

FACE AU DÉFI CLIMATIQUE, LE NUCLÉAIRE DURABLE EST INCONTOURNABLE

Qu'est-ce que le nucléaire durable ? Alors que pour lutter contre le réchauffement climatique nous devons abandonner définitivement les énergies fossiles, qui représentent encore plus de 80 % de la consommation mondiale d'énergie, en quoi le nucléaire durable est-il irremplaçable ?

PAR CLAIRE KERBOUL*

En 2022, le discours de Belfort d'Emmanuel Macron actait, « en même temps », le retour en grâce du nucléaire, *via* l'annonce de la construction de six EPR et de quelques SMR, et une accélération du rythme d'installations éoliennes et photovoltaïques. Trois ans plus tard, le projet de programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE3) confirme la marche forcée vers des parcs d'énergies renouvelables intermittentes et reste muet sur les enjeux d'évolution du parc nucléaire. Or le parc nucléaire, avec l'hydroélectricité, est notre atout maître depuis des décennies pour assurer à la France une électricité décarbonée à plus de 92 %. La question de l'évolution de ce parc vers le nucléaire durable est centrale.

Il est donc grand temps de clarifier une nouvelle fois le concept de *nucléaire durable*, de dire ce qu'il est et ce qu'il n'est pas, et d'identifier les priorités les plus urgentes.

ÉTAT DES LIEUX

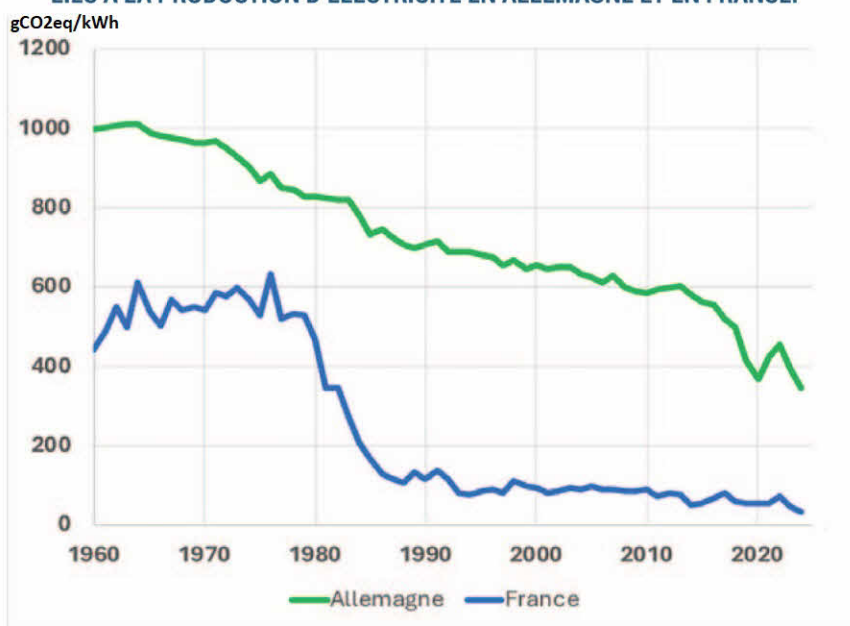
Disons d'emblée que, dans le contexte du dérèglement climatique, l'électronucléaire n'est pas une option parmi d'autres.

L'expérience allemande nous montre l'évolution des taux moyens d'émissions de gaz carbonique sur trente années de montée en puissance du plus grand parc européen

éolien (70 GW) et solaire (82 GW)¹. Ce taux moyen reste 8 fois plus élevé en Allemagne qu'en France (voir graphique ci-dessous). En effet, ces énergies, soumises aux aléas du soleil et du vent, ont un facteur

accélère leur vieillissement et dégrade probablement leur sûreté d'ensemble, comme le note l'inspecteur général pour la sûreté nucléaire et la radioprotection dans son rapport de 2024 (p. 13).

