de potassium, ce qui n'a pas été le cas. Les instructions de la Commission

de la Sûreté Nucléaire (NSC) du Japon se sont égarées, et seules 10.000 personnes ont pris de l'iode à l'initiative des autorités de quatre communes.

Bilans thyroïdiens. Environ 380.000 enfants âgés de 18 ans ou moins (y compris in utero) au moment de l'accident sont éligibles à ce programme. En date de juillet 2021, un total de 260 cas « malins » ou « suspects de malignité » avaient été détectés : 219 ont subi une intervention et 218 ont été diagnostiqués comme cancer de la thyroïde. Le nombre de cas est plusieurs dizaines de fois supérieur à la normale. De plus, une ONG a rapporté au moins 19 cas supplémentaires de cancer de la thyroïde, non répertoriés, et potentiellement deux fois plus ; cela signifierait qu'un cas sur huit n'a pas été inclus dans les statistiques officielles.

Lien de causalité entre dose à la thyroïde et incidence de cancer. Les mesures des doses à la thyroïde chez les enfants n'ont débuté que deux semaines après le relâchement (alors que l'iode a une demi-vie de huit jours). Elles ont été effectuées seulement sur un millier d'enfants environ, à une distance de plus de 30 kilomètres de niveaux élevés de contaminations. L'incidence de cancers augmente clairement en fonction du niveau de contamination de l'environnement. Les niveaux d'exposition ont été estimés et segmentés par le Comité de surveillance, sur la base de mesures réalisées par avion, dans la zone d'évacuation et trois régions situées l'extérieur. La relation de causalité, clairement visible quand les doses d'exposition sont segmentées par zone contaminée, semble faussement disparaître lorsque les doses ont été segmentées en utilisant les estimations de l'UNSCEAR basées sur le cumul de l'exposition interne et externe et pour deux classes d'âge différentes.

Autres cas de cancers et autres décès en lien avec la catastrophe. Alors que les taux de mortalité étaient en baisse et ceux de morbidité étaient restés constants ou en baisse dans neuf autres préfectures, les taux d'incidence dans la préfecture de Fukushima semblent être à la hausse depuis 2012 pour les cancers de la thyroïde, de la prostate, du sein et des cervicales. Il n'a pas été rapporté d'anomalies congénitales. Les cas de décès par crise cardiaque ont augmenté de 10 à 20 % en 2011 dans la préfecture de Fukushima, pour les hommes comme pour les femmes, dans les classes d'âge 40–69 ans et 70 et plus. En tout, le nombre de « décès liés à la catastrophe »[6] officiellement reconnus à la suite des évacuations dans les préfectures de Fukushima, Iwate et Miyagi s'élève à 3.717, dont près des deux tiers à Fukushima. Ce chiffre est très élevé, si l'on tient compte du fait qu'on retrouve seulement 10 % du nombre de décès dus au séisme et au tsunami dans la préfecture de Fukushima.

Problèmes sanitaires chez les travailleurs de la centrale nucléaire. Sur les quelques 25.000 travailleurs qui sont intervenus sur le site dans les six mois suivant le 11 mars 2011, l'exposition maximale documentée était de 679 mSv, et 174 cas (0,7 %) de personnes ayant reçu plus de 100 mSv ont été rapportés. La dose moyenne était de 12,4 mSv. La fiabilité de ces données est très discutable, car, pendant au moins deux mois, les doses n'ont été mesurées qu'en groupe, faute de dosimètres individuels. Outre l'impact radiologique des travaux de démantèlement qui se poursuivent, les travailleurs sont exposés au cours de la manutention, de l'expédition et de la mise en stockage de millions de mètres cube de sol contaminé. Aucune étude de santé sur aucun groupe de travailleurs n'a été publiée au cours de la décennie écoulée.

6 - Sont inclus notamment les suicides, la dégradation de maladies chroniques par manque d'accès aux soins (perte des capacités hospitalières, difficultés d'accès aux hôpitaux), détérioration de l'état santé en raison d'une évacuation prolongée dans des contextes difficiles, perte des moyens de subsistance.

Estimations des coûts

Dix ans après le 3/11, la réponse à la catastrophe n'est encore qu'à des décennies de la finalisation des opérations fondamentales d'assainissement et de mitigation. En conséquence, les estimations de coûts restent des hypothèses. Le gouvernement vient toutefois de publier une réévaluation qui peut être comparée à une évaluation indépendante du Centre japonais de recherches économiques (JCER), un think tank indépendant reconnu.

Les estimations du gouvernement pour les coûts liés à la catastrophe couvrant le démantèlement, la décontamination et les compensations, sont passées de 74,3 milliards de US$$_{2021}$ en 2012, à 223,1 milliards de US$$_{2021}$. Les estimations pour le démantèlement ont augmenté d'un facteur 5 pour atteindre 75 milliards de US$$_{2021}$, et de 26 % pour les compensations qui atteignent désormais 74 milliards de US$$_{2021}$. La décontamination, non prise en compte dans les premières estimations, s'élèverait à 52,5 milliards de US$$_{2021}$, et une nouvelle entrée « divers » représenterait 21,6 milliards de US$$_{2021}$.

Les estimations du JCER, publiées en 2019, vont de 322 à 758 milliards de US$$_{2021}$, couvrant selon trois scénarios la décontamination (186 milliards de US$$_{2021}$) et les compensations (96 milliards), alors que les coûts du démantèlement varient entre 40 milliards (s'il est repoussé à 2050, mais sans inclure les coûts post-2050) et 476 milliards de US$$_{2021}$. L'écart de coûts de démantèlement dépend largement de la quantité et des options retenues pour le traitement de l'eau contaminée (la fourchette haute incluant l'extraction du tritium).

La différence majeure entre les estimations du gouvernement et celles du JCER réside dans le fait que les estimations officielles n'incluent pas le coût du stockage final des déchets radioactifs produits par le démantèlement et l'assainissement.

Décisions de justice sur les dommages et la responsabilité pénale dans le cadre des accidents nucléaires de Fukushima

Au cours des dix dernières années, de nombreuses plaintes relatives au nucléaire ont été déposées par des citoyens. Les procédures les plus significatives concernent notamment les tentatives d'établir un lien entre les responsabilités de la catastrophe, le propriétaire et exploitant de Fukushima, l'électricien TEPCO (Tokyo Electric Power Company), et le gouvernement japonais. De plus, des poursuites ont été engagées contre l'ensemble des réacteurs nucléaires en service et des procédures de redémarrage engagées par les exploitants, à l'exception du réacteur d'Higashidori.

Responsabilités du gouvernement. Les décisions de justice sont partagées : une décision de la Haute cour de Sendai de septembre 2020 ainsi que de la Haute cour de Tokyo de février 2021 reconnaissaient la responsabilité du gouvernement, alors qu'en février 2021, une autre décision de cette dernière rejetait, dans une affaire distincte, la responsabilité de l'État. Il a été fait appel dans ces trois affaires, et les décisions de la Cour suprême sont attendues dans l'année qui vient.

Procédure pénale contre TEPCO. En septembre 2019, le tribunal de Tokyo a relaxé trois anciens cadres de TEPCO accusés d'homicide involontaire à la suite de la catastrophe de Fukushima.

Responsabilité civile de TEPCO. Le procès intenté par les représentants des actionnaires de TEPCO pour clarifier la responsabilité civile des cadres de TEPCO est toujours en cours.

