

12 juin 2024

TRAJECTOIRE VERS UN NUCLÉAIRE DURABLE POUR LA FRANCE

1. Contexte et objet de l'avis	1
2. Critères et objectifs pour un cycle nucléaire durable	2
2.1. Historique	2
2.2. Les impératifs et objectifs pour une vision à long terme de la production d'électricité	2
2.3. Un cadre moyen terme (horizon 2050) contraint pour la France	5
2.4. Le cadre à long terme impose un cycle nucléaire durable	6
3. Feuille de route pour le développement d'une filière nucléaire durable	10
3.1. Les réacteurs à neutrons rapides	11
3.2. Vers un cycle durable	14
4. Conclusions et recommandations	17
Annexe : État des lieux international	20

1. Contexte et objet de l'avis

Les enjeux énergétiques et climatiques nécessitent des choix technologiques dont la pleine maîtrise convoque une vision à long terme.

C'est particulièrement le cas dans le domaine de l'énergie nucléaire. L'ampleur et la durée des investissements concernés, comme la maîtrise des technologies et des ressources naturelles associées, nécessitent une continuité d'action et une stabilité des choix stratégiques sur de nombreuses décennies.

Cette stabilité requiert une explicitation détaillée et partagée des critères rationalisant ces choix de société.



Il est donc nécessaire de disposer d'un cadre de référence assurant dans la durée la cohérence entre :

- les objectifs généraux de décarbonation de notre société et de sécurisation énergétique ;
- les choix technologiques et stratégiques concernant le déploiement des réacteurs nucléaires et du cycle du combustible dans une perspective de gestion sécurisée et durable des intrants constitués par les matières fissiles.

Ce document propose un **cadre de référence pour un cycle nucléaire durable**, cohérent et en prise avec le contexte présent. Le §2 analyse les critères et considérations aptes à structurer une politique du cycle durable à long terme. Le §3 décline cette analyse en proposant une feuille de route industrielle associée au déploiement des réacteurs nucléaires et des usines du cycle.

2. Critères et objectifs pour un cycle nucléaire durable

2.1. Historique

L'histoire du nucléaire français repose sur une stratégie du cycle dit fermé qui a profondément orienté les choix industriels initiaux avec le traitement des combustibles usés, le recyclage de matières valorisables dans des combustibles « MOX » dans les réacteurs à eau pressurisée (REP), la vitrification et le stockage en formation géologique des déchets ultimes à haute activité, ainsi que le développement des technologies de réacteurs à neutrons rapides (RNR) permettant un recyclage efficace du combustible.

Cette stratégie initiale, fondée sur une volonté d'une souveraineté énergétique pérenne, a permis à la France de développer un capital technologique de premier ordre. Elle a conduit au développement rapide d'un parc électronucléaire massif et opérationnel, ainsi qu'à l'industrialisation à grande échelle de solutions efficaces pour le long terme comme le tri des matières valorisables et la vitrification des déchets ultimes.

Dans les années 1990, cette stratégie a perdu sa lisibilité et sa cohérence globale. La disponibilité d'une électricité abondante et bon marché a fait passer au second plan les préoccupations issues des chocs pétroliers qui ont motivé l'investissement électronucléaire. La problématique des déchets est devenue le terme dominant du débat au détriment de la vision énergétique, en France et en Europe. L'influence de la France dans le domaine énergétique, à l'international et surtout en Europe, a largement pâti de l'absence d'un cadre de référence réactualisé.

Plus récemment, les préoccupations liées aux enjeux climatiques et à la sécurité énergétique justifient à nouveau de stabiliser une stratégie à long terme cohérente et ancrée dans le contexte présent et futur.

Cette stratégie à long terme est indispensable pour fournir dans la durée une base rationnelle i) aux débats nationaux préalables aux décisions, ii) à la stabilité des choix d'investissements industriels et iii) aux négociations des cadres réglementaires européens.

2.2. Les impératifs et objectifs pour une vision à long terme de la production d'électricité

2.2.1. Les objectifs stratégiques

Dans le débat complexe sur la production d'électricité, il est utile de hiérarchiser les critères permettant de justifier une vision rationnelle du sujet.

Les impératifs génériques suivants sont bien connus et sont des objectifs stratégiques de rang 1 pour une politique énergétique, y compris nucléaire :

- l'impératif climatique : même avec d'importants efforts de sobriété énergétique, la décarbonation conduit à un doublement de la production/consommation électrique à l'horizon 2050 pour les sociétés avancées. Pour que la décarbonation soit effective, il est nécessaire que cette électricité soit elle-même profondément décarbonée et fasse donc appel massivement aux technologies renouvelables et nucléaires ;
- l'impératif de sécurité d'approvisionnement : les tensions globales croissantes sur l'accès aux ressources énergétiques seront compliquées par les risques géopolitiques, comme la guerre en Ukraine l'a rappelé récemment. La fragmentation géopolitique du monde implique un accroissement structurel de ces risques. Les enjeux de sécurité énergétique et de souveraineté reviennent de ce fait au centre des préoccupations ;
- l'impératif de durabilité séculaire : cet impératif renvoie tout à la fois aux enjeux environnementaux et de sécurité nationale d'approvisionnement. Ceci implique une minimisation du prélèvement nécessaire en ressources naturelles, i.e. l'uranium pour l'énergie nucléaire et les matériaux critiques pour l'énergie renouvelable. De fait, la réduction significative des prélèvements dans le milieu naturel est une condition de la durabilité des sociétés. On parlera dans la suite de « **cycle nucléaire durable** ». Cette expression est plus pertinente que l'expression historique de cycle fermé, car elle porte en soi l'enjeu visé. Une technologie énergétique peut être qualifiée de durable si sa consommation en ressources naturelles permet d'en garantir le fonctionnement sur quelques centaines d'années. En cohérence, la consommation en uranium naturel dans un cycle nucléaire réputé durable doit être diminuée par un à deux ordres de grandeur par rapport à la pratique actuelle.
- l'impératif économique : ce critère renvoie, entre autres, à la performance du système électrique pris dans son ensemble. La capacité à assurer une part importante, voire majoritaire, de la production décarbonée par une technologie pilotable est sur ce point déterminante, compte tenu de l'importance des « coûts système » associés à l'intermittence des énergies photovoltaïques et éoliennes. À ce titre, dans un monde tendant à abandonner les sources d'énergies fossiles, un nombre croissant de pays pourraient être amenés à acquérir ou renforcer la composante nucléaire de leurs mix électriques.

À ces impératifs génériques, il convient d'ajouter des impératifs sectoriels, et notamment pour le domaine nucléaire :

- l'impératif de sûreté nucléaire est une priorité de rang 1 assurée par l'organisation générale spécifiant les responsabilités de chacun des acteurs ;
- l'impératif de gestion des déchets ultimes est une priorité dont la réponse est essentiellement assurée par la mise en service future des stockages en formation géologique ;
 - depuis les années 90, d'importants efforts de recherche ont été consacrés en France comme à l'international sur les stratégies de la transmutation¹ des actinides mineurs. Au fil des études, les gains sont apparus comme limités au regard de l'extrême complexité d'une telle stratégie². L'exploration et la promotion des technologies dédiées de transmutation des actinides mineurs n'est pas une priorité. Cependant, l'introduction d'actinides mineurs dans les combustibles RNR pourrait être envisagée pour

1. La transmutation consiste à fissionner les déchets à vie longue par des flux de neutrons, en réacteur ou dans des installations dédiées (accélérateurs de particule, ou faisceau laser, couplés à un réacteur).

2. [IRSN - La séparation et la transmutation des déchets à vie longue - 2019.](#)

diminuer la charge thermique du stockage (autrement dit réduire la quantité de déchets de haute intensité).

- l'impératif de gestion opérationnelle³ bénéficie de la stratégie de recyclage en permettant :
 - de stabiliser le besoin d'entreposage des assemblages de combustible usé ;
 - de stocker les seuls déchets ultimes en séparant puis recyclant les matières énergétiques. Ainsi, le fait de recycler le plutonium permet tout à la fois un bénéfice énergétique majeur et une réduction importante de la toxicité à long terme pour le stockage en formation géologique ;
 - d'optimiser la gestion à long terme des déchets radioactifs. En effet, le recyclage permet de passer du colis d'assemblages de combustible usé à un colis de verre qui offre de très bonnes performances en termes de comportement à long terme, aussi bien en entreposage qu'en stockage.