COMPARAISON DES TAUX MOYENS D'ÉMISSIONS DE CO₂ LIÉS À LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN ALLEMAGNE ET EN FRANCE.



de charge – un rapport de la puissance effective de fonctionnement à la puissance théorique installée – moyen très faible : 26 % pour l'éolien, 13 % pour le solaire. Pour assurer le fonctionnement du système électrique, elles doivent donc être adossées à des parcs thermiques de charbon et de gaz, ce qui obère leur intérêt pour le climat. Quand elles sont, comme dans notre pays, associées à un parc nucléaire, elles n'ont aucune utilité pour le climat puisque le nucléaire est déjà décarboné ; en revanche, le *stop and go* qu'elles imposent aux réacteurs

Pour freiner la dérive climatique, un développement inexorable des énergies renouvelables intermittentes est une impasse, car elles maintiennent l'asservissement aux énergies fossiles.

De fait, les seules alternatives pilotables aux fossiles sont l'hydroélectricité et l'électronucléaire. Cependant, être décarboné ne suffit pas : à la fois pour des raisons éthiques et pour des raisons de disponibilité de la ressource, il est impératif de réorienter le nucléaire vers le nucléaire durable, ce qui nécessite des réacteurs à neutrons rapides.

“ Le parc nucléaire, avec l'hydroélectricité, est notre atout maître depuis des décennies pour assurer à la France une électricité décarbonée à plus de 92 %.”

ÉTHIQUE ET NÉCESSITÉ DU NUCLÉAIRE DURABLE

La durabilité a été définie en 1987 dans le rapport rédigé par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU, présidée par la Norvégienne Gro Harlem Brundtland – rapport intitulé Notre avenir à tous – à travers trois objectifs prioritaires et visés simultanément : économiser les ressources naturelles ; réduire au minimum les déchets produits ; développer des solutions socialement et économiquement acceptables.

En France et dans le monde, la fission nucléaire repose sur la fission de l'uranium 235 (U^{235}), seul noyau fissile² disponible à la surface de la Terre, mais présent à seulement 0,7 % dans le minerai d'uranium. Les REP (réacteur à eau pressurisée) ou leur version modernisée, l'EPR, sont des réacteurs à neutrons lents³ conçus pour optimiser la fission de l' U^{235} . Cette technologie laisse de côté plus de 99 % du minerai constitué d'uranium 238 (U^{238}), qui n'est pas fissile. Par ailleurs, dans un REP le processus de capture neutronique domine celui de fission, ce qui conduit à la production de déchets que sont les transuraniens – des noyaux plus lourds que l'uranium, produits par capture neutronique – que les neutrons lents ne fissionnent pas. Le nucléaire actuel n'est donc pas durable au regard de l'économie de la ressource et, dans une moindre mesure, de la production de déchets.

“ Les énergies soumises aux aléas du soleil et du vent ont un facteur de charge moyen très faible : 26 % pour l'éolien, 13 % pour le solaire. Pour assurer le fonctionnement du système électrique, elles doivent donc être adossées à des parcs thermiques de charbon et de gaz, ce qui obère leur intérêt pour le climat. ”

L' U^{238} résiste à la fission en raison de son nombre pair de nucléons – protons et neutrons composant le noyau – qui lui assure une cohésion très forte. Pour fissionner un tel noyau, il est nécessaire de disposer de neutrons rapides⁴. Le réacteur à neutrons rapides (RNR) est donc l'outil incontournable du nucléaire durable.

“ En maîtrisant des compétences rares de retraitement du combustible, la France est en mesure de valoriser le plutonium nécessaire au démarrage de plusieurs RNR surgénérateurs. ”

