



Transition nucléaire – Géopolitique des prochaines générations (partie 2)



© Connaissance des énergies

Quentin Cosme

Werra

Novembre 2022



Quentin Cosme est diplômé d'un master en Intelligence Stratégique Internationale et Affaires Publiques à l'ILERI, et d'un second master de l'Institut européen spécialisé dans la gouvernance de la transition énergétique. Passionné par les enjeux géopolitiques en particulier dans le domaine de l'énergie, Quentin cherche à présenter l'énergie et ses enjeux internationaux plus simplement à travers des articles et des mémoires afin que tous puissent avoir accès à un enjeu politique pouvant être considéré comme le premier enjeu international et celui étant le plus souvent au cœur des conflits interétatiques. Aujourd'hui, Quentin souhaite mettre à profit ses compétences dans ce secteur professionnel qui le passionne tant.

Les propos exprimés par l'auteur n'engagent que sa responsabilité

© Tous droits réservés, Paris, Werra, Novembre 2022



INTRODUCTION

L'énergie nucléaire est fondée sur des générations, autrement dit des filières technologiques. Pourtant, bien que la Génération I n'ait connu son véritable développement qu'en 1950, il faut remonter en 1899 avec la découverte de la radioactivité par Ernest Rutherford pour connaître la véritable date de commencement de l'étude de l'énergie atomique. Entre 1900 et 1913, Pierre et Marie Curie, ainsi qu'Henri Becquerel, vont travailler sur le radium, les rayonnements, la radioactivité naturelle et la masse atomique. Ce n'est qu'en 1939, après plus de vingt-cinq ans d'études et d'expériences sur le radium, l'uranium et le bombardement aux neutrons que les premiers brevets sur la possibilité d'un développement de réacteur nucléaire, déposés au nom du CNRS, apparaissent en France. Le développement civil va être remplacé par le développement militaire au cours de la Seconde Guerre mondiale. La peur que l'Allemagne se dote de la bombe nucléaire va conduire les États-Unis à développer le Projet Manhattan, dirigé par le Général Leslie Richard Groves et le physicien Robert Oppenheimer. Les travaux mènent au développement des trois premières bombes nucléaires que sont l'essai *Trinity*, *Little Boy* et *Fat Man* ainsi qu'à la fin de la guerre. L'enjeu énergétique et en particulier l'indépendance énergétique, comprises par le Général de Gaulle, amènent à la création du Commissariat à l'Énergie Atomique en 1945. La première pile à combustible, *ZOÉ*, est développée trois ans plus tard. L'électricité nucléaire connaît son essor à partir de 1951 avec la construction et la mise en marche des premiers réacteurs nucléaires. Les premiers réacteurs à eau pressurisée ou REP se développent en Amérique et en Europe, c'est la naissance de la Génération I, celle de la faisabilité industrielle. Aujourd'hui la majorité des réacteurs employés dans le monde sont des réacteurs de la Génération II, celle du déploiement. Ils ont été mis en fonction dans les années 1980 à la suite des chocs pétroliers et sont principalement caractérisés par la technologie états-unienne des réacteurs à eau pressurisée ou REP. Le passage à la Génération III, peut être considéré comme rapide puisque des technologies d'optimisation que sont les réacteurs EPR 1 et 2, l'AES russe et l'AP1000 américano-japonais ont été développées et mises sur le marché assez rapidement en 2010 et les seconds pour 2045- 2050. La question est donc simple. Après 2040 les réacteurs nucléaires devront répondre à un enjeu majeur qui n'est autre que la durabilité. Pour cela les technologies étudiées doivent prendre en considération la réalisation d'un réacteur propre et



durable, garantissant une sûreté nucléaire toujours plus mises en avant par les États, les citoyens et les groupes pro ou antis nucléaires, une compétitivité économique permettant le développement de réacteurs plus puissants et durables mais à des coûts moins importants et enfin la prolifération nucléaire. Il s'agit là d'une véritable transition nucléaire qui oblige les États à prendre en considération de nombreux enjeux de sécurité et à se poser la question suivante.