Plaintes contre les exploitants de réacteurs et les redémarrages. En date d'avril 2021, huit décisions de justice ont donné raison aux plaignants et suspendu le fonctionnement de réacteurs nucléaires, dont :

- Avril 2015. Ordonnance d'injonction provisoire du tribunal de Fukui contre l'exploitation des unités 3 et 4 de Takahama, obligeant l'arrêt des deux réacteurs alors en service.
- Décembre 2017. Injonction provisoire de la Haute cour d'Hiroshima contre l'exploitation de la tranche 3 d'Ikata, pour une période limitée de 9 mois.
- Janvier 2020. Injonction de la Haute cour d'Hiroshima contre l'exploitation d'Ikata.
- Décembre 2020. Jugement du Tribunal d'Osaka révoquant l'autorisation de modification d'installation pour les tranches 3 et 4 de la centrale d'Ohi. Ce cas était le premier depuis le début du désastre où les réclamations des résidents étaient retenues dans le cadre d'une procédure administrative.
- Mars 2021. Pour la première fois, injonction du Tribunal de Mito contre le redémarrage de la centrale de Tokai Daini, directement touchée par le 3/11, au motif de l'absence de plan d'évacuation crédible.

TCHERNOBYL – 35 ANS APRÈS LE DÉBUT DE LA CATASTROPHE

Il y a 35 ans, le 26 avril 1986, le monde connaissait le pire accident survenu dans une centrale nucléaire. Le réacteur numéro 4 de la centrale de Tchernobyl subissait une excursion de puissance. En quelques secondes, la puissance du réacteur atteignait plus de 100 fois la puissance nominale, et survenaient une explosion de vapeur puis d'hydrogène qui soulevèrent le toit du bâtiment réacteur. Environ 40 % du territoire européen a été contaminé, affectant potentiellement quelques 400 millions de personnes. Jusqu'à ce jour, les niveaux de radioactivité de diverses denrées alimentaires dans certaines régions dépassent toujours les limites réglementaires. Toutefois, beaucoup de choses ont changé en trois décennies et demie.

Enjeux hors-site

- **Le nombre de décès** liés à la catastrophe reste un point controversé. Avant 2005, seuls 50 décès étaient directement imputés à l'accident. En 2006, une étude OMS-AIEA donnait une estimation du nombre de décès en excès de 9.000. Le physicien américain Richard Garwin a estimé le nombre de cancer en excès à 24.000, d'autres experts indépendants à 40.000 sur les cinquante années à venir. Selon des scientifiques russes et biélorusses le nombre total de morts dus à des maladies radio-induites parmi les « liquidateurs » et la contamination des territoires suite à l'accident de Tchernobyl ainsi que les rejets atmosphériques qui suivirent, dépasserait même 200.000 en Europe et approcherait des 20.000 dans le reste du monde.
- **Les problèmes de santé** ne conduisent évidemment pas tous à la mort. La plupart des 6.800 patients atteints de cancer de la thyroïde dans les vingt premières années suivant

l'accident ont survécu, mais ont souffert de problèmes physiques et/ou psychologiques. Les études sur les effets transgénérationnels sont contradictoires.

- Le nombre d'**avortements** a explosé après l'accident. L'AIEA, a estimé entre 100.000 et 200.000 le nombre d'avortements liés aux craintes suscitées par la radioactivité au cours de la première année suivant l'accident, et ce rien qu'en Europe de l'Ouest.
- Les **traumatismes psychologiques** liés à la catastrophe, au déplacement, à la perte de communauté et de moyens de subsistance se sont traduits par une forte augmentation de maladies mentales, comme la dépression, l'anxiété et les addictions. Des troubles neuropsychiatriques directement liés à l'irradiation du cerveau ont également été mis en évidence. En 2018, le gouvernement ukrainien a fait état d'estimations selon lesquelles les maladies mentales seraient environ deux fois plus répandues et les taux de suicide 20 fois plus élevés chez les liquidateurs que dans le reste de la population. En Ukraine, 20 ans après le début de la catastrophe de Tchernobyl, quelques 83 % de la population affectée par l'accident avaient pâti de conséquences néfastes pour la santé, 92 % chez les liquidateurs.
- La **contamination persistante de denrées alimentaires** reste répandue en Europe. Dans le sud de l'Allemagne par exemple, on trouve du gibier sauvage et des champignons montrant toujours un niveau de contamination au césium 137 plusieurs fois supérieur aux limites de commercialisation.

Enjeux sur site

- Un **nouveau confinement**, une structure en forme d'arche, appelé « New Safe Confinement » (NSC), recouvre le réacteur 4 depuis novembre 2016. Cette arche est la plus grande structure terrestre mobile jamais construite. Elle a pour objectif d'isoler hermétiquement le réacteur de l'environnement. Elle a une durée de service attendue de 100 ans minimum.
- Le **démantèlement** des tranches 1 à 3 devrait durer jusqu'en 2065.
- **Combustible irradié**. Quelques 21.000 assemblages issus des quatre réacteurs, soit 2.500 tonnes, ont été transférés des piscines des réacteurs vers une installation centralisée d'entreposage, comprenant 5 piscines. Ils doivent être ultérieurement envoyés vers une installation d'entreposage à sec dont l'autorisation d'exploitation a été délivrée en avril 2021.
- Les **visiteurs de la zone d'exclusion de Tchernobyl** – que le gouvernement ukrainien tente d'inscrire au Patrimoine de l'humanité de l'UNESCO – ont vu leur nombre passer de 1.000 en 2014 à 200.000 en 2019.
- **Refuge faunique ?** Le retour de la faune sauvage qui a suivi le départ des populations de la zone a fait l'objet d'une importante couverture médiatique ; toutefois, son abondance a probablement été largement modérée par les effets du rayonnement. Des études portant sur une trentaine d'espèces ont montré un taux inhabituellement élevé de mutations génétiques liées au rayonnement, et suggère que les effets transgénérationnels de la contamination radioactive touchant l'ensemble de la population pourraient être importants.
- Les **incendies**, autrefois rares, sont devenus plus fréquents dans la zone d'exclusion, souvent provoqués par des pyromanes ; ils remobilisent des radionucléides et provoquent une augmentation de la radioactivité ambiante.

NUCLÉAIRE ET ÉNERGIE CRIMINELLE

Un nombre impressionnant de révélations au cours des dernières années concernant des irrégularités, fraudes, falsifications, cas de chantage, de corruption, de sabotage, de vol, et autres activités criminelles dans l'industrie nucléaire dans différents pays suggère l'existence d'un problème systémique d'« énergie criminelle » dans le secteur. Alors que le WNISR fait état depuis des années de pratiques illégales et criminelles, le terme « *corrupt* » est utilisé quatorze fois dans le WNISR2020 en lien avec des cas de corruptions impliquant neuf pays sur quatre continents.

Nous livrons cette année la première analyse internationale systématique sur le sujet dans le cadre de ce rapport annuel. Bien qu'elle ne soit pas exhaustive, cette analyse apporte plusieurs enseignements remarquables :

- Les activités criminelles dans le secteur nucléaire ne sont pas nouvelles. Certains scandales majeurs remontent à des dizaines d'années, d'autres perdurent depuis des décennies.
- Des groupes du crime organisé fournissent de la main d'œuvre à des installations nucléaires depuis plus de dix ans – à l'instar des Yakuza au Japon.
- D'importantes actions de sabotage interne ont frappé des pays nucléaires majeurs au cours des dernières années – comme une centrale nucléaire belge – sans conduire à aucune arrestation.
- Il n'existe pas de base de données publique, systématique et exhaustive sur le sujet.
- En 2019, l'AIEA a publié un rapport relatant des cas d'articles contrefaits ou frauduleux dans au moins sept pays depuis les années quatre-vingt-dix au moins.
- Dans l'Index de la perception de la corruption 2020 de Transparency International, environ la moitié des 35 pays exploitant ou construisant des centrales nucléaires sur leur territoires se sont vu décerner une note inférieure à 50 sur 100.
- Dans le Bribe Payers Index (BPI, publié pour la dernière fois en 2011), sept des dix pays les plus mal notés, sur les 28 étudiés, exploitent ou construisent des réacteurs nucléaires sur leur territoire.
- La première partie du chapitre s'intéresse à 14 cas aux répercussions importantes (sûreté, gouvernance) portés devant la Justice sur la période 2010–2020 et impliquant soit des compagnies provenant de ou ayant eu lieu dans les pays figurant en 2020 au Top-8 des parcs nucléaires (en capacité en service)[7], dont :
    - **International (Ukraine/République Tchèque), Energoatom/Skoda, Octobre 2020** – Condamnation par un tribunal suisse de Mykola Mrtynenko, ancien député ukrainien et président de la Commission de l'énergie à 28 mois de prison pour blanchiment aggravé via des banques suisses ;
    - **Japon, KEPCO, Septembre 2019** – Une enquête interne de Kansai Electric Power Co. (KEPCO) révèle que le président de la société et 19 autres employés avaient reçu de l'ancien maire-adjoint, Aiji Moriyami, de l'argent liquide et des cadeaux d'une valeur de 3 millions de dollars pour inciter KEPCO à travailler avec des fournisseurs locaux auxquels il était lié.