LE CHOC D'URANIUM À VENIR

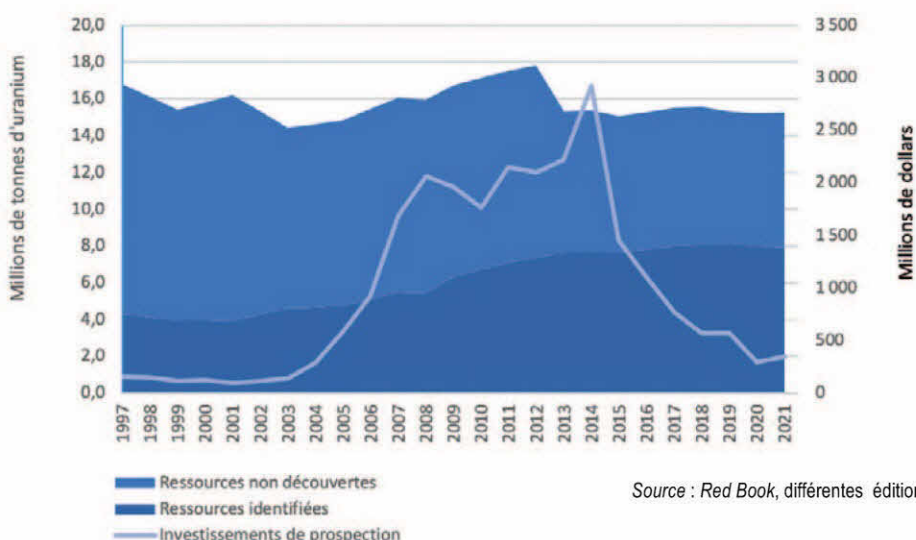
Une crise de l'uranium à venir s'inscrit dans une réalité géologique, indépendamment des questions de prix comme on le lit trop souvent. L'existence de gisements d'uranium est caractérisée par la présence d'éléments radioactifs en quantité significative. Cette radioactivité, qui impose des contraintes d'exploitation, est fort utile pour la prospection et l'évaluation des teneurs en uranium des minerais. Il en découle une certaine robustesse des données de prospec-

– les ressources *non conventionnelles* pouvant exister dans certaines roches à très basses teneurs en uranium (phosphates, schistes, charbons, granites).

En 2022, le *Red Book* estime les ressources identifiées à environ 7,9 Mt. La somme des ressources identifiées et des ressources non découvertes reste quasi constante autour de la valeur de 16 Mt (± 2 Mt), en dépit d'investissements massifs d'exploration et de développement de mines entre 2006 et 2015⁵ (voir graphique ci-après). Les ressources non conventionnelles seraient comprises entre 39 et 57 Mt.

De fait, la croissance de l'exploration et de l'exploitation a principalement conduit à un glissement de typologie

ÉVOLUTION DES RESSOURCES MONDIALES D'URANIUM DE 1997 À 2021



tion accumulées depuis des décennies dans le monde entier.

Le *Red Book*, publication de référence internationale pour tout ce qui est données concernant l'uranium, publié conjointement depuis 1965 par l'AIEA et l'AEN-OCDE, a établi une typologie des ressources qui reflète le degré de récupérabilité de l'uranium. On distingue :

- les ressources *identifiées* comprenant les ressources assurées d'extraction et des ressources inférées, nécessitant des investigations supplémentaires ;
- les ressources *non découvertes* qui sont présumées par le raisonnement géologique, mais nécessiteraient des explorations de grande ampleur pour en confirmer l'existence et la teneur potentielle ;

depuis des ressources non découvertes vers des ressources identifiées, sans découverte de nouveaux gisements. Les ordres de grandeur de la disponibilité de l'uranium à la surface de la Terre sont donc les suivants : de 6 à 8 Mt d'uranium identifié et probablement 7 à 10 Mt d'uranium non découvert, dont la possibilité d'exploitation reste incertaine, soit un plafond total d'environ 15 à 16 Mt. Sachant qu'un REP de 1 GWe fissionne annuellement 1 t de noyaux d' U^{235} , la puissance électronucléaire mondiale de 400 GWe correspond à la consommation annuelle d'environ 60 000 t d'uranium naturel. En 2023, l'AIEA dénombrait une soixantaine de réacteurs en construction et plus de 400 réacteurs à l'étude, soit une crois-

“ Lors de la COP 28, une vingtaine de pays, dont la France, se sont engagés à tripler la puissance mondiale dans cette même période. Avec une telle croissance, la limite du plafond des ressources identifiées d'uranium sera atteinte vers le milieu du siècle. ”

► sance de puissance nucléaire de 50 % d'ici à 2050. De plus, lors de la COP 28, une vingtaine de pays, dont la France, se sont engagés à tripler la puissance mondiale dans cette même période. Avec une telle croissance, n'incluant ni la Chine ni la Russie ni l'Inde, la limite du plafond des ressources identifiées d'uranium sera atteinte vers le milieu du siècle (*graphique ci-dessous*). Comment imaginer alors investir dans des EPR dont la durée de vie est d'au moins 60 à 80 ans ? Sans disposer du potentiel des RNR, capables d'exploiter la totalité de la matière fissile, le nucléaire à base de REP ou d'EPR s'arrêtera dans la seconde moitié du siècle, car la ressource en U^{235} sera épuisée. Alors tout démarrage de réaction en chaîne sur Terre deviendra impossible. Aucune filière industrielle ne peut se dispenser d'une analyse portant sur la ressource. Or en France cette réflexion n'existe pas : pour justifier l'arrêt des recherches sur les RNR de 4^e génération, elle a été balayée d'un revers de main par les dirigeants de

la filière lors de récentes auditions parlementaires.