Considérant les remarquables innovations technologiques dont l'industrie nucléaire a su faire preuve dans l'histoire récente, dans son développement autant civil (l'atome pour l'électricité et le bien-être) que militaire (la bombe comme garant de la paix et d'un type de société), dans quelle mesure la question de la sécurité est-elle abordée et traitée par ce secteur ?

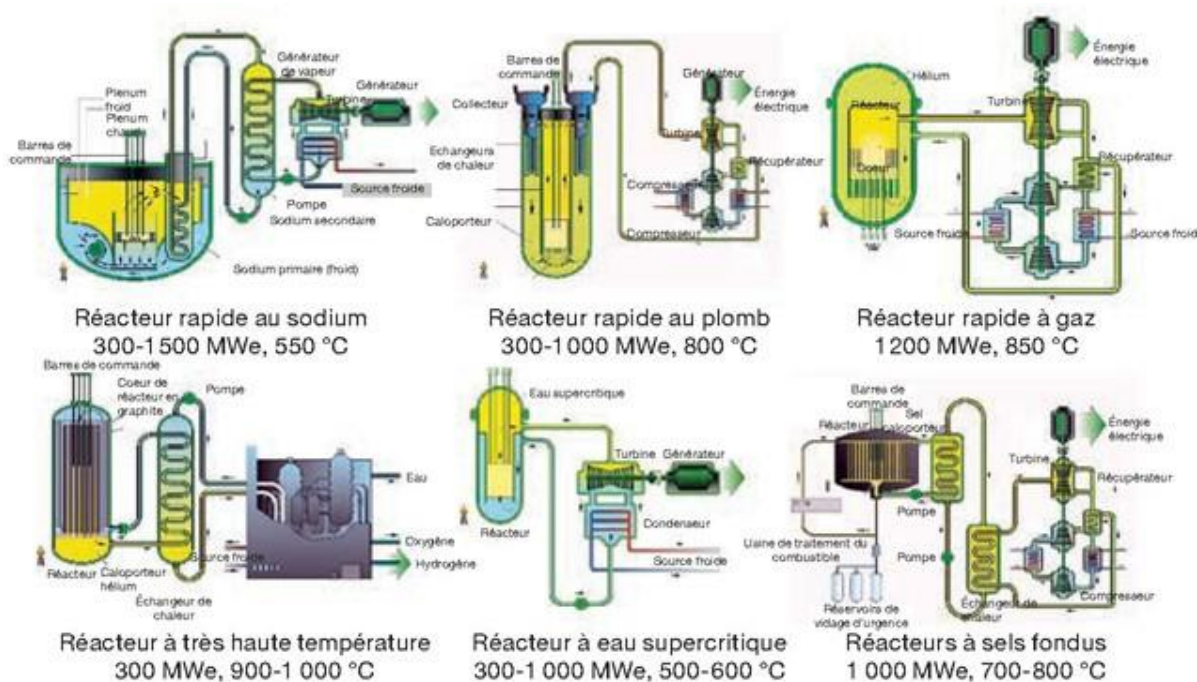
Cet écrit propose, en premier lieu, une mise en avant des différents enjeux de transition que sont, par exemple, la sûreté et la fiabilité des réacteurs ; suivront ensuite les diverses technologies atomiques en cours d'étude par les États ainsi qu'une analyse de ces dernières ; ce document s'achèvera sur une proposition de scénarios attribués, tout d'abord, aux grands États nucléaires, disposant ou ayant disposé de l'arme nucléaire, puis aux États souhaitant développer le nucléaire civil.

Le présent article constitue la deuxième partie du dossier consacré à la géopolitique des prochaines générations dans le domaine de la transition nucléaire. Le propos ci-dessous sera consacré aux technologies.

Les technologies

Pour donner suite à la description des enjeux auxquels vont faire face les États disposant des technologies nucléaires, il semble important de présenter les technologies énergétiques envisageables par ces derniers afin de répondre à l'important défi de transition.