Les impératifs ci-dessus se déclinent mécaniquement en un objectif stratégique central :

Développer un nucléaire s'inscrivant dans un cycle durable permettant tout à la fois d'apporter une sécurité énergétique de haut niveau pour des périodes séculaires et de disposer d'un socle robuste à la décarbonation par sa pilotabilité.

2.2.2. Les objectifs quantitatifs

L'électrification des usages, soit directe (par exemple, pour la mobilité routière), soit pour la production de vecteurs énergétiques (comme l'hydrogène, le méthanol ou les carburants de synthèse) sera l'outil dominant de la décarbonation.

Les trois quarts de la consommation énergétique européenne⁴ reposent encore sur les ressources fossiles (ce ratio est de 50 % pour la France grâce à son parc nucléaire), justifiant ainsi une forte croissance des besoins en électricité. Dans son scénario « *Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector* » en 2021, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) anticipe un doublement de la consommation électrique dans les pays avancés et un triplement dans les pays émergents. Les études récentes⁵ du ministère des Affaires économiques et de l'énergie (BMWi) affichent pour l'Allemagne une consommation d'électricité augmentée d'un facteur 2,5 d'ici 2045.

Le chiffrage précis de ces besoins d'électrification massive reste délicat, car il dépend du niveau de sobriété socialement acceptable, du niveau d'industrialisation nécessaire à l'économie et à la souveraineté du pays et, enfin, de la performance technologique des procédés déployés pour la décarbonation. Les exercices réactualisés menés par RTE permettront d'affiner progressivement pour la France la trajectoire. Par ailleurs, grâce à sa production décarbonée et largement pilotable, la France continuera à exporter ses surplus d'électricité vers ses voisins.

Avec une consommation française qui pourrait s'établir autour de 800 TWh en 2050, il paraît alors nécessaire de maintenir un parc nucléaire d'une capacité installée de l'ordre de 60 GWe. Une telle capacité assure la

3. L'impératif de gestion opérationnelle d'un parc nucléaire concerne d'autres critères importants qui ne seront pas évoqués ici, comme par exemple coefficient de disponibilité du parc.

4. BP statistical Review of World Energy, juin 2021, 70th édition

5. [Long-term Scenarios, scientific analyses on the decarbonization of Germany](#)

stabilité des réseaux électriques en produisant de manière pilotable la moitié de cette consommation, soit 400 TWh. Le mix électrique décarboné de la France est aujourd'hui un atout. Avec une composante pilotable nucléaire de 60 GWe dans la continuité de la valeur historique, la France conserve cet atout et son attractivité pour que les nouvelles filières industrielles décarbonées se développent sur le territoire national.

Le paramètre dimensionnant pour la trajectoire nucléaire considérée par la suite est une capacité nucléaire installée stable et proche de 60 GWe assurant une production annuelle de 400 TWh.

2.3. Un cadre moyen terme (horizon 2050) contraint pour la France

Si la France bénéficie d'un héritage lui assurant une production électrique décarbonée, elle fait face au double défi de l'augmentation de ses besoins en électricité et du renouvellement de son parc nucléaire historique arrivant progressivement en fin de vie.

Comme l'illustrera le §3, cette logique de renouvellement d'un parc construit dans le dernier quart du siècle précédent est structurante pour le pilotage des trajectoires d'investissement dans le futur mix.

On parlera pour le parc nucléaire historique de premier parc. Son remplacement, notamment par des EPR2, sera désigné de deuxième parc, qui lui-même sera suivi d'un troisième parc, etc. À court et moyen terme, la priorité est la prolongation de la durée de vie du parc nucléaire historique et son remplacement par le deuxième parc.

D'ici 2035, seule la croissance des capacités éoliennes et photovoltaïques et une disponibilité satisfaisante du parc nucléaire installé sont en mesure d'assurer l'augmentation nécessaire de la production d'électricité décarbonée.

Au-delà de 2035, seul le déploiement soutenu des nouveaux réacteurs nucléaires et la croissance continue de l'éolien et du photovoltaïque permettront d'assurer une production d'électricité décarbonée au niveau souhaité. La Figure 1 montre qu'une capacité nucléaire stable autour de 60 GWe nécessite une rampe de déploiement d'EPR2 de l'ordre d'une paire tous les deux ans.

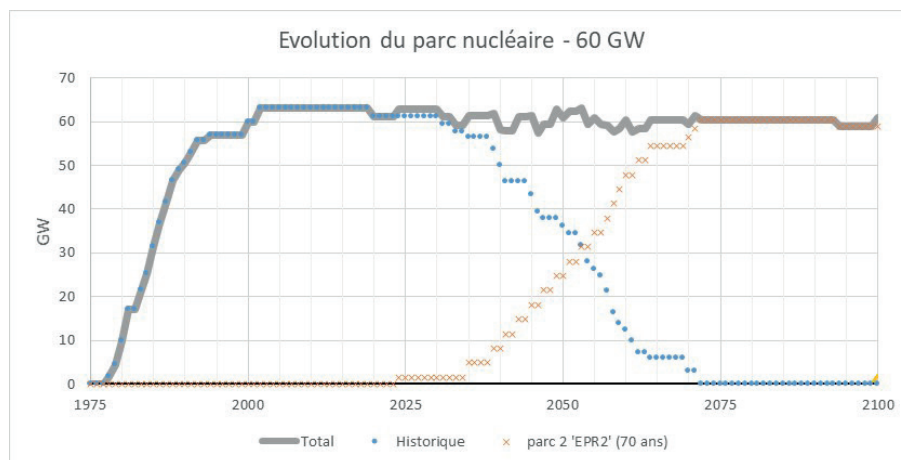


Figure 1. Évolution du parc REP pour assurer une puissance stable de 60 GWe nucléaires.

Cette illustration est obtenue avec un taux de construction d'EPR2 d'une paire tous les deux ans dans l'hypothèse plausible d'une durée de vie du parc historique de 70 ans pour 60% des réacteurs, de 60 ans pour 32% des réacteurs et de 50 ans pour 9% des réacteurs.

2.4. Le cadre à long terme impose un cycle nucléaire durable

2.4.1. Les ressources en uranium naturel dans le contexte d'augmentation du parc mondial nucléaire

Les parcs nucléaires en service très majoritairement à spectre thermique (eau sous pression ou eau bouillante) n'utilisent de ce fait directement qu'une infime partie de l'uranium naturel, principalement son isotope 235 (teneur 0,7 %), seul fissile en spectre thermique. Pour assurer une réactivité suffisante au fonctionnement des réacteurs électrogènes et assurer l'équilibre en neutrons dans ces réacteurs, l'uranium naturel doit être enrichi à environ 5 % en U235. À même production électrique, l'utilisation directe de l'U238 (99,3 % de l'uranium naturel) en spectre rapide diminue d'un facteur d'au moins 100 les besoins en uranium naturel et modifie donc drastiquement le prélèvement sur les réserves d'uranium naturel et leur épuisement à terme.

La limite de disponibilité de l'uranium naturel dépend de la croissance du parc nucléaire mondial motivée par les objectifs de décarbonation. L'horizon de temps qu'il est nécessaire de considérer ici est 2150, en cohérence avec les temps de déploiement industriel du nucléaire et avec les temps de vie importants des réacteurs : un EPR2 mis en service en 2060 doit pouvoir fonctionner jusqu'en 2140.

Selon le *Red Book 2022*⁶, publication conjointe de l'AIEA et de l'OCDE/AEN, les ressources identifiées en uranium naturel se situent entre 6 MtU (à un prix inférieur à 130 \$/kgU) et 8 MtU (à un prix inférieur à 260 \$/kgU). En addition, les ressources pronostiquées et spéculatives (désignées de « non découvertes ») seraient de l'ordre de 7 MtU. L'accès à ces ressources suppose une reprise des investissements miniers.

La consommation de cette ressource mondiale dépend de la puissance installée des réacteurs nucléaires. Cette croissance sera pilotée par le rythme de constructions additionnelles. On considère ici deux hypothèses raisonnables avec un taux mondial de constructions additionnelles limité soit à 15 GWe/an, soit à 25 GWe/an. Ces deux hypothèses conduisent respectivement à une multiplication par 3 ou 5 du parc nucléaire mondial en 2100.

À technologies de réacteurs inchangées, les besoins des parcs mondiaux sont illustrés par les deux figures ci-dessous. Elles montrent que les ressources identifiées aujourd'hui sont largement consommées avant 2100 dans les deux scénarios de croissance du parc nucléaire mondial. L'ensemble de ressources identifiées et non découvertes serait consommé entre 2100 et 2120, selon le taux de croissance du parc.