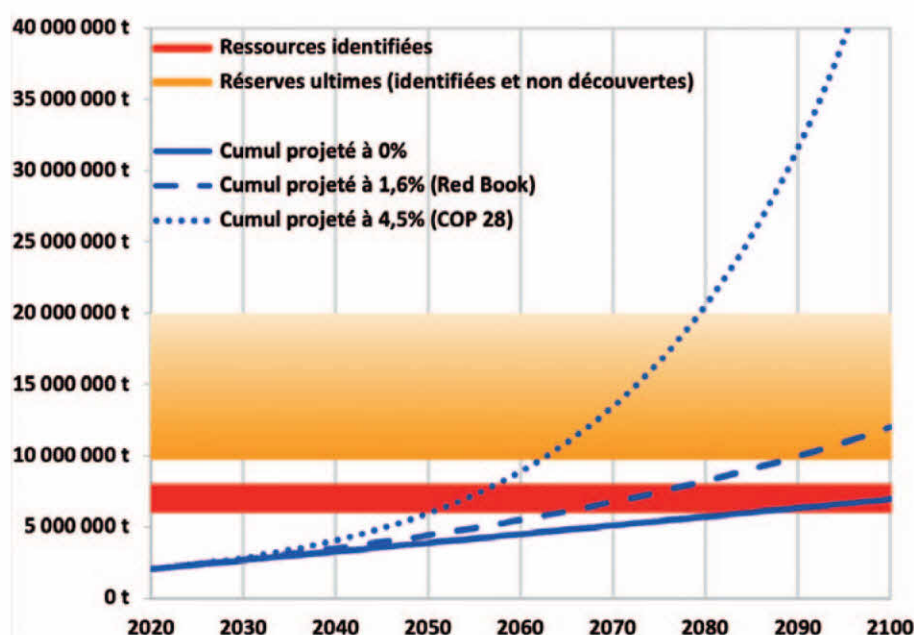
Une telle désinvolture est inacceptable alors que notre pays dispose sur son sol de plusieurs centaines de milliers de tonnes d'uranium naturel (appauvri), soit pratiquement de l' U^{238} à l'état pur, héritées de son histoire nucléaire, lui assurant des millénaires de production d'électricité à condition de disposer de RNR de puissance. Grâce à ces ressources stratégiques, que seule la France détient en Europe, notre pays s'affranchirait des risques géopolitiques grandissants d'approvisionnement extérieur. Par ailleurs, maîtrisant des compétences rares de retraitement du combustible, la France est en mesure de valoriser le plutonium nécessaire au démarrage de plusieurs RNR surgénérateurs ! Ajoutons qu'un réacteur surgénérateur est capable de produire plus de matière fissile qu'il n'en consomme, c'est le cas du RNR si l'isotope fissile dans le combustible est le plutonium 239 (Pu^{239}). Contrairement à ce qu'on lit ou entend trop souvent, utiliser l' U^{238} disponible sur le territoire français n'est pas utiliser les « déchets du nucléaire ». Les transuraniens et les produits de fission sont les déchets du parc de REP actuel. L'uranium naturel – appauvri pour réaliser le combustible des REP à base d'uranium enrichi – a été laissé à l'abandon car inutilisable dans un REP.

La vraie technologie de la fission est le RNR comme les physiciens l'ont démontré dès les années 1950, car il permet de fissionner tous les isotopes de l'uranium naturel. Dit autrement, le RNR n'est pas un « brûleur de déchets » mais, au contraire, le réacteur de fission optimisé de l'uranium naturel. D'où son intérêt irremplaçable pour le nucléaire durable, multipliant par 140 (soit 99,3/0,7) la matière fissile disponible.