Le Forum de la Génération IV a mis en avant différents systèmes qui doivent être étudiés dans les décennies à venir mais qui ne seront probablement développés que dans la seconde moitié du siècle. Ces technologies, aussi appelés systèmes, sont au nombre de sept. Il s'agit de trois réacteurs à neutrons rapides ou RNR dont le caloporteur est différent (gaz, sodium ou plomb) ; du réacteur à très haute température ou RTHT ; du réacteur à eau supercritique ou RESC ; du réacteur à sels fondus ou RSF et les réacteurs de fusion nucléaire. Ceux-ci sont présentés ci-après avec une mise en avant de leur fiabilité en termes de garantie de la sécurité nucléaire et de l'éloignement des risques. La description qui suit se base sur les publications du CEA¹.



¹ « Les réacteurs à neutrons rapides et les autres filières », CEA



Réacteurs à neutrons rapides - RNR

Comme présentés par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique², les réacteurs à neutrons rapides ou RNR sont des réacteurs élaborés dans les années 1960 qui ont connu un développement et des perfectionnements jusqu'à aujourd'hui. Dans l'électronucléaire, la majorité des réacteurs employés sont des réacteurs à neutrons thermiques, soit des réacteurs à eau pressurisée. La différence est le modérateur nucléaire. Le graphite et l'eau sont les éléments qui servent à ralentir les neutrons afin de contrôler la réaction en chaîne. Cela étant, ces deux éléments sont caractérisés par les risques majeurs que sont l'inflammabilité (incendie nucléaire de Tchernobyl) et la vaporisation ou les fuites (fuite maîtrisée à la centrale *Penly*).

La réponse à cela a été une suppression des modérateurs dans les RNR. Cela implique non seulement une suppression d'un risque de catastrophe nucléaire, mais aussi le développement de nouveaux générateurs consommant différemment. Comme présenté par le CEA³, ces réacteurs sont des réacteurs à neutrons rapides à caloporteur sodium (Na), au gaz (G) ou au plomb (Pb).

Les RNR-Na sont les réacteurs étudiés en France comme le montrent les réacteurs Phénix, Superphénix et Astrid. Ils fonctionnent comme des réacteurs normaux cependant certaines différences témoignent d'une recherche approfondie en termes de puissance et de sécurité. En effet, le RNR-Na consomme de l'uranium 238 et du plutonium 239. Il s'agit de l'uranium le plus présent sur Terre et du plutonium militaire. Les deux atomes sont consommés lors de la génération. Il est important de mettre en avant le fait que seul le plutonium est consommé. En effet, lors de la réaction en chaîne, sa destruction va permettre la transformation de l'uranium, dit fertile, en plutonium, dit fissile. Quant au sodium, il a pour propriété de rester liquide jusqu'à 900°C, ce qui résout les problèmes de refroidissement et de pressurisation de l'eau. Dans le cœur du réacteur, le sodium atteint 550°C avant son passage dans l'échangeur et le circuit secondaire, aussi au sodium, qui va permettre son refroidissement. Dans le cas de fusion, à environ 2000°C, (métaux, combustible), un magma

² Site officiel de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique

³ Site officiel du CEA



se forme et est placé en fond de cuve jusqu'à son refroidissement, il empêche l'échappement de radioactivité. Quant au générateur électrique, il emploie de l'azote mis sous pression dans l'échangeur sodium-gaz afin de refroidir le sodium et faire tourner un turbogénérateur lorsque le gaz se détend. Certes bien des risques présents sur les réacteurs à eau pressurisée ont connu des réponses intéressantes ici. Cela étant, la pressurisation a connu des crises mais souvent liées à l'erreur humaine. Malgré cela il faut noter que ce réacteur propose un nucléaire plus accessible et à plus long terme, la possible génération de carburant supérieure à la consommation, des possibilités de catastrophes moins élevées par l'emploi de sodium et non d'eau et une possibilité de diminution de fabrication d'armes nucléaires. Ce dernier point reste source de questions pour bien des pays du fait des conséquences géopolitiques de la possession de l'arme nucléaire. La fabrication de plutonium impliquant des technologies militaires, le partage des technologies de ce réacteur reste un enjeu majeur dans les relations internationales.