7 - USA, France, Chine, Russie, Corée du Sud, Canada, Ukraine et Japon.

- **France, Areva, 2016** – AREVA informe l'autorité de sûreté nucléaire (ASN) d'« irrégularités dans le contrôle de fabrication » dans son usine Creusot-Forge, consistant en « des incohérences, des modifications ou des omissions dans les dossiers de fabrication portant sur des paramètres de fabrication ou des résultats d'essais » d'environ 400 pièces produites depuis 1965. Par la suite, EDF identifiera 2.982 « anomalies » dans les dossiers de fabrications de 1 580 pièces déjà installées dans les 58 réacteurs français alors en service.
- **International (Russie/USA), Rosatom, 2015** – L'ancien président de la filiale de Rosatom, TENAM, implantée aux États-Unis, Vadim Mikerin, est condamné à une peine de prison de 4 ans pour sa participation à un système de corruption de 2,1 millions de dollars impliquant plusieurs sociétés américaines et des responsables de Rosatom.
- **International (Chine, Corée du Sud, USA), 2012** – Le PDG et quatre dirigeants de Control Component Inc. (CCI), un fabricant américain de valves de contrôle, sont condamnés à des peines allant jusqu'à 5 ans de prison, pour avoir fait « 236 paiements corrompus à des fonctionnaires ou employés de sociétés publiques et privées dans 36 pays, pour un montant total de 6,85 millions de dollars environ et réalisé des profits nets d'environ 46,5 millions de dollars sur des ventes liées à ces paiements corrompus. »
- **Corée du Sud, Novembre 2012** – Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) dépose des documents falsifiés concernant la qualification d'équipement dans le cadre de 60 contrats d'approvisionnement portant sur 7.682 pièces.

→ La deuxième partie du chapitre propose une comparaison internationale d'évènements impliquant sabotage et crime organisé sur le site de centrales nucléaires au Japon, Russie et États-Unis, dont :

- **Centrale nucléaire de Fukushima, Japon, Octobre 2014** – Yuuki Sugawa, membre de la mafia Matsuba Kai, est arrêté en 2014 pour recrutement illégal de travailleurs pour les opérations de décontamination à Fukushima. En mai 2012, Makoto Owada, membre éminent de Sumiyoshi-kai, deuxième plus important groupe de Yakuza du pays, avait été arrêté pour le même crime.
- **Centrale nucléaire de St. Lucie, États-Unis, Août 1996** – Des employés encollent des interrupteurs de secours dans une zone de haute sécurité pendant une grève dénonçant leurs conditions de travail. Le mois précédent des cadenas et portes encollés avaient déjà été découverts.

DECOMMISSIONING STATUS REPORT

Alors qu'un nombre croissant d'installations nucléaires atteignent la durée de vie initialement prévue ou sont fermées en raison de la dégradation des conditions économiques, leur démantèlement devient un enjeu majeur. (Ce chapitre ne couvre pas la gestion des déchets du démantèlement.)

→ À la mi-2021, sur les 196 réacteurs arrêtés – sept de plus qu'un an plus tôt – 176 étaient en attente ou à différents stades de démantèlement, dont 74 en « **confinement à long terme** ».

→ Seuls 20 réacteurs ont été totalement démantelés : 14 aux États-Unis, cinq en Allemagne et un au Japon (sans changement). Dix d'entre eux seulement sont retournés « à l'état d'origine » (dit « greenfield »), sans restriction d'usage.

- La durée moyenne du démantèlement est de l'ordre de 20 ans, avec une fourchette assez large allant de 6 à 42 ans (les deux extrêmes correspondant à de très petits réacteurs, soit 22 MW et 17 MW respectivement).
- L'analyse portant sur 11 pays montre que la progression des projets de démantèlement dans le monde reste lente. Sur 196 réacteurs arrêtés, 57 sont dans la phase appelée ici « **warm-up** »[8] et dix seulement dans la phase « **zone chaude** »[9].
- Aucun des premiers pays nucléaires Canada, France, Royaume-Uni et Russie n'ont à ce jour réalisé le démantèlement complet d'un seul réacteur.

LES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES - SMALL MODULAR REACTORS (SMRs)

Dans la suite des évaluations de l'avancement et des perspectives des petits réacteurs modulaires (SMR) publiées dans de précédentes éditions du WNISR, la mise à jour de cette année ne fait pas état de grands changements, mais seulement de modestes progrès.

Argentine. Le projet CAREM-25, en construction depuis 2014, serait à 58 % achevé. Le COVID-19 a provisoirement entrainé un arrêt total de la construction. La fin des travaux devrait prendre encore trois ans.

Canada. L'idée de promouvoir les SMR remporte un fort soutien des gouvernements, au niveau fédéral et provincial. Le Ministère fédéral des ressources naturelles a publié un plan d'action qui vise « [des] premières unités opérationnelles d'ici la fin des années 2020. » Plusieurs modèles sont à l'étude. La première phase d'évaluation par l'autorité de sûreté pour deux designs (le SSR-W300 de Moltex, le SMR 160 de Holtec) a été terminée, mais de nombreux points restent à résoudre.

Chine. Deux modules (2 fois 100 MW) de réacteur à haute-température, dont le développement a commencé dans les années soixante-dix, sont en construction depuis 2012. Après plusieurs reports, leur mise en service est fixée à 2021, soit quatre ans après l'échéance initiale. La taille du module devrait être portée à 600 MW dans un second projet, soit le double du seuil de 300 MW qui qualifie les SMR. La construction d'un réacteur de type ACP100 aurait commencé, sans faire l'objet d'annonces officielles ; selon son promoteur, le prix au kilowatt sera deux fois supérieur à celui d'un gros réacteur.

Inde. Un réacteur avancé à eau lourde (Advanced Heavy Water Reactor ou AHWR) est en développement depuis les années quatre-vingt-dix, et sa mise en construction est régulièrement repoussée. Aucune avancée majeure rapportée depuis le WNISR2019.

Russie. À l'issue d'une construction plus de quatre fois plus longue que prévu, deux « réacteurs flottants » ont finalement été couplés au réseau en décembre 2019. Leur coût par unité de capacité installée a été évaluée à près du double de celui du plus cher des réacteurs de Génération III. Ils ont affiché de piètres performances au cours de l'année 2020, avec un facteur

8 - Phase post-opérationnelle qui comprend le démontage des systèmes qui n'entrent pas dans le processus de démantèlement. Un des indicateurs clés de cette phase est le déchargement du combustible. (WNISR)

9 - Phase qui comprend les activités de démantèlement dans la « zone chaude », c'est à dire démantèlement des composants fortement contaminés, comme les générateurs de vapeur. (WNISR)

de charge de 29 % et 16 % respectivement. La construction d'un surgénérateur de 300 MW refroidi au plomb a été lancée.