POUR FAIRE FACE AUX CRISES ÉNERGÉTIQUE ET CLIMATIQUE

Du fait de son histoire, la France dispose de plusieurs centaines de milliers de tonnes d'uranium appauvri et de plusieurs centaines de tonnes de plutonium en partie confiné dans le combustible usé. Sur la base de son actuel stock de matières, si le pays mettait en œuvre un parc de RNR, il disposerait d'une autonomie énergétique de plusieurs millénaires, lui permettant et de lutter contre le réchauffement climatique et de disposer de l'énergie considérable qui

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'URANIUM DE 2020 À 2100 EN FONCTION DE TROIS SCÉNARIOS



LE GOUVERNEMENT VA-T-IL REMETTRE EN SELLE LE NUCLÉAIRE DURABLE ?

Le Conseil de politique nucléaire (CPN) réuni le 17 mars 2025 « a confirmé les orientations permettant d'atteindre la fermeture du cycle du combustible nucléaire dans la deuxième moitié du siècle et relancé un programme de travail en ce sens ». Il a estimé que « des développements technologiques importants sont nécessaires pour fabriquer les combustibles à partir de plutonium et d'uranium appauvri, la maîtrise des réacteurs à neutrons rapides ainsi que le retraitement des combustibles ». Il a demandé « que les industriels (EDF, Framatome, Orano), le CEA et l'ensemble des acteurs mobilisés sur les neutrons rapides, remettent à l'État un programme de travail et une proposition d'organisation industrielle pour la fin de l'année 2025, qui sera examiné lors d'un prochain CPN ». Dans la période qui s'ouvre, il est d'autant plus opportun de nourrir le débat public sur la nécessité de la relance de la filière française du nucléaire durable.

sera nécessaire à l'adaptation à des crises successives.

De plus, les RNR comportent intrinsèquement des avantages directement liés à l'efficacité du processus de fission sous flux de neutrons rapides, à savoir :

1. Dans un RNR refroidi au sodium, la vapeur est produite à haute température, donnant à la production d'électricité un rendement thermodynamique de 43 %, à comparer aux 33 % pour un REP⁶.

2. Quand les neutrons sont très énergétiques, la fission libère au moins 3 neutrons, à comparer aux 2,4 neutrons produits en moyenne lors d'une fission par neutrons lents. En conséquence, dans un RNR, il se produit davantage de noyaux fissiles nouveaux – par transmutation de noyaux fertiles⁷ – qu'il ne s'en détruit par fission ou capture. Cette spécificité est appelée « surgénération », car elle augmente le stock de matière fissile au fur et à mesure du fonctionnement du réacteur. C'est un atout considérable pour disposer d'énergie décarbonée à hauteur des besoins mondiaux.

“ La vraie technologie de la fission est le RNR, car il permet de fissionner tous les isotopes de l'uranium naturel. Dit autrement, le RNR n'est pas un « brûleur de déchets » mais, au contraire, le réacteur de fission optimisé de l'uranium naturel. ”

3. Le RNR favorise la fission au détriment de la capture, ce qui minimise les déchets produits que l'on retrouve fatalement à l'aval des REP. Les déchets du RNR se réduisent aux produits de fission dont les périodes radioactives sont d'une trentaine d'années en moyenne, ce qui réduit la durée du confinement dans un stockage à quelques siècles seulement. De plus, en raison du rendement thermodynamique supérieur à celui des REP, ces déchets ultimes par quantité d'énergie produite sont réduits de 25 %⁸.

LA FAISABILITÉ D'UNE FILIÈRE RNR ACQUISE DÈS LES ANNÉES 1950

Le premier prototype expérimental de la fission électrogène fut un RNR dénommé EBRI (Experimental Bree-

RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES DANS LE MONDE

NOM	LOCALISATION	PUISSANCE	EN SERVICE
Fermi 1	États-Unis (Detroit)	61 MWe	1966 à 1972
Phénix	France (Marcoule)	250 MWe	1973 à 2010
Superphénix	France (Creys-Malville)	1 200 MWe	1986 à 1997
DFR	Royaume-Uni (Dounray)	11 MWe	1962 à 1977
PFR	Royaume-Uni (Dounray)	234 MWe	1975 à 1994
KNK	Allemagne (Karlsruhe)	17 MWe	1978 à 1991
BN 350	Kazakhstan (Aktau)	52 MWe	1973 à 1999
BN 600	Russie (Beloïarsk)	600 MWe	1980 -
BN 800	Russie (Beloïarsk)	880 MWe	1984 -
Monju	Japon (Tsuruga)	256 MWe	1994 à 2016
CEFR	Chine (sud de Beijing)	20 MWe	2011 -
PFBR	Inde (Kalpakkam)	500 MWe	2024 -