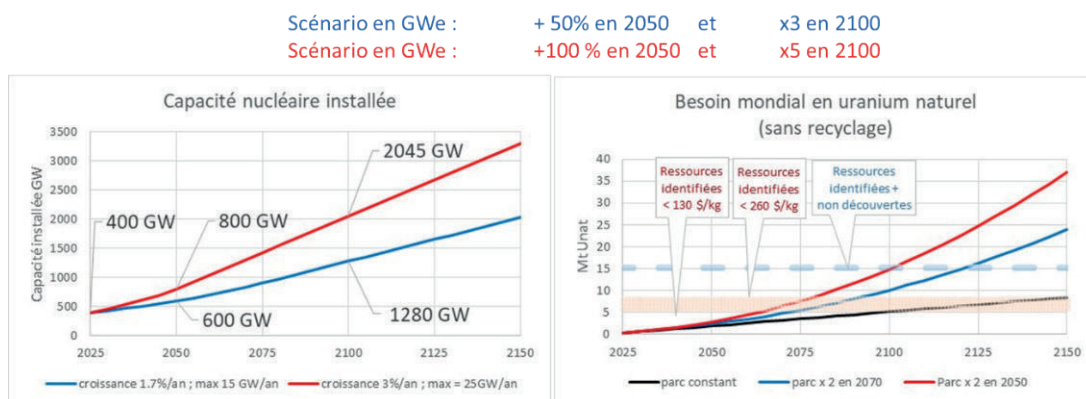


Figure 2. Deux scénarios de croissance du parc nucléaire mondial (graphique de gauche) sont envisagés pour comparer (graphique de droite) le besoin en uranium aux ressources identifiées et non découvertes (au sens du Red Book).

6. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_79960/uranium-2022-resources-production-and-demand

Les incertitudes sur le taux de croissance du parc mondial comme sur la disponibilité effective des ressources en uranium naturel sont importantes.

Il convient de noter que l'équilibre offre-demande d'uranium (à technologies de parcs identiques) dépend de nombreux facteurs dont notamment le taux de rejet en U235 à l'enrichissement, les modes de gestion du combustible en réacteur... L'impact des ressources dites non conventionnelles est difficilement quantifiable, mais peut être significatif du fait de l'augmentation des prix de marché. Ces ressources et réserves concernent notamment l'uranium récupérable comme sous-produit d'activités minières à faibles teneurs en uranium (roches phosphatées, minerais non ferreux, monazite, schistes noirs, lignite, etc.). Le cas des phosphates est d'autant plus intéressant à signaler que les pays producteurs sont différents des pays traditionnellement exportateurs d'uranium. Enfin, l'extraction de l'uranium contenu dans l'eau de mer (avec une concentration de 3 parties par milliard) continue à faire l'objet de recherches et d'expérimentations, notamment en Chine, pays pauvre en réserves d'uranium. Ces éléments devront être réévalués périodiquement pour piloter une stratégie du nucléaire durable. Il est utile à ce titre de renforcer les évaluations relatives aux ressources non conventionnelles dans les futures éditions du *Red Book*.

La question systémique et stratégique des ressources en uranium naturel doit être anticipée dès à présent.

Les incertitudes sur les ressources en uranium rejoignent plus généralement les incertitudes sur les technologies alternatives. Dans la logique assurantielle proposée ici, le pilotage de la trajectoire, et notamment les décisions de lancement des différentes phases de déploiement industriel, nécessite des revues périodiques, tant sur le plan du contexte général que de la maturité des solutions alternatives.

2.4.2. Le recyclage des matières nucléaires est la clé de la sécurité d'approvisionnement

Le risque de fortes tensions sur les approvisionnements d'uranium naturel apparaît avant la fin du siècle. La fragmentation du monde implique un accroissement structurel des risques géopolitiques. La situation présente au Niger et la prise de contrôle par la Chine des ressources d'uranium en Namibie en sont des exemples. Cette incertitude géopolitique pèse aussi sur le Kazakhstan, l'Ouzbékistan et la Mongolie.

L'importance de ces risques, comme leurs horizons temporels, nécessite leur anticipation.

Une solution efficace est de multiplier le taux d'utilisation de l'uranium naturel par un facteur 100 à 200 par rapport aux technologies d'aujourd'hui. Ceci est possible en valorisant la presque totalité de l'uranium 238 initial par le recyclage de la totalité du plutonium et de l'uranium, ce que permet la technologie RNR. La limite systémique imposée par l'uranium naturel passe alors mécaniquement de quelques décennies à quelques millénaires.

Dans le contexte de la décarbonation profonde de la société et des enjeux de durabilité, c'est bien la stratégie de recyclage aussi complet que possible des matières nucléaires qui peut assurer une disponibilité suffisante à très long terme des ressources naturelles et justifier ainsi le paradigme d'un « cycle nucléaire durable ». Ce paradigme permet au nucléaire d'être une réponse pertinente, au côté des énergies renouvelables⁷, à la question centrale d'un approvisionnement durable en énergie pour nos sociétés.

7. Les énergies renouvelables mobilisent des technologies consommatrices de ressources naturelles qu'il s'agira de la même manière d'économiser par le recyclage pour assurer leur durabilité.

2.4.3. Le recyclage, un choix stratégique justifié et réalisable pour la France

Le recyclage des matières nucléaires est une réponse à la durabilité du nucléaire qui nécessite pour sa mise en œuvre de lourds engagements industriels et financiers sur de nombreuses décennies. On parlera alors de « filière nucléaire durable » comme l'ensemble des installations et activités déclinant sur le plan industriel le concept de cycle nucléaire durable.

Peu de pays sont aujourd'hui en mesure de s'engager sur cette voie. Le recyclage est une solution potentielle à l'échelle mondiale, mais son déploiement à une échelle significative reste peu probable avant de nombreuses décennies. La croissance d'un parc nucléaire moyen mondial utilisant la seule ressource uranium naturel est donc bien le scénario mondial de référence à considérer jusqu'à la fin de ce siècle, voire au-delà.

Le défaut d'une solution mondiale impose alors une mise en priorité de l'impératif de sécurité énergétique nationale⁸. Sa capacité à déployer opérationnellement avant la fin de ce siècle une filière nucléaire durable fait de la France un des rares pays à pouvoir assurer sa sécurité énergétique sans pour autant disposer des ressources naturelles.

Par le fonctionnement de son parc nucléaire, la France a en effet constitué sur son sol une réserve énergétique de grande valeur sur le long terme avec l'uranium appauvri en uranium 235 issu de l'enrichissement et les matières issues du retraitement. Le stock d'uranium appauvri, entreposé en France, atteindra 400 000 t en 2040 et représente un gisement d'énergie considérable. Dans le principe, ce stock permet, avec les technologies idoines, une quasi-autonomie énergétique de la France, en supprimant tout besoin d'importation d'uranium naturel et sans mobiliser de ressources minières, pour plusieurs milliers d'années. Il est de ce fait nécessaire de sécuriser la ressource stratégique qu'est le stock d'uranium appauvri.

L'ampleur de ce stock par rapport au flux de consommation envisageable par des RNR déployés en France fait parfois débat du fait de son volume. Ce stock ne pose pas de difficulté de gestion⁹ dans la durée. Il est donc pertinent de reporter la réflexion sur son devenir lorsque le contexte énergétique de l'Europe, en termes de besoins et de technologies disponibles, sera clarifié et surtout stabilisé.

Avec les technologies du retraitement-recyclage et des réacteurs à neutrons rapides, l'uranium appauvri présent sur le territoire national constitue un potentiel énergétique répondant aux impératifs de sécurité énergétique à très long terme de la France.

8. La question énergétique à l'échelle européenne n'est pas abordée ici. On peut néanmoins noter que la mise en place d'un nucléaire durable renforce mécaniquement le mix électrique européen.

9. L'uranium appauvri est très faiblement radioactif, moins que l'uranium naturel et est géré sous une forme inerte.

2.4.4. Spécification pour une filière nucléaire durable

Un cycle durable est réalisable en France grâce au socle industriel existant (maîtrise du cycle uranium-plutonium) et grâce au stock d'uranium appauvri existant¹⁰.

Pour envisager une trajectoire de mise en œuvre d'un tel cycle durable (cf. §3), il convient d'en clarifier les objectifs.