Corée du Sud. Le réacteur SMART (System-Integrated Modular Advanced Reactor) est en développement depuis 1997. En 2012, le design a été approuvé par l'autorité de sûreté nucléaire, mais aucune commande n'a suivi, le réacteur n'étant pas compétitif. Des ingénieurs saoudiens participent à la refonte d'un modèle plus gros.

Royaume-Uni. Le gouvernement propose jusqu'à 0,5 milliard de dollars pour le développement des SMR dans le cadre d'un montage appelé « Advanced Nuclear Fund ». Rolls-Royce, la seule société à avoir affiché de l'intérêt, a récemment porté la capacité de son modèle en pré-conception à 470 MW, dépassant ainsi la taille d'un SMR. Sa conception générale doit être soumise au régulateur au deuxième semestre 2021.

États-Unis. Le DOE (Department of Energy) a financé des sociétés chargées de promouvoir le développement des SMR. L'autorité de sûreté a seulement délivré une évaluation finale de sûreté à un modèle de NuScale. Mais peu après, le développeur a augmenté la puissance du module de 25 %, et les modifications doivent être certifiées par l'autorité de sûreté. Dans le même temps, avec le retrait de huit municipalités, NuScale n'a plus sous contrat provisoire qu'un neuvième de la puissance visée à l'origine de 12 modules par site.

Ce qui ressort dans l'ensemble, ce sont des retards supplémentaires dans le développement et la construction, et aucune nouvelle certification au-delà d'un concept NuScale déjà obsolète. Et aucun signe de percée majeure pour les SMR, tant sur le plan technologique que commercial.

LE NUCLÉAIRE FACE AU DÉVELOPPEMENT DES RENOUVELABLES

Le déploiement et la production d'électricité à partir des renouvelables a mieux résisté aux effets de la pandémie de COVID-19 que le secteur nucléaire. En 2020, le nucléaire enregistrait 0,4 GW nets de capacité supplémentaire (mises en service moins fermetures), alors que les renouvelables connaissaient une hausse record de 256 GW (+30 %) ; la production nucléaire a chuté de 4 %, et celle des renouvelables (hors hydro) a augmenté de 13 %.

Coûts. L'analyse des coûts actualisés de l'énergie (LCOE) montre qu'entre 2009 et 2020, les coûts du solaire commercial ont baissé de 90 % et ceux de l'éolien de 70 %, quand dans le même temps, ceux du nouveau nucléaire augmentaient de 33 %. L'écart a continué à se creuser entre 2019 et 2020.

Investissements. En 2020, pour la deuxième année consécutive, et la quatrième fois depuis 2015, le total des investissements dans l'électricité renouvelable (hors hydro) a dépassé les 300 milliards de dollars, soit près de 17 fois le montant des décisions d'investissement connues pour la construction de réacteurs nucléaires (environ 18 milliards pour 5 GW). Cela représente moins d'un huitième des investissements dans l'éolien (142 milliards de dollars) ou le solaire (149 milliards de dollars).

Capacité installée. En 2020, la hausse annuelle de l'éolien a presque doublé, avec 111 GW, le solaire photovoltaïque a augmenté de 127 GW (+22,5 %), deux nouveaux records qui ont largement contribué à celui des renouvelables en général (hors hydro) avec 256 GW supplémentaires couplés au réseau dans le monde. En comparaison, le nucléaire a connu une augmentation nette de 0,4 GW.

Production d'électricité. En 2020, au niveau mondial, le taux de croissance de la production a atteint 21 % pour le solaire, environ 12 % pour l'éolien, alors que le nucléaire chutait de 4 %. La production renouvelable hors hydro représentait 16,5 % de plus que le nucléaire.

Électricité bas-carbone. Comparée à 1997, date de la signature du Protocole de Kyoto sur le changement climatique, en 2020, la production annuelle (nette) présentait une hausse de 1.580 TWh pour l'éolien, de 855 TWh pour le photovoltaïque, contre 289 TWh pour le nucléaire. Comparé à l'année 2010, soit avant Fukushima, la production d'électricité renouvelable (hors hydro) a enregistré une hausse de 2.386 TWh, de 861 TWh pour l'hydraulique, alors que le nucléaire a connu une *baisse* de 68 TWh.

Part du mix électrique. Après avoir enregistré la plus forte hausse annuelle, la part des renouvelables (hors hydro) dans la production d'électricité a atteint 11,7 %, creusant l'écart avec les 10,1 % du nucléaire.

En **Chine**, la production éolienne à elle seule avec ses 466 TWh a une fois de plus largement dépassé la production nucléaire de 366 TWh, alors que le solaire atteint déjà 261 TWh. Ensemble, le solaire et l'éolien produisent près de deux fois plus que le nucléaire.

En **Inde**, l'éolien et le solaire ont produit chacun 50 % de plus que le nucléaire ; leur production combinée représentait donc trois fois celle de l'ensemble des centrales nucléaires.

Dans l'**Union Européenne**, les renouvelables (hydro compris) ont pour la première fois en 2020 dépassé les combustibles fossiles pour devenir la première source d'électricité, avec 38 % du mix électrique, contre 37 % pour les fossiles et 25 % pour le nucléaire. C'est aussi la première année où les renouvelables *hors hydro* ont produit plus que le nucléaire.

Aux **États-Unis**, avec une baisse de 3,6 % due aux effets de la pandémie de COVID-19 et de la concurrence des autres sources, le nucléaire est tombé à son niveau le plus faible depuis 2012. À l'inverse, les États-Unis ont connu une production renouvelable record, représentant environ 12 % du total contre 20 % pour le nucléaire. La production éolienne a enregistré une hausse de 14 %, et le solaire de 22 %.

NUCLÉAIRE ET RÉSILIENCE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Des études récentes ont montré que les systèmes énergétiques sont de plus en plus affectés par les changements climatiques en raison de l'amplification de la variabilité, de l'intensité et de l'imprévisibilité des conditions météo. La résilience du système électrique peut être définie au sens large comme sa capacité à faire face, surmonter et limiter l'impact de différents types d'évolutions ou d'évènements potentiellement perturbateurs. Le chapitre consacré au *Nucléaire et résilience au changement climatique* apporte une vue d'ensemble sur ce type de problèmes

qui affectent l'ensemble des filières de production et des infrastructures de transport et de distribution d'électricité, il est illustré par une étude de cas sur la France.

- Le fonctionnement de toute centrale thermique est généralement sensible aux variations de températures de l'air et de l'eau. Les centrales nucléaires sont particulièrement sensibles à la sécheresse.
- La source d'énergie renouvelable la plus vulnérable face aux changements climatiques est l'hydraulique, ce qui n'a rien d'étonnant étant donnée sa forte dépendance à la disponibilité de ressources en eau. La production éolienne est fortement liée à la densité du vent sur certains sites. La production solaire dépend de la couverture nuageuse et de la température ambiante. Le rendement des panneaux solaires baisse avec l'élévation de la température ambiante.
- Des températures élevées de l'air entrainent des pertes de transport et de distribution d'électricité plus importantes. Des recherches ont montré que pour chaque augmentation de 5°C de la température ambiante, la capacité de transit maximale diminuerait de 7,5 % en moyenne. Les incendies peuvent également avoir un fort impact sur les réseaux.

Enjeux spécifiques pour le nucléaire. On distingue deux schémas principaux :

- Les **perturbations des systèmes de refroidissement** provoquées par les sécheresses et les canicules, qui comprennent les indisponibilités dues à la limitation de l'évacuation de la puissance thermique produite entrainant soit une réduction soit un arrêt total de la production.
  - En Europe, les températures extrêmes constituent le principal facteur d'indisponibilités climatiques. Au cours des deux dernières décennies, des vagues de chaleur ont fréquemment forcé l'arrêt ou la réduction de la production de réacteurs nucléaires, les plus importantes ayant été observées en 2003, 2006, 2015 et 2018.
- L'impact des **tempêtes violentes,** qui comprend les indisponibilités provoquées par des évènements météos violents comme des ouragans ou des typhons, souvent accompagnés d'inondations, de foudre, etc. qui peuvent en particulier affecter les réseaux électriques auxquels sont connectés les centrales.
  - Les centrales situées en Amérique du Nord ou en Asie de l'Est, sont particulièrement susceptibles d'être affectées par les cyclones.