Le RNR-G est un réacteur basé sur la réunion des avantages du RNR et du Réacteur à Haute Température. En France, le réacteur Allegro sert de projet au CEA afin de développer la filière RNR-G après le projet Astrid. L'emploi d'hélium comme gaz caloporteur garantit la transparence et l'absence de rapport avec le cœur donc une très grande sécurité qui reste remise en question car l'hélium nécessite un circuit sous pression et à une température de 850°C. Cela cause deux problèmes encore difficiles à résoudre. Il faut créer un combustible et son gainage capables de résister à ces conditions et tenir en cas d'accident liés à la température et à la pression. Le réacteur est assez dangereux malgré une efficacité assez élevée. Les conséquences de l'emploi d'hélium à haute température et pression impliquent l'emploi de moissanite, composée de carbure de silicium, élément très dur et résistant à des températures supérieures à 2200°C. L'espagnol *Navarro Sic* est le plus gros producteur de carbure de silicium au monde, ce qui rend la moissanite très rare et très chère et induit une dépendance des acteurs nucléaires. Un point tout aussi important est l'emploi de carbone afin de réaliser des carbures de plutonium et d'uranium. Le combustible et sa fabrication impliquent des risques élevés en matière de perte de plutonium, d'inflammabilité, de fuite à l'intérieur du réacteur et la gestion des déchets longue durée. Finalement, c'est un réacteur prometteur puisqu'il emploie de l'hélium mais cela suppose une revue complète du circuit



primaire. Le projet *Allegro* servira de démonstration afin de certifier la fiabilité d'un réacteur plus puissant mais impliquant un renouvellement complet des politiques de sécurité.

Le RNR-Pb est un réacteur à l'étude surtout en Russie. Les États-Unis s'y intéressent, de même que certaines institutions européennes avec le projet MYRRHA. L'enjeu principal du RNR-Pb est de mettre les deux générateurs ensemble. Le circuit thermique (réacteur) accueillerait le circuit vapeur (électrique). C'est un point positif auquel s'ajoute la propriété chimique du plomb dont l'ébullition n'a lieu qu'à partir de 1700°C. Malgré ces points économiques et sécuritaires intéressants, un RNR-Pb connaît d'importants défauts. L'entretien est difficile du fait d'une toxicité importante ainsi qu'une corrosion des matériaux élevée due au plomb. Ce dernier peut aussi nuire au réacteur et à ses circuits d'évacuation en fonction des températures. Enfin, le réacteur n'est pas adapté pour être employé dans des pays connaissant d'importants problèmes sismiques. C'est un réacteur tout aussi prometteur mais connaissant d'importants dangers qui empêcheraient des pays aux normes de sécurité très élevées d'investir dans ces projets.

Réacteur à très haute température - RTHT

Le réacteur à très haute température ou RTHT est un réacteur innovant qui peut conduire à la cogénération d'électricité, de chaleur et d'hydrogène. Il serait employé dans la chaîne de la pile à combustible ainsi que dans l'électronucléaire en envisageant des changements en fonction des besoins. Cela étant, les informations restent peu nombreuses du fait de recherches limitées. Il est possible de dire que les avantages du RTHT se basent sur la cogénération ainsi que sur l'emploi d'hélium pour refroidir le réacteur et faire fonctionner le générateur électrique. Pour autant, les points négatifs sont nombreux. L'emploi de gaz implique pression et possibilité de fuites. Le réacteur fonctionne entre 1000 et 1300°C. Il emploie du graphite et des carbures d'uranium, ce qui implique de la pollution au carbone. Par son fonctionnement, il ne peut être placé que dans des territoires très éloignés des populations, ce qui conduit à d'importantes politiques de sécurité et de gestion des systèmes de transfert d'électricité, d'hydrogène, de combustible et des déchets. Enfin, c'est un réacteur très cher à



démonter. Bien qu'il ait prouvé son efficacité une fois aux États- Unis, le RTHT reste un réacteur dangereux, cher et peu puissant. Bien qu'il puisse être étudié à des fins scientifiques liées aux politiques de l'hydrogène, son développement international reste source de questions, en particulier en Europe où le cahier des charges est d'une très grande sévérité.