1. Un cycle nucléaire durable est d'abord conçu dans l'objectif d'une production énergétique massive et durable, avec un très haut niveau de sécurité d'approvisionnement à long terme.
2. Ceci implique le déploiement d'une filière industrielle adaptée à un tel cycle durable. On parlera alors de « filière nucléaire durable ».
3. Puisque les risques liés aux ressources en uranium naturel deviennent significatifs avant la fin de ce siècle (incertitudes à l'horizon 2070 et risques importants à la fin du siècle), cette filière durable doit pouvoir croître significativement aux mêmes échéances.
4. Pour que l'impact soit réel, la production énergétique de cette filière durable doit représenter un pourcentage significatif de la production nucléaire. Pour une capacité nucléaire installée autour de 60 GWe, la dénomination de filière durable n'a de sens que si la capacité installée en RNR est comprise dans une fourchette entre 20 GWe et 60 GWe, (soit 30 % à 100 % de la puissance productive). Une filière nucléaire durable est avant tout une filière industrielle avec sa chaîne d'entreprises. Un volume de 20 GWe permet d'assurer la performance d'une filière industrielle. La disponibilité d'une filière industrielle performante permet en retour un pilotage effectif pour adapter la rampe de construction aux besoins éventuels ultérieurs.
5. Les points 3 et 4 montrent qu'il ne s'agit pas de développer un objet de recherche, mais bien d'investir sur les étapes menant à une filière industrielle productive et en croissance d'ici la fin du siècle.
6. Pour que la dénomination de filière durable soit justifiée, il faut que la consommation d'uranium naturel soit diminuée très significativement. La technologie actuelle de mono-recyclage MOX et URE conduit à une réduction de la consommation en uranium naturel d'environ 20 %. Cette technologie présente un intérêt en tant que stratégie transitoire, mais ne répond pas au besoin d'un nucléaire durable.
7. En satisfaisant les points précédents, une filière nucléaire durable répond à la fois aux impératifs climatiques, de sécurité énergétique et de durabilité séculaire.
8. Des réacteurs de puissance à neutrons rapides ont été déployés en France dans le passé et sont aujourd'hui exploités ou en construction ailleurs dans le monde (voir Annexe). Malgré cela, la mise en œuvre d'une filière industrielle durable, au sens précédemment défini, requiert un investissement de développement technologique pour garantir les bons niveaux de sûreté et de performance économique.
9. Le besoin et l'impact d'une filière durable en termes d'évolution anticipée des stocks de matière nucléaire (uranium et plutonium) doivent être évalués et explicités. La notion de filière nucléaire durable implique, par définition, une gestion prévisionnelle sur de nombreuses décennies de ces stocks de matières qui structurent directement la production électrique de cette filière.

10. Le cycle thorium est une alternative au cycle uranium qui n'a jamais été déployée industriellement. Ces deux cycles nécessitent des technologies de même nature, i.e. le recyclage et les RNR. L'Inde, qui possède de ressources importantes en thorium et pas en uranium, évoque le passage à un cycle thorium. La France dispose d'un socle industriel et d'un stock stratégique lui permettant, avec un investissement et une chronologie raisonnables, de mettre en œuvre un cycle uranium durable ; la France n'a donc pas de motivation à envisager un cycle thorium.

10. En cohérence avec les points précédents, les critères d'évaluation pour une trajectoire visant au développement d'une filière nucléaire durable sont :
- la satisfaction des exigences de sûreté ; ces exigences ont significativement évolué pour les réacteurs depuis la mise à l'arrêt des RNR déployés en France ;
 - la réduction de la consommation d'uranium naturel, avec une première cible de réduction d'un ordre de grandeur (facteur 10) dans le siècle prochain et avec une capacité long terme d'autonomie (réduction d'un facteur 100 à 200 grâce à l'utilisation de l'uranium appauvri entreposé) ;
 - l'évolution du stock de plutonium dans sa capacité à permettre la cinétique de croissance de la filière durable des RNR ; ce point est traité au [§ 3.2.2](#) ;
 - la performance économique. Un cycle durable et le cycle actuel partagent les mêmes fonctions et devraient présenter un coût d'exploitation dans les mêmes ordres de grandeur. L'enjeu économique se concentre donc essentiellement sur les coûts de construction des réacteurs RNR et des usines du cycle associées. Les études amont devront porter notamment sur les simplifications importantes de la conception et de la construction déjà identifiées ;
 - des sujets opérationnels comme les besoins d'entreposage pour les assemblages de combustibles usés.
11. Une dernière spécification essentielle repose sur le fait qu'une filière nucléaire durable est une composante d'un système de production électrique intégré. Cette composante durable viendra se substituer en partie ou en totalité à la composante actuelle des réacteurs REP (essentiellement des EPR2 pour le deuxième parc). Mais cet équilibre doit répondre à la contrainte globale introduite au [§ 2.2.2](#) : la somme des capacités installées nucléaires doit rester de l'ordre de 60 GWe. Cet objectif est dimensionnant et fixe mécaniquement les fenêtres de déploiement pour une filière durable.

3. Feuille de route pour le développement d'une filière nucléaire durable

Ce paragraphe propose une feuille de route pour la mise en œuvre d'une filière nucléaire durable telle qu'explicitée au [§ 2.4.4](#).

Une filière nucléaire durable relève de l'économie circulaire et intègre en cohérence un volet réacteur ([§ 3.1](#)) et un volet cycle ([§ 3.2](#)), l'ensemble étant lié par la contrainte forte de flux de matière équilibrés en entrée et sortie.

Le déploiement d'une filière nucléaire durable impose dès lors une cohérence entre les cinétiques de construction des installations (réacteurs et usines du cycle) et la trajectoire de disponibilité des matières issues du recyclage. Le pilotage sur plusieurs décennies de la mise en œuvre d'une filière nucléaire durable ne peut pas être assuré par les seules forces du marché. L'État doit promouvoir une trajectoire dont les objectifs, planifiés avec suffisamment d'anticipation, permettent aux entités publiques et industrielles de mobiliser les compétences et les investissements nécessaires dans la construction et la gestion des briques industrielles d'un cycle nucléaire durable.

Cette feuille de route prend en compte la priorité qu'il convient de donner, dans le court terme, à la réussite du lancement de la construction des premiers EPR2 par les bureaux d'études et les industriels de la filière nucléaire française.

3.1. Les réacteurs à neutrons rapides

3.1.1. Chronologie souhaitable de déploiement

La trajectoire de déploiement d'une filière nucléaire durable est structurée autour de la mise en service d'un parc de réacteurs à neutrons rapides en complément des REP. La chronologie de déploiement des RNR proposée ici répond aux enjeux du §2, mais elle reste indicative et nécessite une instruction plus précise par les acteurs concernés.

2025-2030	Renforcement des études amont sur une technologie RNR, centrées sur la sûreté, notamment sur les aspects spécifiques aux RNR, et sur la réduction des coûts de construction. L'objectif est de justifier le choix de la technologie RNR et de la puissance d'un démonstrateur extrapolable à un réacteur d'une puissance de 1 GWe. L'objectif donné à ces études est clairement le déploiement de la filière industrielle dont la chronologie est indiquée ci-dessous.
2030	Lancement du projet démonstrateur RNR-Dem extrapolable à 1 000 MWe. La puissance du RNR-Dem (quelques centaines de MWe) résultera des études menées en 2025-2030.
2040	Mise en service du démonstrateur RNR-Dem dont le but est d'acquérir la maîtrise technologique nationale d'une future filière industrielle répondant aux impératifs d'un référentiel de sûreté moderne et d'une performance économique compatible avec un déploiement à grande échelle.
2050-2060	Lancement des études de la tête de série industrielle RNR-Ind (par exemple de 1 GWe, la puissance effective résultant des études technico-économiques). Revue en profondeur du besoin et des alternatives pour alimenter la décision du lancement d'une filière industrielle RNR; ceci inclut notamment i) l'actualisation du besoin résultant de l'évaluation du contexte et des perspectives énergétiques et ii) l'évaluation des alternatives technologiques potentielles comme, par exemple, la fusion nucléaire, l'hydrogène naturel, les technologies de stockage longue durée de l'énergie, les ressources non conventionnelles d'uranium.
2060	Si décision positive à l'issue de la revue, lancement d'une filière industrielle RNR avec le démarrage de la construction d'une tête de série sous la forme d'une première paire de RNR-Ind.
2070	Mise en service de la première unité de la tête de série RNR-Ind.
2070-2100	Mise en service d'un palier industriel de 10 GWe de RNR-Ind.
2100 et au-delà	Pilotage de la capacité installée en RNR en fonction des besoins et des avancées constatées sur les technologies alternatives.