Effets climatiques indirects et installations nucléaires autres que les réacteurs :

- **Les effets climatiques indirects** affectant les réacteurs nucléaires sont par exemple la prolifération d'organismes vivants (végétaux, méduses…) pouvant bloquer l'entrée des prises d'eau de refroidissement, les incendies pouvant nécessiter une évacuation de l'installation, des inondations pouvant entraîner une perte de l'alimentation électrique ou couper les voies d'accès, ou l'élévation du niveau de la mer pouvant aggraver le risque de submersion lors de tempêtes.
- Si le WNISR ne couvre pas les installations de la chaine du combustible comme les mines d'uranium, les usines de fabrication des combustibles et de retraitement, ou les installations

de stockage ou d'entreposage des déchets, il convient toutefois de noter que toutes risquent d'être affectées par des évènements provoqués par le changement climatique.

Le cas de la France – Événements anciens et récents

- Les premiers cas rapportés de perturbation de la production nucléaire liée aux conditions météorologiques remontent à 1976. En août 2003, 10–15 GW, soit 16–24 % de la capacité nucléaire installée, ont été rendus indisponibles en raison de températures élevées.
- Parmi les incidents récents on relève l'indisponibilité de trois des quatre réacteurs de 900 MW de la centrale du Blayais, dans la région de Bordeaux, en mars 2021, en raison de l'accumulation de sédiments dans le tambour des stations de pompage, et un arrêt d'un mois des deux réacteurs de 1450 MW de Chooz, à la frontière belge, en raison du faible débit de la Meuse en août-septembre 2020.

Le cas de la France – Impact sur la production 2015–2020

Une étude du gestionnaire du réseau de transport d'électricité (RTE) a analysé l'impact de la météo sur la production nucléaire entre 2015 et 2020. Elle a montré que :

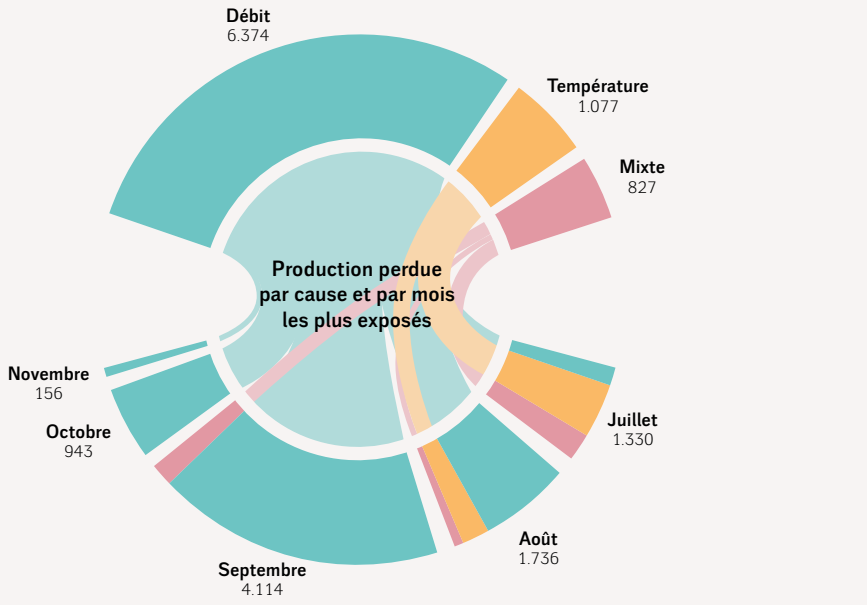
- Entre 2015 et 2020, les conditions climatiques ont été responsables d'environ 4.000 heures d'indisponibilité complète (production zéro), soit une perte de l'ordre de 166 réacteurs-jours de production, et environ 4.000 heures d'indisponibilité partielle.
- Des indisponibilités climatiques se produisent chaque année : 2016 a été l'année la moins touchée, avec seulement dix cas d'indisponibilités partielles, alors qu'en 2018, année la plus touchée, il y a eu 23 indisponibilités totales et 103 baisses de puissance.
- Au cours de ces 6 années, 26 réacteurs ont été affectés au moins une fois (y compris les deux réacteurs de Fessenheim) et 12 ont été arrêtés à un moment donné (dont une tranche de Fessenheim).
- La perte de production cumulée a atteint 8,5 TWh, soit une moyenne de 1,4 TWh par an. Ceci ne représente que 0,4 % environ de la production nucléaire annuelle française.
- Les pertes de production semblent orientées à la hausse, et la production de l'année 2020, avec 3 TWh de pertes climatiques, a été la plus affectée.
- Si les chiffres absolus de pertes de production paraissent négligeables, il faut noter qu'elles sont difficilement prévisibles et souvent concentrées sur une période très courte de l'année. La canicule de 2019 a par exemple impacté neuf réacteurs et entrainé l'indisponibilité de 10 % de la puissance nucléaire installée, ce qui a provoqué à son tour une hausse marquée des prix sur le marché spot.
- Les indisponibilités climatiques sur cette période ont été concentrées sur les mois de juillet à novembre, et la moitié des pertes de production ont eu lieu en septembre. Le site de Chooz a connu une période d'indisponibilité totale de 28 jours en septembre 2020. Septembre est le mois où le débit du Rhône et de la Meuse est le plus faible, et il est de plus en plus sujet à de fortes chaleurs plus tardives.

- Parmi les quatorze centrales fluviales françaises, neuf ont connu des indisponibilités climatiques sur cette période, et trois ont perdu plus d'1 TWh de production : Chooz (4,4 TWh), Saint Alban (2 TWh) et Bugey (1,1 TWh).
- Il est possible de classer les indisponibilités climatiques en trois grandes catégories en fonction de leurs causes et de la période où elles sont les plus fréquentes : indisponibilité d'été (température), d'automne (baisse du débit) et d'hiver (inondations ou tempêtes).
  - Les **indisponibilités d'été, causées par des vagues de chaleur,** sont généralement courtes mais peuvent affecter plusieurs sites simultanément. Leur fréquence va très probablement augmenter avec le réchauffement du climat.
  - Les **indisponibilités d'automne** s'étendent généralement sur des périodes assez longues, mais restent plus localisées. Elles surviennent pendant les périodes d'étiage qui ne permettent pas de diluer efficacement les rejets thermiques des centrales, ce qui complique le respect des limites réglementaires de température.
  - Les **indisponibilités d'hiver** sont liées à des évènements climatiques dont la probabilité est plus faible mais qui comportent des risques plus importants (par exemple, inondation du site du Blayais en décembre 1999, colmatage des entrées d'eau de Cruas à la suite d'une crue du Rhône en décembre 2009…).

Figure 3 · Indisponibilités climatiques des réacteurs nucléaires français par cause et par mois

Indisponibilités climatiques des réacteurs nucléaires français 2015–2020

en GWh par mois et par cause la plus probable



© WNISR - Mycle Schneider Consulting

Sources : REMIT, compilé par Callendar, 2021

Les options d'adaptation sont limitées pour les centrales existantes. Alors que la plupart des stratégies d'adaptation sont fondées sur des modélisations climatiques, EDF utilise des extrapolations. Les maximums de température sont calculés par extension sur 10 ans des

observations historiques. Cette méthode a été mise en défaut dans le passé : pendant l'été 2019, les températures extérieures ont dépassé les hypothèses de température exceptionnelle à Paluel, Penly et Gravelines.