Réacteur à eau supercritique - RESC

Le RESC est un réacteur pouvant servir de réacteur à neutrons rapides comme de réacteur thermique actuel. Le terme critique est lié à la criticité du cœur du réacteur ou à celle de l'eau qui sert à refroidir le réacteur. Dans le cas des RESC, l'eau va dépasser son pic ou point critique thermodynamique. Celle-ci devra rester liquide à plus de 370°C et 22 MPa⁴.

Cela conduit à un meilleur rendement que les réacteurs actuels (45% au lieu de 33%). De plus, l'eau super critique ne peut pas se changer en vapeur, ce qui empêche toute surchauffe et explosion. Point plutôt positif, le RESC est composé d'un unique circuit qui permet de générer de l'électricité ainsi que de refroidir le cœur. Cela permet de réduire de manière considérable les coûts des centrales. Seuls deux points doivent être parfaitement compris et maîtrisés dans de tels réacteurs. Le premier n'est autre que les matériaux employés dans la construction du réacteur afin de résister à des pressions et températures si élevées. Les réacteurs étudiés doivent travailler avec des matériaux résistant à environ 450°C et entre 30 et 40MPa. Deuxièmement, si la pression n'est pas maîtrisée à la perfection, un accident nucléaire, basé sur la surchauffe du réacteur, aura lieu. Bien qu'extrêmement intéressant de par un bon rendement et un coût qui rendrait le nucléaire bien plus accessible, le RESC demeure une technologie d'une dangerosité considérable car la moindre erreur sur le contrôle de l'eau conduirait à une catastrophe nucléaire.

Réacteur à sels fondus - RSF

Le RSF est un réacteur dont les technologies ont été plus ou moins oubliées. Il a été étudié avant la Seconde Guerre mondiale mais du fait de l'emploi de thorium, atome sans

⁴ MPa = Mégapascal



propriétés garantissant un emploi militaire, il a été remplacé par les réacteurs employés aujourd'hui. Son étude a été relancée récemment dans le sud des États-Unis ainsi qu'à EDF, au CEA et au CNRS. C'est un réacteur dans lequel le combustible est liquide et est composé de sels, tels le chlore et le fluor. Le réacteur sera composé de fluorures d'actinides et de fluorure de lithium liquides. Plus simplement, le combustible sera de l'uranium ainsi que du plutonium militaire et des déchets tel du radium. Fonctionnant à un peu plus de 700°C et capable de produire du combustible et de détruire des déchets, le RSF est une option très intéressante pour les pays nucléaires. Pourtant aucun prototype n'a été vraiment développé afin de certifier son efficacité. De plus, la recherche n'est pas concentrée sur un tel modèle de réacteur, l'emploi de lithium engendrerait des coûts élevés. Il en est de même pour certaines pièces du réacteur qui devront être changées du fait de la température élevée, des risques de solidification des sels sont envisagés et leurs gestion et conséquences restent inconnues. Enfin, le traitement et le retraitement des déchets à l'intérieur ou à l'extérieur du réacteur restent une source de question importante. Il n'en reste pas moins un réacteur très intéressant, capable de résoudre le problème des déchets long terme et haute radiation, aucun grand défi technologique n'a été révélé, seuls un financement et une recherche plus approfondis garantiraient un développement plus rapide du réacteur.