Dans la chronologie ci-dessus, la première phase jusqu'à 2060 relève d'une logique assurantielle et devrait être engagée. Les phases suivantes concernent le déploiement industriel fondé sur des décisions nécessitant un examen régulier du contexte général et surtout des alternatives technologiques.

3.1.2. Justification de la chronologie proposée

Les dates proposées au §3.1.1 nécessitent d'être argumentées.

- Le §2 a mis en évidence un risque croissant pour la sécurité d'approvisionnement à partir de 2070 et important à l'horizon 2100. Ceci justifie pleinement les efforts permettant de disposer des technologies d'un cycle durable qui constitue une assurance contre ces risques. Cependant, cette logique assurantielle ne peut pas déterminer à elle seule une chronologie précise de déploiement industriel. En effet, une anticipation plus ou moins prudentielle des risques d'approvisionnement en uranium se traduit mécaniquement par des objectifs de déploiement industriel décalés de quelques décennies dans un sens ou dans l'autre.

- L'impératif de sécurité d'approvisionnement détermine donc un horizon à 2100 pour le déploiement d'un cycle durable, mais sans justifier une décennie précise.
- Le besoin de production d'électricité nucléaire a été quantifié au niveau de 60 GWe qu'il s'agit donc de maintenir dans la durée. Or, du fait de la durée de vie des réacteurs, le parc nucléaire garde, dans la durée, la mémoire de sa genèse avec une montée en puissance importante dans la décennie 1980. En conséquence, le maintien de la capacité cible de 60 GWe induit des périodes bien déterminées pour la construction de nouveaux réacteurs. Les cycles de renouvellement du parc nucléaire créent des fenêtres d'opportunité pour l'insertion d'une flotte de RNR significative.
- Une filière nucléaire durable avec une dizaine de GWe de RNR en 2100 apportera l'expérience et les capacités nécessaires à un pilotage effectif en fonction des contraintes et opportunités qui seront évaluées à partir de 2100. Sa construction entre 2070 et 2100 est la bonne période, car elle rend possible la croissance d'une filière durable lors de la montée en puissance du troisième parc.
- Avec 2100 comme date pivot pour un objectif à 10 GWe de RNR, la chronologie proposée au [§3.1.1](#) relève alors simplement d'une logique de compte à rebours.
- Il est nécessaire dans la période 2025-2030 de mener les études permettant de faire reposer le processus de sélection technologique sur des justifications robustes. Les critères qui président à ce processus de sélection technologique ont été posés au [§2.4.4](#). La satisfaction de ces critères impose notamment que le démonstrateur RNR-Dem soit conçu pour être extrapolable à 1 000 MWe à l'horizon 2070.
- La phase d'étude 2025-2030 est très importante. Elle doit permettre de renforcer au niveau nécessaire les compétences scientifiques et techniques. L'objectif de cette phase est d'obtenir des avancées significatives sur deux sujets essentiels : la sûreté et l'économie de la future filière. Il existe un héritage de connaissances sur la technologie RNR en France. Cet héritage a montré une complexité plus grande et un surcôt significatif par rapport aux REP. Il est donc nécessaire de revoir en profondeur la conception, avec les études de sûreté spécifiques aux RNR dans un référentiel actuel et en intégrant les progrès et les simplifications technologiques disponibles pour réduire les coûts de construction. Il faudra aussi analyser les contraintes ayant présidé dans le passé aux choix technologiques pour en mesurer la pertinence actuelle. À titre d'illustration, la conception de Superphénix a été fortement contrainte par la rareté contingente du plutonium ; le paysage est aujourd'hui différent sur ce point et permet une meilleure optimisation de la conception du réacteur. Les études devront déterminer le niveau de surgénération à prendre en compte dans la conception.
- Au-delà des enjeux technicoéconomiques, la phase d'étude 2025-2030 est aussi importante pour replacer la France dans une dynamique positive et visible, dotée avec le nucléaire durable d'une vision d'avenir. Une telle dynamique permettra tout à la fois de susciter des vocations parmi les jeunes générations, d'attirer des talents étrangers et de motiver au bon niveau des collaborations internationales (par exemple avec le Japon).

La chronologie proposée prend en compte la priorité qu'il est nécessaire d'accorder à la construction du deuxième parc constitué d'EPR2. La Figure 1 montre en effet que la séquence de construction des EPR2 est une priorité avec un rythme moyen d'une paire d'EPR2 tous les deux ans, associé à une majorité du parc historique prolongé jusqu'à 70 ans. La construction post -2070 des tous premiers RNR industriels vient en remplacement des derniers réacteurs du parc historique en fonctionnement et donc en lieu et place des derniers EPR2 du deuxième parc. Ainsi, le développement de la technologie RNR n'interfère pas avec la priorité donnée à la construction des EPR2 constitutifs du deuxième parc.

La chronologie imposée par les objectifs de décarbonation et de sécurité énergétique rend nécessaire le choix d'une technologie de référence pour un déploiement industriel tel que proposé au §3.1.1. Ceci n'est pas contradictoire avec des efforts de recherche menés en parallèle sur des voies alternatives et plus prospectives permettant de maintenir à long terme la trajectoire sur le meilleur état de l'art.

3.1.3. Illustration de deux trajectoires de mise en œuvre d'une filière nucléaire durable

Les figures ci-dessous illustrent la contrainte dimensionnante imposée sur la cinétique de déploiement avec un parc nucléaire stable de 60 GWe (avec une durée de vie moyenne de 70 ans pour les nouveaux réacteurs). Le palier 2100 de 10 GWe en RNR offre la marge de manœuvre pour décider de la nature du troisième parc (ratio RNR/REP) en fonction du contexte énergétique et de l'évaluation des alternatives potentielles.

Selon le contexte et le besoin, le parc nucléaire du siècle prochain pourra être assuré par un équilibre entre les réacteurs REP et les réacteurs à neutrons rapides. Les deux figures ci-dessous illustrent un parc nucléaire post -2100 avec respectivement 30% et 100% de réacteurs à neutrons rapides.

En disposant d'un premier palier industriel de RNR à 10 GWe en 2100, la société aura la capacité de choisir le bon mix technologique pour le troisième parc nucléaire en fonction des contraintes et des alternatives technologiques du moment. L'enjeu de cet avis n'est pas de prévoir le mix post -2100, mais de proposer la trajectoire entre aujourd'hui et 2100 permettant de rendre possible ces choix futurs.