der Reactor n° 1), construit en 1950 dans l'Idaho, aux États-Unis, démarré avec de l'uranium très enrichi (67 %) puis chargé en plutonium pour démontrer la surgénération (1953). La quasi-totalité des RNR développés dans le monde fonctionnent avec du sodium liquide comme caloporteur (RNR-Na) en raison de ses très bonnes performances, notamment en matière de transfert de chaleur et de densité de puissance. L'expérience mondiale de fonctionnement est d'environ 220 réacteurs-ans sans révéler de défauts majeurs (*tableau ci-dessus*). Après Rapsodie (40 MWth) en 1967, la France met en service Phénix (250 MWe) en 1973, couplé au réseau durant plus de trente-cinq années, puis Superphénix en 1986, premier prototype industriel de grande puissance (1 200 MWe) au monde. Mais Superphénix est arrêté par décision politique en 1997, comme monnaie d'échange dans un accord électoraliste PS-écologistes. Cet arrêt met fin à la cohérence de l'électronucléaire français qui visait l'indépendance

énergétique de la France grâce à ses ressources stratégiques disponibles sur son territoire. En 2010, la France relance sa filière rapide avec le projet de recherche ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration) visant à mettre au point un RNR-Na de 4^e génération de 600 MWe. Malheureusement, à l'instar de Superphénix, ASTRID est arrêté brutalement en 2018 pour des raisons politiques, en dépit des évaluations positives et sans saisine des instances concernées (Parlement et Comité de l'énergie atomique). Force est de constater l'incompréhensible : après les succès indiscutables de sa filière à neutrons rapides (Rapsodie, Phénix, Superphénix), la France n'a eu de cesse de condamner la voie du nucléaire durable qu'elle avait elle-même lancée, au moment même où de nouveaux RNR de puissance sont en construction en Russie, en Chine, en Inde, au Japon...

CONCLUSIONS

Face au réchauffement climatique qui nous impose l'arrêt définitif du recours à toutes les énergies fossiles, le nucléaire durable n'est pas une option parmi d'autres, ni un complément ou un supplément aux autres solutions comme certains voudraient le faire accroire : en réalité, avec l'hydroélectricité, c'est la seule. ►

“ Le nucléaire durable n'est pas une option parmi d'autres, ni un complément ou un supplément aux autres solutions comme certains voudraient le faire accroire : en réalité, avec l'hydroélectricité, c'est la seule. ”

► Manifestement rien de tout cela n'est actuellement compris par les instances dirigeantes de l'État : l'absence de toute vision stratégique pour le nucléaire dans le projet de programmation pluriannuelle de l'énergie est sidérante. Alors qu'un choc d'uranium se profile pour le milieu du siècle, la question de la ressource n'est pas même évoquée, aucun projet de RNR de puissance n'est remis sur les rails, aucune ambition nucléaire n'émerge pour la place de la France dans un monde qui se disloque de crise en crise. Sans aucune perspective, les discours de

“ Pour la France, l'alternative est simple : soit se maintenir dans la filière des réacteurs à neutrons lents jusqu'à l'épuisement de l' U^{235} vers le milieu du siècle, soit se réorienter sans plus attendre vers les RNR, lui donnant, ainsi qu'à l'Europe, la souveraineté de sa production d'électricité pour des millénaires. ”

relance du nucléaire sur la base de quelques EPR sont, à eux seuls, une démonstration de l'impasse stratégique dans laquelle nous sommes. De fait, sous la force de l'idéologie, pris en otage par l'irresponsabilité,

l'apathie et l'incompétence de multiples niveaux politiques et administratifs, le nucléaire en France n'est plus piloté. Comme symptôme caricatural de cet effondrement, il suffit de citer le programme de R&D piloté par le CEA axé sur le multirecyclage en REP qui envoie le plutonium, matière fissile stratégique s'il en est, aux déchets !