Petit réacteur modulaire - PRM

Les réacteurs modulaires sont des technologies déjà bien connues des grands acteurs nucléaires. Les premiers exemples sont le sous-marin nucléaire, le porte-avion ou le brise-glace. Pour le PRM civil, deux questions se posent. Il faut le rendre adaptable et abordable. Les PRM garantissent une production d'énergie tout en étant facilement transportables, modifiables et adaptés aux endroits où ils sont placés. Par conséquent, ils servent dans les espaces ruraux et peu accessibles. Le besoin d'une adaptation du réseau électrique local vient contrebalancer ces derniers points. Simplicité et autonomie sont aussi deux caractéristiques importantes des PRM qui garantissent une meilleure sécurité. En 2020, 70 modèles sont à l'étude, dont un en fonctionnement en Russie et quelques-uns très avancés en Chine et en



Argentine. Cela étant, vu leur développement actuel et leurs objectifs différents, le débat sur la compétitivité est loin d'être terminé.

En France, 3 projets ont été développés. *Nuward* était un réacteur à eau pressurisé standard de petite taille en développement depuis 2019 chez EDF et devant remplacer le charbon dans les espaces ruraux et à l'international. Deuxièmement, *XAMR*, développé par *Naarea*. L'entreprise travaille sur un réacteur de toute petite taille, autonome sur du moyen-long terme et fonctionnant sur les principes du RSF avec pour combustible les déchets radioactifs. Bien qu'abandonné il y a environ dix ans, *Flexblue* était un projet regroupant la DCNS⁵, Areva, le CEA et EDF sur un réacteur sous-marin dont le refroidissement serait réalisé par la mer et pouvant fournir de l'électricité pour un million de personnes.

Réacteurs de fusion nucléaire

Sans doute une utopie aujourd'hui, la fusion nucléaire connaît pourtant d'importantes études à travers le monde. Il est possible de citer ITER, le Laser Mégajoule ou Tore Supra rien qu'en France. De nombreux projets existent à travers le monde notamment en Europe (19), aux États-Unis (13), au Japon (4), en Chine (4), en Inde (2), en Russie (2), au Canada (1), en Corée du Sud (1), et dans d'autres nouveaux États nucléaires (3).

Tout d'abord la fusion nucléaire correspond à la réalisation du strict inverse de la fission nucléaire. Au lieu de détruire un atome, la technologie va en assembler deux. Par conséquent il faut des atomes extrêmement petits donc les isotopes de l'hydrogène que sont le deutérium et le tritium afin de créer de l'hélium à la suite de la fusion. Pour réaliser cela, deux systèmes sont aujourd'hui étudiés. Il s'agit du confinement magnétique et du confinement inertiel.

Comme son nom l'indique, le confinement magnétique se base sur un contrôle magnétique dans une chambre afin de créer la fusion. Pour y parvenir, les atomes sont mis dans la chambre, mise sous vide, et atteindre une température supérieure à 200 millions de

⁵ DCNS est un groupe français de construction navale spécialisé dans les navires militaires. Le groupe conçoit, construit et maintient en service des bâtiments de surface, des sous-marins, ainsi que des équipements et systèmes. DCNS s'implante également sur de nouveaux marchés dans le secteur du nucléaire civil, des énergies marines renouvelables et des services navals et industriels. [DCNS Group | D-Sight](#)

degrés tout en circulant à très haute vitesse dans la chambre grâce au système magnétique. Vitesse et chaleur vont permettre le dépassement de la température et créer du plasma, maintenu dans la chambre grâce au confinement magnétique. Le confinement inertiel se base sur un contrôle laser. Toujours dans une chambre sous-vide, le combustible est placé au milieu et est touché par des lasers afin de le faire chauffer à 200 millions de degrés et réaliser la fusion. La fusion deutérium-tritium ayant eu lieu, des cendres et de l'hélium sont produits.