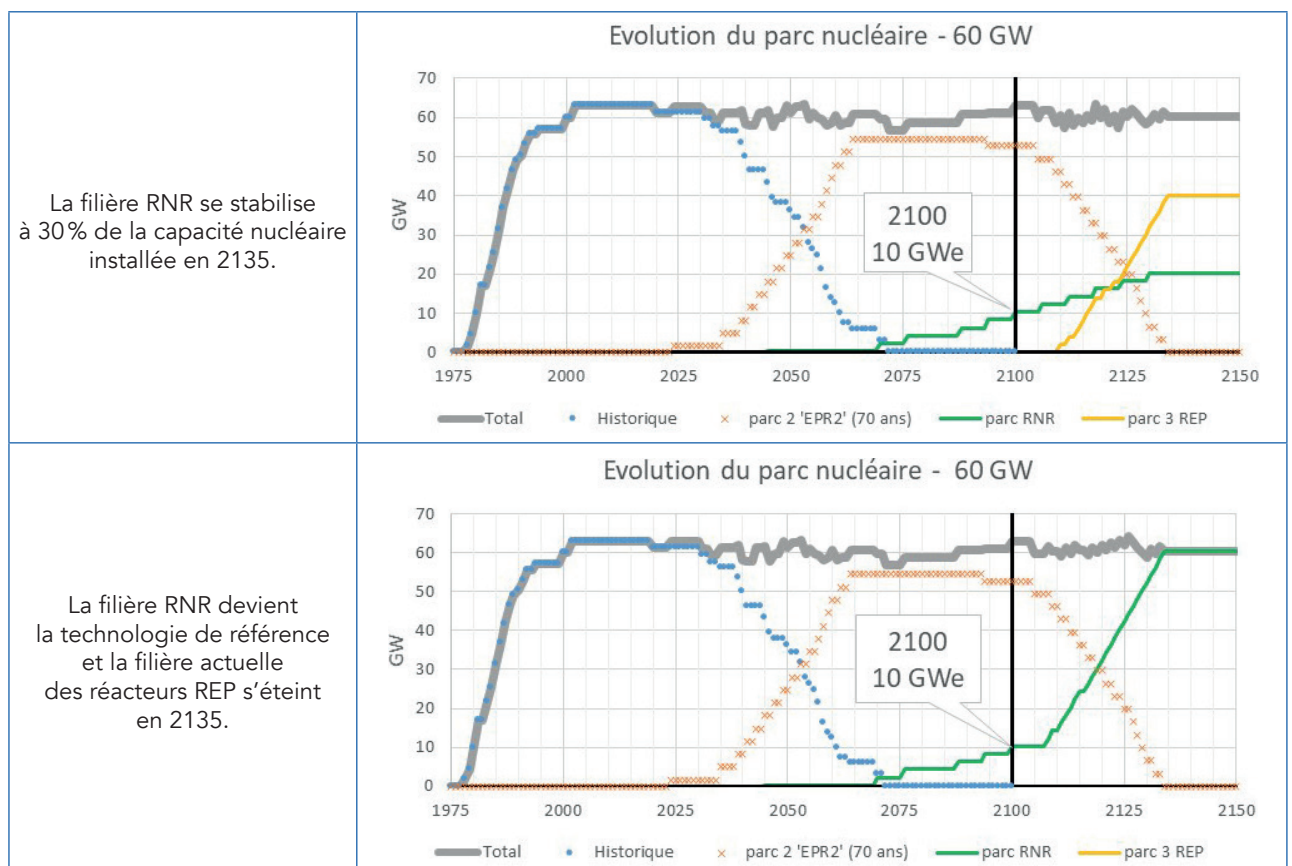


Figure 3. Illustration des programmes de construction des deuxième et troisième parcs nucléaires, avec l'objectif d'une capacité installée stable à 60 GWe. La fenêtre de déploiement des RNR est nécessairement associée avec la montée en échelle du troisième parc.

L'impact sur le cycle des matières associés aux deux scénarios illustrés par la Figure 3 est analysé dans le paragraphe suivant.

3.2. Vers un cycle durable

Les quantités évoquées dans ce paragraphe sont des estimations en ordre de grandeurs qu'il conviendra d'évaluer en détail. Des calculs précis sont en effet nécessaires pour valider les schémas en prenant en compte l'isotopie détaillée du plutonium et des isotopes non fissiles, déterminante pour le fonctionnement neutronique des réacteurs. Ces calculs détaillés sont essentiels pour déterminer, le moment venu, le transitoire précis vers un cycle nucléaire durable et la performance associée en termes d'économie des ressources naturelles. La feuille de route esquissée ici ne pourra être précisée qu'en actualisant les calculs de flux de matière sur la base des objectifs considérés, c'est-à-dire un parc de 60 GWe dont la priorité est de réduire significativement la dépendance vis-à-vis de l'uranium naturel.

Compte tenu de leur âge, les usines du cycle vont devoir aborder dans les deux prochaines décennies une phase de renouvellement pour assurer leur continuité de fonctionnement. Comme pour les réacteurs, cette phase doit être mise à profit pour actualiser le cahier des charges de ces installations et les préparer aux besoins futurs du cycle.

3.2.1. Le cycle existant

La quantification des flux de matière associés à un parc nucléaire dépend de l'énergie produite. On considère ici un cycle normalisé à un parc de 60 GWe produisant annuellement 400 TWh.

Le cycle ouvert constitue la référence pour la consommation d'uranium naturel. La production de 400 TWh consomme en cycle ouvert 1 200 t/an d'uranium naturel enrichi (UNE), soit 9 000 t/an d'uranium naturel.

Dans le cycle actuel, dit « mono-recyclage », les combustibles sont en majorité à base d'uranium naturel enrichi (UNE, 1 000 t/an), avec un complément à base de mélange d'uranium appauvri et de plutonium (MOX, 120 t/an) d'une part et à base d'uranium de retraitement enrichi (URE, 80 t/an) d'autre part. La production de 400 TWh repose sur le retraitement de 1 000 t/an d'UNE. La Figure 4 illustre les flux caractéristiques du cycle monorecyclage.

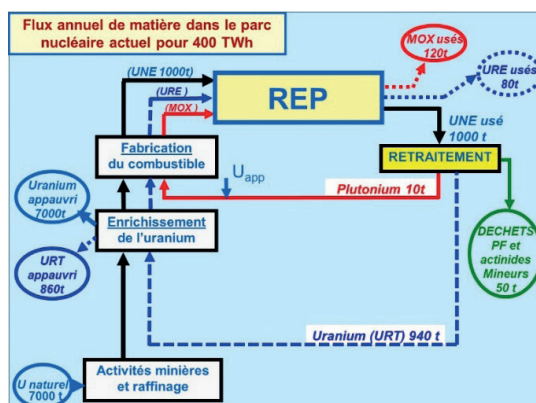


Figure 4. Flux annuel de matière dans un cycle « mono-recyclage » de référence associé à la production de 400 TWh.

L'économie en ressource naturelle permise par le cycle « mono-recyclage » (1 000 t/an d'UNE et 7 000 t/an d'uranium naturel) par rapport au cycle ouvert (1 200 t/an d'UNE et 9 000 t/an d'uranium naturel) est donc de 20%.

Cette économie de ressource naturelle est significative, mais ne permet pas de répondre à l'impératif de durabilité ou d'assurer une sécurité énergétique à long terme. Par contre, le cycle « mono-recyclage » apporte le bénéfice en France d'une part d'un système industriel éprouvé rendant crédible l'évolution vers un cycle durable et d'autre part d'une disponibilité initiale du plutonium nécessaire au lancement de la filière RNR.

Aujourd’hui, le stock de plutonium séparé issu du retraitement est d’une centaine de tonnes auquel convient d’ajouter environ 300 t de plutonium non séparé présent dans les combustibles usés (UOX, MOX ou URE) entreposés¹¹. Ce stock augmente continûment avec un flux annuel de 7 t de plutonium supplémentaire entreposé dans les MOX usés aujourd’hui non retraités.

3.2.2. Le cycle RNR

La trajectoire vers un cycle RNR nécessite un long transitoire permettant une montée en échelle parallèle du déploiement des RNR et de l’inventaire en plutonium requis.

Dans un cycle à l’équilibre, un RNR d’un GWe mobilisera 15 à 20 tonnes de plutonium, la moitié chargée dans le réacteur et l’autre moitié dans les usines du cycle. Les trajectoires de disponibilité du plutonium et de mise en service des RNR doivent donc être soigneusement planifiées.

La France dispose d’un stock initial de plutonium permettant d’amorcer cette trajectoire. Lorsque la puissance installée des RNR s’accroît, la croissance du stock de plutonium requis est accélérée par la capacité des RNR à transformer l’uranium appauvri existant sur le sol national en plutonium. La trajectoire de croissance de l’inventaire en plutonium nécessaire à un cycle durable doit être anticipée, car elle est dimensionnante pour la spécification technique des RNR à développer.

En cohérence avec la Figure 3, on considère un troisième parc constitué soit de 20 GWe de RNR (un tiers de la capacité nucléaire installé de 60 GWe) et soit de 60 GWe (100% du parc nucléaire).