Les implications en matière de sûreté des interactions climat-nucléaire restent mal comprises, alors que des réacteurs sont introduits dans des environnements climatiques potentiellement hostiles comme le Moyen Orient ou le Bangladesh par exemple. Des événements climatiques extrêmes inattendus pourraient avoir des conséquences particulièrement préjudiciables, s'ils survenaient en même temps qu'un accident nucléaire.

TABLE OF CONTENTS

ACKNOWLEDGMENTS 3

FOREWORD 15

KEY INSIGHTS 17

EXECUTIVE SUMMARY AND CONCLUSIONS 19

INTRODUCTION 36

GENERAL OVERVIEW WORLDWIDE 42

- PRODUCTION AND ROLE OF NUCLEAR POWER . . . 42
- OPERATION, POWER GENERATION, AGE DISTRIBUTION . . . 47
- OVERVIEW OF CURRENT NEW-BUILD . . . 51
- CONSTRUCTION TIMES . . . 53
  - Construction Times of Reactors Currently Under Construction . . . 53
  - Construction Times of Past and Currently Operating Reactors . . . 53
- CONSTRUCTION STARTS & CANCELLATIONS . . . 56
- OPERATING AGE . . . 59
- LIFETIME PROJECTIONS . . . 62

FOCUS COUNTRIES 67

- BELARUS FOCUS . . . 67
- CHINA FOCUS . . . 71
- FINLAND FOCUS . . . 75
  - Olkiluoto-3 (OL3) . . . 77
  - Faulty Pressurizer Safety Relief Valves . . . 80
- FRANCE FOCUS . . . 82
  - Introduction . . . 82
  - Worst Performance in Decades . . . 84
  - Nuclear Unavailability Review 2020 . . . 87
  - Lifetime Extension, ASN's Conditional Generic Approval . . . 89
  - The Flamanville-3 EPR Saga Continued . . . 92
  - An EPR "New Model", an "EPR2"? . . . 94
  - Increasing Role for Renewables Welcome . . . 95

INDIA FOCUS . . . 95
Strong Push for Renewables. . . . 96
Nuclear Construction Experiencing Delays . . . 97
Rising Costs . . . 98
Reactor Imports Make Slow Progress . . . 99
JAPAN FOCUS . . . 100
Overview . . . 100
Kansai Electric Dominates Nuclear Operations . . . 103
Prospects for Other Additional Reactor Operations . . . 112
Reactor Closures . . . 117
Energy Policy Key to Nuclear Future . . . 119
Prospects for Nuclear Power . . . 122
SOUTH KOREA FOCUS . . . 124
Construction . . . 124
Typhoon Shutdowns . . . 125
Permanent Closure . . . 126
Containment Liner Plate Corrosion . . . 127
Wolsong Debacle and Uncertainty Over Energy Policy . . . 128
Moon Administration's Energy Policy Under Threat . . . 130
TAIWAN FOCUS . . . 131
Reactor Closures . . . 131
Referendum on Lungmen . . . 132
Energy policy . . . 133
UNITED KINGDOM FOCUS . . . 134
Serious Ageing Issues. . . . 136
Pathways to Net Zero . . . 138
Nuclear Newbuild . . . 139
UNITED STATES FOCUS . . . 147
Overview . . . 147
Extended Reactor Licenses . . . 149
Reactor Closures . . . 152
Reactor Construction . . . 155
Guilty Pleas and On-going FBI Investigations Over V.C. Summer Project . . . 162
Securing Subsidies to Prevent Closures . . . 164

Ohio Corruption Scandal Terminates Nuclear Subsidies Legislation . . . 170
Progress Towards Securing Federal Subsidies . . . 172

FUKUSHIMA STATUS REPORT · TEN YEARS AFTER 175

OVERVIEW OF ONSITE AND OFFSITE CHALLENGES . . . 175
Introduction . . . 175
Onsite Challenges . . . 175
Offsite Challenges . . . 178
Conclusion . . . 179
HEALTH EFFECTS OF THE FUKUSHIMA DAIICHI NUCLEAR POWER PLANT DISASTER . . . 180
Introduction . . . 180
Principles of Radiation Health Effects . . . 181
Survey on Health Effects . . . 182
Health Problems of Nuclear Power Plant Workers . . . 189
Conclusion . . . 189
ESTIMATED COSTS OF FUKUSHIMA DISASTER: OFFICIAL AND INDEPENDENT ASSESSMENTS . . . 190
Introduction . . . 190
Estimates by the Government in 2016 and 2021 . . . 191
An Independent Estimate by JCER in 2017 . . . 193
An Updated Estimate by JCER in 2019 . . . 194
Conclusions . . . 196
JUDICIAL DECISIONS ON DAMAGES AND CRIMINAL LIABILITY FOR THE FUKUSHIMA NUCLEAR ACCIDENTS . 197
Introduction . . . 197
Historic Ikata Case: Japanese Supreme Court Demands High Level of Nuclear Safety . . . 198
Fukushima Case: Judicial Decisions Regarding the Responsibility of TEPCO and the State . . . 198
Residents Win Lawsuits, Preventing Restarts . . . 201
Volcanic Controversy over the Sendai Nuclear Power Plant . . . 202
Mito District Court Rules Against Restart of Tokai Daini . . . 206
Conclusion . . . 207

CHERNOBYL · 35 YEARS AFTER THE DISASTER BEGAN 208

INTRODUCTION . . . 208
ONSITE CHALLENGES . . . 208
New Safe Confinement (NSC) . . . 208
Spent Fuel and Radioactive Waste . . . 210
Tourism, Conservation, and Research . . . 211

OFFSITE CHALLENGES . . . 213

NUCLEAR POWER AND CRIMINAL ENERGY 218

INTRODUCTION . . . 218

LITERATURE REVIEW . . . 220

TYPOLOGY OF CORRUPT PRACTICES . . . 223

Bribery . . . 224

Grand Collusion Schemes, Counterfeiting, Fraud . . . 227

CASE STUDIES: SABOTAGE AND ORGANIZED CRIME IN JAPAN, RUSSIA, AND THE U.S. . . . 231

Sabotage . . . 231

Organized Crime and Nuclear Trafficking . . . 232

CONCLUSION . . . 233

DECOMMISSIONING STATUS REPORT 2021 235

INTRODUCTION . . . 235

Elements of National Decommissioning Policies . . . 235

GLOBAL OVERVIEW . . . 236

Decommissioning Worldwide . . . 236

Overview of Reactors with Completed Decommissioning . . . 237

Overview of Reactors with Ongoing Decommissioning in 11 Selected Countries . . . 238

Brief Overview of Reactors with Ongoing Decommissioning . . . 239

COUNTRY CASE STUDIES . . . 241

Focus Country: Germany . . . 242

United States . . . 246

Canada . . . 250

Japan . . . 250

South Korea . . . 252

France . . . 253

Lithuania . . . 254

Italy . . . 255

United Kingdom . . . 256

Spain . . . 257

Russia . . . 258

CONCLUSION ON REACTOR DECOMMISSIONING . . . 259

POTENTIAL NEWCOMER COUNTRIES 261

ASIA . . . 261

Suspended or Cancelled Programs . . . 263

MIDDLE EAST . . . 266

CONTINENTAL EUROPE . . . 277

AFRICA . . . 279

SMALL MODULAR REACTORS 280

ARGENTINA . . . 280

CANADA . . . 280

CHINA. . . . 282

INDIA . . . 283

RUSSIA . . . 284

SOUTH KOREA . . . 285

UNITED KINGDOM . . . 287

UNITED STATES . . . 288

CONCLUSION . . . 289

NUCLEAR POWER VS. RENEWABLE ENERGY DEPLOYMENT 290

INTRODUCTION. . . . 290

INVESTMENT . . . 291

TECHNOLOGY COSTS . . . 292

INSTALLED CAPACITY AND ELECTRICITY GENERATION . . . 296

STATUS AND TRENDS IN CHINA, THE EUROPEAN UNION, INDIA, AND THE UNITED STATES . . . 299

China . . . 299

European Union . . . 302

India . . . 304

United States . . . 305

CONCLUSION ON NUCLEAR POWER VS. RENEWABLE ENERGY . . . 307

NUCLEAR POWER AND CLIMATE CHANGE RESILIENCE 308

INTRODUCTION. . . . 308

Why climatic disruptions matter?. . . . 311

OVERVIEW OF CLIMATIC DISRUPTIONS TO THE OPERATION OF NUCLEAR POWER PLANTS. . . . 312

Indirect climatic disruptions. . . . 315

CASE STUDY FRANCE . . . 316
Climate-induced Impact on Nuclear Generation in France Since 2015. . . . 318
Most Affected Power Plants . . . 322
Causes of Climate-Induced Unavailabilities in France . . . 324
MANAGING CLIMATE RISKS IN THE FUTURE . . . 333
Limited Adaptation Options for the Existing, Ageing Fleet . . . 333
Factoring Climate Change into New Projects . . . 334
CONCLUSION . . . 336