À l'heure du réchauffement climatique en accélération constante et du besoin massif d'énergie pilotable décarbonée, le contexte mondial est à l'expansion du nucléaire. C'est pourquoi l'avenir du nucléaire de fission se joue maintenant à quitte ou double, à la fois au niveau mondial et pays par pays en fonction de la capacité de chaque pays à en comprendre les enjeux. Pour la France, l'alternative est simple : soit se maintenir dans la filière des réacteurs à neutrons lents jusqu'à l'épuisement de l' U^{235} vers le milieu du siècle, soit se réorienter sans plus attendre vers les RNR, lui donnant, ainsi qu'à l'Europe, la souveraineté de sa production d'électricité pour des millénaires.

Si gouverner est prévoir, comment ignorer cette analyse quand les installations à réaliser, réacteurs et usines

du cycle, nécessitent plusieurs décennies ? Au vu de la médiocrité des textes en préparation, au vu du mépris dans lequel on tient les deux rapports parlementaires récents⁹ qui insistent sur la nécessité des RNR, le citoyen peut-il encore espérer choisir entre l'arrêt du nucléaire qui suivra le choc d'uranium et la poursuite sur des millénaires grâce aux RNR ? ■

*CLAIRE KERBOUL est docteur ès sciences physiques.



Spécialisée en physique nucléaire, Claire Kerboul, ancien directeur de cabinet du haut-commissaire à l'énergie

atomique, est l'auteur de *L'urgence du nucléaire durable* (De Boeck sup.). Face aux crises climatique et énergétique, elle milite pour le redémarrage de la filière des réacteurs à neutrons rapides en France ; elle est administrateur de PNC France et de Sauvons le climat.



UN AVIS DE LA RÉDACTION

Progressistes a publié le plan climat du PCF Empreinte 2050, que sa rédaction soutient. Comme Claire Kerboul, ce plan considère que la transition vers le nucléaire durable sera indispensable et dénonce l'inconséquence des décisions politiques de fermeture de Superphénix (Lionel Jospin en 1997) et l'ajournement du projet ASTRID (Emmanuel Macron en 2019). Il défend la relance immédiate de la filière française à neutrons rapides (RNR) par l'engagement d'études conjointes d'un réacteur démonstrateur et d'industrialisation du cycle du combustible adapté aux RNR.

Pour cela, les compétences dispersées sont à rassembler et à étoffer, les capacités industrielles à reconstruire en grand. Pour cette raison, Empreinte 2050 estime qu'on aura besoin d'une vingtaine d'années pour mettre en service la première tête de série. Dans l'intervalle, afin de répondre à la forte croissance du besoin d'électricité pour atteindre la neutralité carbone, il prône un déploiement important et industriellement faisable de toutes les énergies décarbonées : réacteurs EPR à neutrons lents, capacités éoliennes et solaires.

La donne aurait pu être différente si l'exploitation de Superphénix avait été poursuivie et la filière française à neutrons rapides développée. La France aurait gagné vingt ans. Mais on ne refait pas le passé, même le pire.

1. Données AIE 2023. L'éolien (70 GW) comprend 8 GW d'éolien en mer.
2. L' U^{235} est dit fissile car il fissionne sous l'impact d'un neutron, quelle que soit l'énergie de celui-ci, en libérant 200 millions d'électronvolts. La probabilité de fission est d'autant plus grande que la vitesse du neutron est faible.
3. L'énergie moyenne du neutron lent (2 à 3 km/s) est inférieure à 1 eV.
4. L'énergie moyenne du neutron rapide (20 000 km/s) est de 2 MeV.
5. <https://nucleairedurable.fr/un-nucleaire-pour-50-ou-5000-ans.html>.
6. Voir Jean Bussac et Paul Reuss, *Traité de neutronique*, Éd. Hermann.
7. Un noyau est dit « fertile » s'il se transforme en noyau fissile après avoir capturé un neutron. Par exemple, l'uranium 238 et le plutonium 240 sont fertiles : ils se transforment respectivement en plutonium 239 et en plutonium 241.
8. Voir Dominique Grenèche, *Les Réacteurs nucléaires surgénérateurs. Pourquoi ? Comment ? Quand ?*, PNC France, p. 131.
9. Voir <https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/organes/autres-commissions/commissions-enquete/ce-independance-energetique/> Voir aussi <https://www.senat.fr/travaux-parlementaires/structures-temporaires/commissions-denquete/commission-denquete-portant-sur-la-production-la-consommation-et-le-prix-de-lelectricite-aux-horizons-2035-et-2050.html>.

ÉCRIVEZ-NOUS À progressistes@pcf.fr