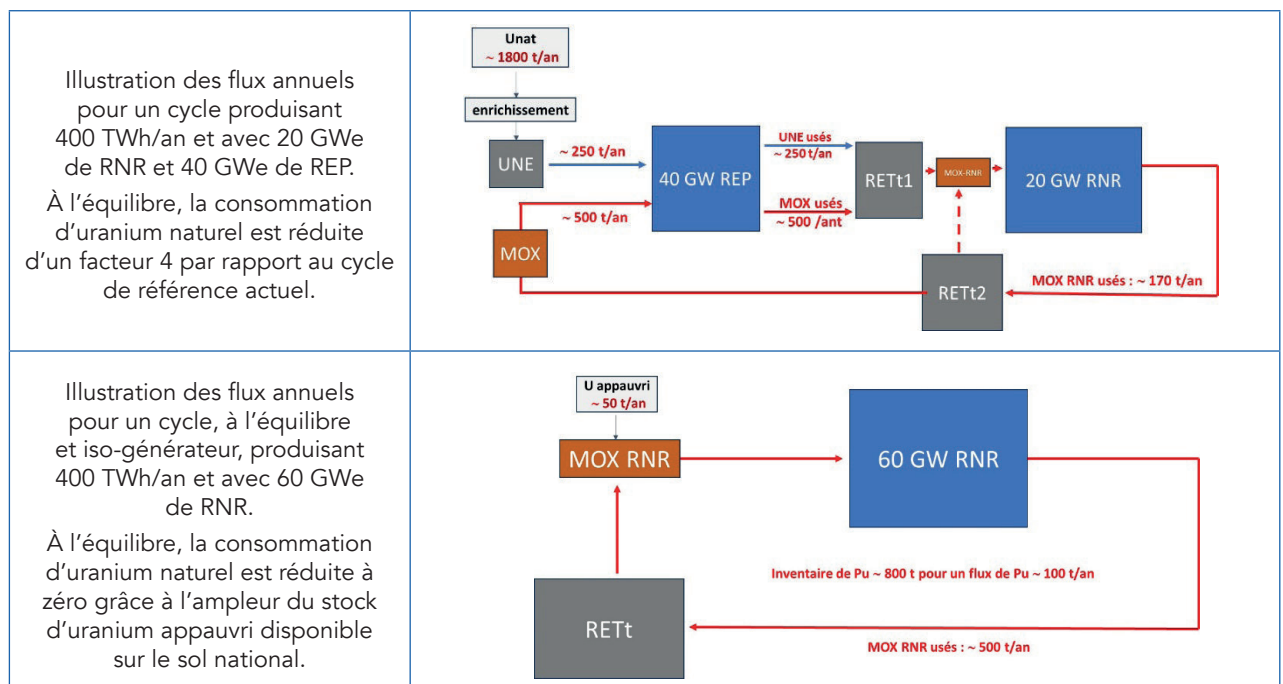


Figure 5. Ordre de grandeur des flux annuels à l’équilibre dans un parc contenant respectivement 30% et 100% de RNR. Les valeurs précises dépendront de nombreux paramètres opérationnels. L’impact sur la consommation en uranium naturel permet de parler ici de cycle nucléaire durable.

11. Communication française à l’AIEA 2023 ; <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/1998/infcirc549a5-27.pdf>

À comparer au cycle ouvert qui consomme 9 000 t d'uranium naturel par an pour la production de 400 TWh/an, un parc 100% RNR ne consommera plus qu'une cinquantaine de tonnes par an de matière prélevée dans le stock d'uranium appauvri disponible sur le territoire national (400 000 t en 2040).

Les éléments ci-dessus illustrent les ordres de grandeur des quantités à mobiliser pour transiter du cycle actuel à un cycle durable à base de RNR. Ils nécessitent un travail technique d'approfondissement pour garantir tout au long de la trajectoire la cohérence des flux de matières, en quantité comme en qualité, nécessaires à l'alimentation des réacteurs et au dimensionnement des usines du cycle. Cette complexité technique est inhérente au concept d'économie circulaire dans lequel s'inscrit un tel cycle nucléaire durable.

3.2.3. L'évolution des usines du cycle

Les usines du cycle doivent évoluer avec une vision globale à long terme des besoins d'aménagements successifs permettant une transition vers le cycle nucléaire durable.

Ceci implique notamment i) l'adaptation aux fortes teneurs en plutonium de l'ordre de 20%, ii) une capacité accrue des ateliers de purification et de conversion Pu, iii) l'adaptation de la tête d'usine pour accueillir les combustibles RNR. À ces sujets dimensionnants s'ajoutent de multiples points d'attention comme, par exemple, les autorisations de rejet et des radioéléments impactant la fabrication des combustibles MOX (Pu238, Pu240, Am241).

À grande maille, la séquence d'évolution des usines du cycle peut être structurée autour de quelques dates pivots :

- évolution d'ici 2040-2050 pour le retraitement et la fabrication de combustible MOX intégrant les caractéristiques RNR, telle que la haute teneur en Pu (20%);
- évolution à l'horizon 2080 pour le retraitement des combustibles RNR qui nécessitera des ateliers complémentaires (démantèlement des assemblages combustibles, dissolution...). La France dispose sur ce point une expérience unique au monde avec le retraitement des combustibles RNR de Phénix.

Avec la production actuelle de MOX, la France est un des très rares pays à pouvoir mettre en place en quelques décennies un cycle nucléaire durable. Le cahier des charges détaillé des évolutions qui rendront possible la montée en échelle vers un cycle durable est à établir et constitue une étape sensible. La transformation des usines du cycle devra en effet répondre à plusieurs besoins :

- la jouvence des installations permettant d'assurer la continuité de production de combustibles MOX avec une éventuelle évolution valorisant un second recyclage du plutonium en dilution avec le plutonium extrait du stock de combustibles UOX entreposés;
- la préparation d'un futur cycle nucléaire durable avec des capacités industrielles adaptées au recyclage des combustibles RNR.

4. Conclusions et recommandations

Le présent avis a pour objet de proposer une trajectoire vers un nucléaire durable pour la France.

Les échelles de temps séculaires qu'il est nécessaire de considérer rendent impossible toute certitude quant à l'avènement ou non de technologies alternatives comme la fusion, l'hydrogène naturel, les technologies de stockage longue durée d'énergie ou encore les ressources non conventionnelles d'uranium. Dès lors, il est prudent et responsable d'adopter une logique assurantielle reposant sur trois piliers.

- Le premier pilier est **l'investissement sur un portefeuille de technologies** ouvert permettant de se maintenir à l'état de l'art sur les solutions alternatives. Ce pilier relève de la Recherche, ce qui conditionne son mode de gestion avec des stratégies de collaboration et de financement adaptées pour chaque technologie prospective à son niveau de maturité.
- Le deuxième pilier est l'investissement sur **une technologie industrialisable dans la chronologie du problème posé par la décarbonation de la société**. Le §2 a montré que la technologie nucléaire répond à cet enjeu, tout en présentant un risque d'approvisionnement pouvant limiter sa pertinence à partir de la fin du siècle. Dans la logique assurantielle, il est justifié d'asseoir ce deuxième pilier sur une filière nucléaire durable qui assurera la durabilité et la sécurité de la production électrique.
- Le troisième pilier important est **le pilotage**. Ce pilotage implique de mener périodiquement des revues à la fois du contexte général et de la capacité de telle ou telle technologie alternative à être déployée à une échelle modifiant la situation. Compte tenu des échelles de temps nécessaires à la maturation industrielle d'une technologie, il est pertinent de mener de telles revues tous les vingt ou trente ans, et en tout cas avant chaque décision majeure de déploiement industrielle. Il appartiendra ainsi à l'État d'ajuster la trajectoire dans le temps, en termes d'accélération ou de temporisation, en fonction de son appréciation du contexte géopolitique et technique.

Dans cette logique, la décision de reprise d'un programme actif sur le cycle durable est sans regret¹². Elle comporte i) l'objectif de disposer en 2040 d'un démonstrateur extrapolable à l'échelle industrielle et ii) l'insertion dans le renouvellement des usines du cycle de l'objectif de compatibilité avec un cycle RNR.

En cohérence avec cette logique assurantielle, les dates évoquées ci-dessous et postérieures à 2050 feront l'objet d'un pilotage dépendant du contexte du moment.

L'objectif d'un parc nucléaire stable de 60 GWe permet de maintenir une composante robuste et pilotable au mix électrique. Cet objectif induit des périodes privilégiées pour le renouvellement du parc, périodes pendant lesquelles il est possible de développer un premier palier industriel pour la technologie RNR. La période 2070-2100 constitue ainsi une fenêtre d'opportunité pour la mise en service d'un premier palier de 10 GWe de RNR.

En établissant une filière RNR de 10 GWe en 2100, la France se dote d'un système énergétique industriel dont la croissance ultérieure est pilotable en fonction de l'évolution des exigences stratégiques.

12. Sans regret, signifie que quel que soient les événements à venir, la décision prise sera utile et rentabilisée.



Ainsi, en limitant cette filière à 30 % du parc, la dépendance vis-à-vis de l'uranium est déjà divisée par 4 par rapport au cycle actuel. Si les circonstances l'exigent, la croissance de la filière RNR peut aller jusqu'à rendre la France indépendante sur le plan de la ressource uranium à une échelle de temps du millénaire.

Ces perspectives positives conduisent à quelques conclusions ou recommandations.