ANNEX 1 – OVERVIEW BY REGION AND COUNTRY 339

AFRICA . . . 339
South Africa . . . 339
THE AMERICAS . . . 342
Argentina. . . . 342
Brazil . . . 344
Canada . . . 345
Mexico . . . 348
United States . . . 348
ASIA & MIDDLE EAST . . . 348
China . . . 348
Iran . . . 349
Pakistan. . . . 351
South Korea . . . 352
Taiwan . . . 352
United Arab Emirates. . . . 352
EUROPEAN UNION (EU27) . . . 354
WESTERN EUROPE . . . 356
Belgium. . . . 357
Finland . . . 360
France . . . 360
Germany . . . 360
Netherlands . . . 363
Spain . . . 366
Sweden . . . 369
Switzerland. . . . 372

CENTRAL AND EASTERN EUROPE 375
Bulgaria 375
Czech Republic 376
Hungary 378
Romania 379
Slovakia 381
Slovenia 383
FORMER SOVIET UNION 384
Armenia 384
Russia 386
Ukraine 389

ANNEX 2 – STATUS OF JAPANESE NUCLEAR FLEET 392

ANNEX 3 - STATUS OF NUCLEAR POWER IN THE WORLD 394

ANNEX 4 – NUCLEAR REACTORS IN THE WORLD "UNDER CONSTRUCTION" 395

ANNEX 5 – ABBREVIATIONS 401

ANNEX 6 – ABOUT THE AUTHORS 405

TABLE OF FIGURES

Figure 1 · Nuclear Electricity Generation in the World... and China. 43
Figure 2 · History of National Nuclear Power Programs 44
Figure 3 · Nuclear Electricity Generation and Share in Global Power Generation 46
Figure 4 · Nuclear Power Reactor Grid Connections and Closures in the World 48
Figure 5 · Nuclear Power Reactor Grid Connections and Closures – The Continuing China Effect 49
Figure 6 · World Nuclear Reactor Fleet, 1954–2021. 50
Figure 7 · Nuclear Reactors "Under Construction" in the World (as of 1 July 2021) 51
Figure 8 · Average Annual Construction Times in the World 54
Figure 9 · Delays for Units Started Up 2018–2020 55
Figure 10 · Construction Starts in the World 57
Figure 11 · Construction Starts in the World/China 57
Figure 12 · Cancelled or Suspended Reactor Constructions. 58
Figure 13 · Age Distribution of Operating Reactors in the World 59
Figure 14 · Reactor-Fleet Age of Top 5 Nuclear Generators 60
Figure 15 · Age Distribution of Closed Nuclear Power Reactors 61
Figure 16 · Nuclear Reactor Closure Age. 62
Figure 17 · The 40-Year Lifetime Projection 63
Figure 18 · The PLEX Projection (not including LTOs) 64
Figure 19 · Forty-Year Lifetime Projection versus PLEX Projection. 65
Figure 20 · Age Distribution of Chinese Nuclear Fleet 71
Figure 21 · Operating Fleet and Capacity in France 84
Figure 22 · Startups and Closures in France 85
Figure 23 · Nuclear Electricity Production in France 1990–2020 85
Figure 24 · Startups and Closures in France 86
Figure 25 · Reactor Outages in France in 2020 (in number of units and GWe) 87
Figure 26 · Forced and Planned Unavailability of Nuclear Reactors in France in 2020 88
Figure 27 · Age Distribution of French Nuclear Fleet (by Decade) 89
Figure 28 · Opinion Survey on Energy Sources in France (in 2020) 95
Figure 29 · Rise and Fall of the Japanese Nuclear Program 101
Figure 30 · Status of the Japanese Reactor Fleet 102
Figure 31 · Age Distribution of the Japanese Nuclear Fleet 119
Figure 32 · U.K. Reactor Startups and Closures 134
Figure 33 · Age Distribution of U.K. Nuclear Fleet. 137
Figure 34 · Age Distribution of the U.S. Nuclear Fleet 149
Figure 35 · Evolution of Average Reactor Closure Age in the U.S.. 154

Figure 36 · Timelines of 23 Reactors Subject to Early Retirement in the United States 165
Figure 37 · Classification of contaminated areas and grouping of patients in causal relationship analysis 186
Figure 38 · JCER Estimates (2019) versus Government Estimates (2016/2021) 195
Figure 39 · Irregularities at the French Creusot Forge 229
Figure 40 · Overview of Completed Reactor Decommissioning Projects, 1954–2020 237
Figure 41 · Progress and Status of Reactor Decommissioning, 2018–2021. 239
Figure 42 · Global Investment Decisions in Renewables and Nuclear Power 2004–2020 291
Figure 43 · Regional Breakdown of Nuclear and Renewable Energy Investment Decisions 2011–2020 292
Figure 44 · The Declining Costs of Renewables vs. Traditional Power Sources 293
Figure 45 · IEA 2050 Forecasted Cost of Electricity from Nuclear and Renewables, LCOE (US$/MWh). 295
Figure 46 · Variation of Wind, Solar and Nuclear Capacity and Electricity Production in the World 296
Figure 47 · Net Added Electricity Generation by Power Source 2010–2020 297
Figure 48 · Nuclear vs. Non-Hydro Renewable Electricity Production in the World 298
Figure 49 · Wind, Solar and Nuclear Installed Capacity and Electricity Production in the World. 299
Figure 50 · Nuclear vs Non-Hydro Renewables in China 2000–2020 300
Figure 51 · Wind, Solar and Nuclear Installed Capacity and Electricity Production in China 2000–2020 301
Figure 52 · Electricity Generation in the EU27 by Fuel, 2011–2020 302
Figure 53 · Wind, Solar and Nuclear Capacity and Electricity Production in the EU27 (Developments). 303
Figure 54 · Wind, Solar and Nuclear Capacity and Electricity Production in the EU27 (Absolute Numbers) . . . 303
Figure 55 · Wind, Solar and Nuclear Installed Capacity and Electricity Production in India 305
Figure 56 · Wind, Solar and Nuclear Installed Capacity and Electricity Production in the U.S 306
Figure 57 · Solar Panels Over Irrigation Canals in India. 310
Figure 58 · Attribution of climate change towards the occurrence of extreme weather events 311
Figure 59 · Pathways of Climate-Induced Disruptions of the Operation of Nuclear Power Plants 313
Figure 60 · Nuclear Power Plant Sites in France with Open and Closed Cooling Systems 317
Figure 61 · Climate Related Unavailabilities of French Nuclear Power Plants 2015–2020 319
Figure 62 · Climate Related Unavailabilities of French Nuclear Plants by Cause and Year 320
Figure 63 · Climate Related Unavailabilities of French Nuclear Plants by Cause and Month. 322
Figure 64 · Climate Related Unavailabilities of French Nuclear Plants per Cause and Site 323
Figure 65 · Climate Related Unavailabilities of French Nuclear Plants by Cause and Year 323
Figure 66 · Climate Related Unavailabilities of French Nuclear Plants – Maximum Unavailabilities. 324
Figure 67 · The containment of one of the Fessenheim reactors is 327
Figure 68 · Nuclear Reactors Startups and Closures in the EU27 1959–1 July 2021 354
Figure 69 · Nuclear Reactors and Net Operating Capacity in the EU27 355
Figure 70 · Age Distribution of the EU27 Reactor Fleet 356
Figure 71 · Age Distribution of the Western European Reactor Fleet (incl. Switzerland and the U.K.). 356