Les points à mettre en avant sont l'utilisation de deutérium et tritium. Le premier est très abondant dans l'eau et donc très accessible. Quant au second, il s'agit d'un isotope radioactif de l'hydrogène produit et employé dans l'industrie nucléaire. Il reste alors accessible pour les pays ayant développé le nucléaire civil. Néanmoins, la radioactivité conduit le tritium à se changer en hélium après douze ans. Il doit donc être employé rapidement. Tout comme la fission nucléaire, la fusion nucléaire a un impact environnemental et une production de déchets limités. De plus, l'emploi de tritium permet l'élimination d'un des déchets de la fission. Il est important de mettre en exergue le fait que l'énergie demandée par le confinement magnétique ou le confinement inertiel pourrait impliquer l'emploi d'une centrale assez proche afin de garantir un afflux d'énergie stable pouvant garantir sécurité et stabilisation des températures, et donc du plasma. Concernant la sécurité des systèmes, il est possible de dire que la fusion est une technologie nucléaire très sûre. Si un des paramètres connaît un changement (baisse de la température, de la vitesse ou ralentissement des aimants), la fusion se stoppe. Les grands enjeux sont un afflux permanent de combustible dans les chambres basées sur le confinement inertiel, une stabilisation d'un afflux d'énergie très puissant pour les chambres basées sur le confinement magnétique et un maintien d'une chambre sous vide pour les chambres basées aussi bien sur le confinement magnétique que sur le confinement inertiel.

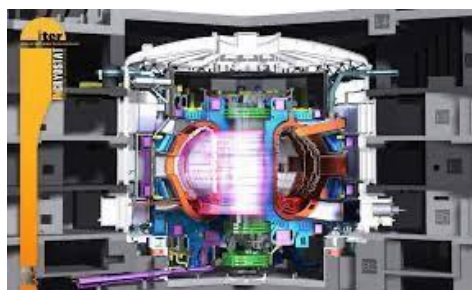


Figure 2: Réacteur ITER



CONCLUSION

Ce document s'est concentré sur une mise en avant de nombreux enjeux nucléaires qui en font une technologie d'un grand intérêt pour les États disposant de l'électronucléaire que pour ceux souhaitant y accéder. Bien sûr, comme toute technologie, elle a des inconvénients et des avantages et les recherches et projets menés et en développement témoignent de l'évolution générationnelle que les technologies nucléaires ont connue. Puissance, fiabilité et indépendance énergétique impliquent d'importants investissements, de grandes politiques de sécurité et surtout un important discours auprès des pays employant les technologies civiles.

Au cœur de cette transition nucléaire, il faut mettre en avant les nombreux et différents intérêts étatiques liés à l'Histoire, la religion ou encore la politique qui peuvent nuire au besoin d'une société qui souhaite changer la vision du monde et se concentrer sur une satisfaction des besoins humains avant ceux de l'État. La persistance des technologies des générations précédentes est inévitable mais les États se tournent au fur et à mesure vers le nucléaire de demain. Amélioration des rapports interétatiques, intervention de médiateurs, partage de technologie, développement de contrats nucléaires, élaboration de projets communs à plus grandes échelles seront les défis des générations à venir, qu'elles soient technologiques ou humaines.



SOURCES

BLAIN, Christophe et JANCOVICI, Jean-Marc, « Le monde sans fin », *Éditions Dargaud*, 2021

CEA, « Les réacteurs à neutrons rapides et les autres filières », *CEA*, Volume 4, Décembre 2012

Cairn Info, « Annales des Mines, Responsabilité et environnement », *Éditions EFE*, Depuis 2008, Numéros 60, 64, 72, 90 et 95

Cairn Info « Flux », *Université Gustave Eiffel*, Depuis 2001, Numéro 96 Cairn Info, « Géoéconomie », *Éditions Choiseul*, 2007 à 2016, Numéro 51

Cairn Info « Revue Internationale et Stratégique », *IRIS Éditions*, depuis 2001, Numéros 104 et 113

Site officiel de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique <https://www.iaea.org/fr>

Site officiel de l'Autorité de Sûreté Nucléaire <https://www.asn.fr/>

Site officiel du Commissariat à l'Énergie Atomique <https://www.cea.fr/>

Site officiel d'EDF <https://www.edf.fr/groupe-edf>