- Il est nécessaire de stabiliser sur plusieurs décennies une stratégie assurant la cohérence et la rationalité des choix industriels. Une telle stratégie pourrait porter la vision systémique suivante :
 - l'électricité nucléaire (pour les pays qui se dotent de la capacité d'en gérer le déploiement dans les conditions d'économie, de sûreté et de sécurité requises) a un rôle central face aux défis d'une décarbonation effective des usages ;
 - pour permettre aux générations futures de disposer d'une électrification bas carbone et massive des usages, il convient de gérer les ressources naturelles consommées de manière soutenable afin d'en maximiser la durabilité. Ceci concerne aussi bien les matériaux critiques pour les énergies photovoltaïques et éoliennes que l'uranium naturel pour l'énergie nucléaire ;
 - les enjeux énergétiques, présents et futurs, sont l'objectif stratégique qu'il convient de mettre au centre des débats et des réflexions sur le nucléaire. Les questions importantes liées à la sûreté, la sécurité, l'économie et la gestion des déchets sont les contraintes dimensionnantes et incontournables qu'il s'agit de maîtriser dans la mise en œuvre des solutions nucléaires ;
 - le principe d'une gestion durable de l'uranium naturel et les enjeux de sécurité énergétique amènent à considérer le recyclage de l'uranium et du plutonium comme des enjeux stratégiques. Ceci implique pour la France de maintenir son investissement technologique dans l'industrie du retraitement et de préparer les technologies de réacteurs à neutrons rapides qui permettront une utilisation presque complète de l'uranium. Cet investissement permet en outre la valorisation sur la grande durée des stocks de matières nucléaires déjà disponibles sur le sol national et notamment l'uranium appauvri ;
 - l'accroissement de la capacité mondiale nucléaire en réponse aux enjeux climatiques augmente significativement les risques associés à la disponibilité de l'uranium à l'horizon 2100. Il convient dès lors d'engager rapidement une trajectoire vers un cycle nucléaire durable pouvant garantir une production d'énergie bas carbone sur de longues durées.



- Un tel cadre de référence permettra de porter clairement et efficacement la position française sur le sujet au sein de l'Union européenne (avec un enjeu réglementaire d'importance critique) et en bilatéral à l'international (avec un enjeu stratégique autour de la constitution d'alliances politiques et industrielles sur le sujet nucléaire). Cette dimension européenne et internationale est un élément de robustesse important de la trajectoire vers un cycle durable. L'annexe illustre l'état des lieux international sur le sujet.
- En cohérence avec ce cadre de référence, il convient dans les prochaines années pour préparer la réalisation de la feuille de route présentée au §3 :
 - de stabiliser dans la durée le caractère stratégique des matières nucléaires présentes sur le territoire national (uranium et plutonium dans les combustibles usés non retraités, stocks d'uranium de retraitement et d'uranium appauvri);
 - d'engager la pérennisation de la filière industrielle de traitement-recyclage française et de mener activement les études sur le renouvellement des installations de La Hague, avec une vision globale long terme des besoins d'aménagements successifs vers un cycle durable ;
 - de renforcer à court terme les études amont sur le concept RNR centrées sur les aspects sûreté et réduction des coûts de construction avec l'objectif de justifier le choix de la technologie RNR et de la puissance d'un démonstrateur extrapolable à un réacteur d'une puissance de l'ordre de 1 GWe déployable à l'horizon 2070.

Le renforcement des études conceptuelles sur le concept RNR est urgent pour aboutir en 2030 aux choix de la technologie du démonstrateur 2040 et aux spécifications principales associées. Le critère le plus dimensionnant dans l'analyse présidant à ces choix est la capacité à déployer cette technologie à une échelle industrielle d'une dizaine de GWe d'ici la fin du siècle.

Annexe

État des lieux international

La technologie des réacteurs à neutrons rapides (RNR) bénéficie d'une longue histoire. Le premier réacteur nucléaire électrogène à être mis en service (1951) était un RNR et une dizaine de réacteurs sont en construction au début des années 60 (États-Unis, Russie, Allemagne, Royaume-Uni, Japon...). En France, les réacteurs Rapsodie (40 MWe) et Phénix (250 MWe) divergent respectivement en 1967 et 1968 pour une mise à l'arrêt en 1983 et 2009 ; le réacteur Superphénix (1 200 MWe), le plus grand RNR jamais construit diverge en 1987 et est mis à l'arrêt une dizaine d'années plus tard. L'avènement des réacteurs à eau, l'accroissement des ressources d'uranium identifiées, une crispation de l'opinion vis-à-vis d'une technologie apte à pérenniser le nucléaire sur de très longues périodes ont marqué la fin de cet âge pionnier.

Trois pays disposent de réacteurs à neutrons rapides en fonctionnement et d'une politique volontariste sur le sujet.

- La Russie est le seul pays à avoir conservé une trajectoire RNR volontariste depuis cette époque pionnière. La Russie dispose aujourd'hui d'un réacteur BN-600 (560 MWe mis en service en 1980) et d'un réacteur BN-800 (800 MWe, mis en service 2016), les deux sur le site de la centrale de Beloïarsk et envisage la construction du réacteur BN1200 (1 220 MWe). Le réacteur BN-600 fonctionne depuis une vingtaine d'années avec un haut niveau de performance (taux de disponibilité autour de 80 %). La stratégie RNR est clairement assumée avec la jouvence en cours de BN-600 pour assurer son exploitation jusqu'en 2040, avec le passage en combustible MOX en 2021 pour BN-800 (taux de disponibilité de 70 %) et avec un début de construction pour BN-1200 prévu en 2030. Les réacteurs BN utilisent le caloporteur sodium. En parallèle, la Russie construit le réacteur BREST (300 MWe) à caloporteur plomb qui nécessitera un cycle du combustible spécifique (nitride de plutonium).
- La Chine dispose d'un réacteur de démonstration CEFR (65 MWth) de conception russe mis en service en 2012. Sur cette base, la Chine a développé le CFR-600 (600 MWe) qui a démarré en 2023 (début de construction 2017). Un deuxième réacteur du même type est en construction et devrait démarrer en 2026. Une unité commerciale de puissance comprise entre 1 000 et 1 200 MWe est en cours de décision pour une mise en service en 2035. Ces réacteurs sont à caloporteur sodium. La Chine et la Russie ont signé en 2023 un programme global de coopération à long terme dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides et du cycle du combustible nucléaire.
- L'Inde a terminé la construction du réacteur PFBR (500 MWe) à caloporteur sodium et le combustible a été chargé en mars 2024. Le programme RNR indien est la réponse historique et pérenne à la volonté affichée d'autosuffisance et d'indépendance.

La crainte de la prolifération a poussé les États-Unis à abandonner le retraitement des combustibles à la fin des années 1970, sous l'administration Carter. Depuis quelques années, les signaux en faveur d'une ouverture croissante sur le sujet s'accumulent, à la fois au sein de l'administration et sur le plan industriel avec le développement de projets concrets (par exemple TerraPower/Natrium). Il n'est pour autant pas possible d'anticiper la date d'un changement de paradigme sur le sujet.

Après la mise à l'arrêt définitif en 2016 de son réacteur Monju (250 MWe), le Japon a récemment décidé de relancer les études sur les RNR avec un budget de 700 M\$, pour la période 2023 à 2026, en vue de la construction d'un démonstrateur opérationnel en 2050. Ce démonstrateur sera un réacteur de 650 MWe refroidi au sodium. La période de conception s'étend jusqu'en 2030. Le Japon est explicitement demandeur d'une collaboration avec la France. La trajectoire RNR proposée dans cet avis présente des synergies avec les objectifs japonais et permettra d'envisager une collaboration sur les études de conception.

Membres du groupe de travail

Académie des technologies

Daniel IRACANE
Patrick LEDERMANN
Philippe PRADEL
Dominique VIGNON

Expert

Bernard BOULLIS, expert du cycle du combustible

Principaux acronymes utilisés

AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
EPR2	Modèle de réacteur à eau pressurisée devant équiper le futur parc nucléaire français
MOX	Combustible nucléaire à base d'un mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium
MOX-MR	Combustible MOX utilisant le plutonium issu du retraitement des MOX et du stock des UOX usés
MWe, GWe	Megawatt électrique et Gigawatt électrique, unités de puissance produite sous forme d'électricité
MWth	Megawatt thermique, unité de puissance produite sous forme de chaleur
OCDE/AEN	Agence pour l'énergie nucléaire au sein de l'Organisation de Coopération et de développement économiques
REP	Réacteur nucléaire à eau pressurisée
RNR	Réacteur nucléaire à neutrons rapides
RTE	Gestionnaire du réseau de transport de l'électricité
TWh	Térawattheure, unité d'énergie produite sous forme d'électricité
UNE	Uranium naturel enrichi à environ 5%
URE	Uranium issu du retraitement et enrichi
URT	Uranium issu du retraitement
UOX	Combustible nucléaire à base d'oxyde d'uranium