Figure 72 · Main Developments of the German Power System Between 2010 and 2020 362
Figure 73 · Age Distribution of the Swiss Nuclear Fleet 373
Figure 74 · Age Distribution of the Russian Nuclear Fleet 388

TABLE OF TABLES

Table 1 - Nuclear Reactors "Under Construction" (as of 1 July 2021). 52
Table 2 – Duration from Construction Start to Grid Connection 2011–2020 56
Table 3 - Official Reactor Closures Post-3/11 in Japan (as of 1 July 2021) 118
Table 4 – Status of Nuclear Reactor Fleet in South Korea (with scheduled closure dates) 126
Table 5 – Expected Closure Dates of U.K. Nuclear Reactor Fleet – As of 1 July 2021 135
Table 6 – 19 Early-Retirements for U.S. Reactors 2009–2025 166
Table 7 – Thyroid Cancers Identified in the Fukushima Prefectural Health Management Survey 184
Table 8 – Summary of Government Estimates of Fukushima Disaster Costs 2012–2021 (in $US\$_{2021}$ Billion) 192
Table 9 – Government Cost Sharing Scheme as of 2016 (in percent) 192
Table 10 – JCER Estimates (2017) versus Government Estimate (2016) (in $US\$_{2021}$ billion) 193
Table 11 – Updated JCER's Estimate (2019) and Original Estimate (2017) 194
Table 12 – Overview of Reactor Decommissioning Worldwide (as of July 2021) 236
Table 13 – Decommissioned Reactors in Germany (as of May 2021) 243
Table 14 – Status of Reactor Decommissioning in Germany (as of May 2021) 245
Table 15 – Status of Reactor Decommissioning in the U.S. (as of May 2021) 247
Table 16 – Status of Reactor Decommissioning in France (as of May 2021) 254
Table 17 – Selection of Indirect Climate-Driven Effects Disrupting Nuclear Power Plant Operation. 316
Table 18 – Causes for Outages and Generation Reductions at French Nuclear Fleet in 2019 320
Table 19 – Status of Canadian Nuclear Fleet - PLEX and Expected Closures 347
Table 20 – Belgian Nuclear Fleet (as of 1 July 2021) 357
Table 21 – Legal Closure Dates for German Nuclear Reactors 2011–2022 363
Table 22 – Status of Japanese Nuclear Reactor Fleet (as of 1 July 2021) 392
Table 23 – Status of Nuclear Power in the World (as of 1 July 2021) 394
Table 24 – Nuclear Reactors in the World "Under Construction" (as of 1 July 2021) 395

ANNEX 3 - STATUS OF NUCLEAR POWER IN THE WORLD

Table 1 – Status of Nuclear Power in the World (as of 1 January 2022)

Country	Nuclear Fleet					Power	Energy
	Operating		LTO	Mean Age[a]	Under Construction	Share of Electricity[b]	Share of Commercial Primary Energy[c]
	Units	Capacity (MW)	Units	Years	Units		
Argentina	3	1 641		31.3	1	7.5% (+)	3% (=)
Armenia	1	415		42		34.5% (+)	
Bangladesh	-	-		-	2		
Belarus	1	1 110		1.2	1	1%	
Belgium	7	5 942		41.8		39.1% (–)	13.9% (=)
Brazil	2	1 884		30.6		2.1% (=)	1.1% (=)
Bulgaria	2	2 006		32.3		40.8% (+)	19.8% (+)[d]
Canada	19	13 624		38.5		14.6% (=)	6.4 (=)
China	53	49 689		8.8	20	4.9% (=)	2.2% (=)
Czech Republic	6	3 934		30.5		37.3% (+)	17.4% (+)
Finland	4	2 794		42.8	1	33.9.% (=)	19.1% (=)
France	56	61 370		36.6	1	67.1% (–)[e]	36.1% (=)
Germany	3	4 055		33.5		11.3% (–)	4.7% (=)
Hungary	4	1 902		36.5		48% (–)	14.7% (=)
India	21	6 590	1	23.7/23	8	3.3% (=)	1.2% (=)
Iran	1	915		10.3	1	1.7% (=)	0.5% (=)
Japan	10	9 486	23	30.9/33.7	1	5.1% (–)	2.2% (=)
Mexico	2	1 552		29.9		4.9% (=)	1.6% (=)
Netherlands	1	482		48.5		3.2% (=)	1.1% (=)
Pakistan	5	2 242		8.6	1	7.1% (=)	2.4% (=)
Romania	2	1 300		20		19.9% (+)	7.7% (=)
Russia	37	27 672		28.4	3	20.6% (=)	6.8% (=)
Slovakia	4	1 837		29.8	2	53.1% (=)	21% (=)[d]
Slovenia	1	688		40.2		37.8% (=)	18.5% (=)[d]
South Africa	2	1 860		40		5.9% (=)	2.8% (=)
South Korea	23	22 199	1	22.6/22.4	4	29.6% (+)	12.1% (+)
Spain	7	7 121		36.9		22.2% (=)	10.4% (+)
Sweden	6	6 859		39.5		29.8% (–)	21.3% (–)
Switzerland	4	2 960		45.8		35.1% (–)[f]	18.9% (=)
Taiwan	3	2 859		38		12.7% (=)	5.8% (=)
Turkey	-	-		-	3		
UAE	2	2 690		0.9	2	1.1%	
UK	12	7 343		37.3	2	14.5% (–)	6.5% (=)
Ukraine	15	13 107		32.9		51.2% (–)	20.4% (–)
USA	93	95 523		41.2	2	19.7% (=)	8.4% (=)
EU27	**103**	**100 290**		**36.4**	**4**	**24.8% (–)[c]**	**11% (=)**
World	**412**	**365 651**	**25**	**31**	**55**	**10.1% (=)[c]**	**4.3% (=)**

Sources: WNISR with IAEA-PRIS, 2021–2022, BP, 2021

(a) – Including reactors in LTO/Excluding reactors in LTO (when different).

(b) – Data for 2020 - From IAEA-PRIS, "Nuclear Share of Electricity Generation in 2020", as of 3 August 2021, unless otherwise indicated.

(c) – Data for 2020 - From BP, "Statistical Review of World Energy", 2021.

(d) – 2019-data as 2020-data unavailable

(e) – RTE, Bilan Électrique 2020, January 2021.

(f) – Swiss Federal Office of Energy, "Production et consommation totales d'énergie électrique en Suisse", 2021.

NOTE

Ce rapport contient un nombre très important de données numériques et factuelles. Nous faisons tout notre possible pour les vérifier, les mettre à jour et apportons le plus grand soin à la relecture, mais personne n'est parfait. Les auteurs accueillent avec reconnaissance corrections et propositions d'amélioration.

LEAD AUTHORS' CONTACT INFORMATION

Mycle Schneider
45, Allée des deux cèdres
91210 Draveil (Paris)
France
Ph: +33-1-69 83 23 79
E: mycle@WorldNuclearReport.org

Antony Froggatt
53a Neville Road
London N16 8SW
United Kingdom
Ph: +44-79 68 80 52 99
E: antony@froggatt.net

Le rapport complet de 409 pages (en anglais) peut-être téléchargé gratuitement du site www.WorldNuclearReport.org.