

# Sauver le climat, avec les RNR Na

## Surgénération, une filière nucléaire, déjà mature à développer

### A) Vue d'ensemble, la situation actuelle, le futur proche

Limiter l'importance du changement climatique suppose, de réduire, voire d'approcher la suppression totale de l'appel aux combustibles fossiles, (charbon, pétrole et gaz naturel) sources de rejets de gaz carbonique, qui à ce jour répondent à plus de 80 % des besoins mondiaux.

*En 2015, pour un total énergie, mesuré en énergie primaire de 13.5 Gtep, 11 Gtep (soit 81.4 %) étaient associées aux combustibles fossiles, avec en numéro Un, le pétrole. Mais en mesurant ceci par la quantité de rejets de gaz carbonique, le numéro Un devient le charbon, (avec 43 % des rejets).*

Pour cette limitation d'usage des combustibles fossiles, il faut se reposer sur deux voies, deux pistes, en premier agir au niveau des besoins, via les économies d'énergie, et pour répondre aux besoins restants, faire appel aux sources d'énergie décarbonées.

Les économies d'énergies sont indispensables, mais elles ne s'appliquent évidemment, qu'à ceux qui consomment déjà beaucoup, soit globalement, au sein des pays dits développés, et non à ceux qui sont en manque quasi vital.

Les économies d'énergie, sous leurs deux formes à ne pas confondre, de sobriété et d'efficacité, ont leurs limites, notamment du physiquement réalisables, et d'acceptabilité en mode social, si on parle sobriété, et de faisabilité technique, financière, si l'on parle efficacité. Ceci doit être placé dans un contexte d'accroissement de la population mondiale (+ 25 % environ d'ici 2050, et au delà, d'ici la fin du siècle, de l'ordre de + 50 %).

Pour répondre aux besoins restants, pour certains en partie vitaux, hormis les voies de séquestration de carbone, qu'elles soient soit naturelles (dont via la biomasse étendue), ou artificielle, avec la technologie dite CSC, en développement, ont leurs limites, il faut remplacer les combustibles fossiles, en faisant appel, pour l'essentiel aux sources décarbonées,

Cette possibilité de remplacer les combustibles fossiles par des sources décarbonées, a déjà été amorcée en France, avec la sortie du charbon et du fuel lourd, avec le développement du nucléaire pour la production d'électricité. Ceci déjà fait, permet à la France de rejeter par habitant, environ 50 % de moins de gaz carbonique que l'Allemagne, pour l'ensemble de sa production énergétique.

*En 2015, les émissions de gaz à effet de serre française avaient baissé de 16 % par rapport à 1990, tandis que la population avait augmenté de 15 % et notre PIB de près de 49 %. Cette baisse est consécutive à l'arrivée de l'électricité nucléaire à la place du charbon. Sans ceci, il aurait fallu faire face à une augmentation de l'ordre de 30 %.*

*De + 30 % à - 16 %, quel premier pas, à préserver et à amplifier.*

Cette place du nucléaire en France, s'est traduit, après l'abandon de la première génération de centrales nucléaire, avec la filière appelée communément graphite/gaz, en 1969 au profit des réacteurs à eau pressurisée de conception américaine (PWR) depuis francisée REP.

Ainsi, nous arrivons, avec la seconde génération de centrales REP (PWR), qui après Chooz A et ses 305 MWe (1967-1991), nous arrivons, à ce jour, à un total de 63 GW installés, répartis sur 58 unités, dont 34 de puissance 900 MWe (en premier Fessenheim 1, mis en service en 1977), les 24 unités de 1300 MWe (exemple Paluel), et enfin les 4 unités de 1 450 MWe (dont la dernière Civeaux 2, mis en service en 2000).

### **Une des premières questions qui se pose, est la durée de vie de ces unités ?**

Les spécifications initiales des réacteurs français visaient au départ, sur des considérations économiques, et non techniques, une durée de vie de 40 ans. Ce chiffre s'applique indirectement en spécification du matériel, par exemple en imposant des nombres des sollicitations pendant toute la vie, ceux des transitoires à faire face, mais n'impose pas directement un temps. Un état des lieux quasi permanent s'impose, qui peut se traduire par une comptabilisation des situations, à situer par rapport aux spécifications.

Ce n'est pas seulement à l'approche des 40 ans que la question du maintien en service de l'installation se pose. En France, l'Autorité de Sureté impose, une réévaluation de sureté tous les 10 ans, et lors des visites décennales la mise en œuvre de multiples vérifications, inspections complètes d'état de santé.

Dans la continuité de ce suivi régulier, se pose naturellement la question d'aller au-delà des 40 ans, à regarder, comme le retour sur investissement. Ce sujet est d'autant plus d'actualité qu'on ne cesse de mettre, à juste titre, en avant la sobriété, le non remplacement inutile, la continuité de maintien en service de tout appareil, domestique ou industriel, le plus longtemps possible, tant qu'il répond au service demandé au départ, en un mot magique « l'économie circulaire »<sup>1</sup>.

Ce refus de l'obsolescence doit s'appliquer aux réacteurs nucléaires, sans pour autant tergiverser sur la sureté, ce qui fait l'objet de toute l'attention des Autorités de Sureté.

Rien ne devrait donc s'opposer, **à retenir en France l'option, d'aller à des durées de vie au moins entre 50 et 60 ans, durées à optimiser selon les tranches, et le lancement des programmes de remplacement.** Il faudra bien un jour les remplacer, mais au plus tard si possible et toujours dans le respect absolu des impératifs de sureté.

Il faut noter qu'aux Etats Unis, alors que la licence initiale prévoyait 40 ans, la majorité des centrales PWR, ont déjà obtenu l'autorisation de fonctionner 60 ans et que des études sont lancées pour prolonger à 80 ans. Cela signifie que certaines de ces centrales construites dans les années 1970 seront encore en exploitation en 2050.

Rêvons que Civeaux soit encore en service en 2060/2070 ... ; et que l'on revienne sur l'arrêt de Fessenheim, en mettant de côté idéologie et en pensant enfin effet de serre.

Enfin, pour faire un état actuel, complet sur le nucléaire, et en prévision de la suite, il faut noter le lancement en cours, de la troisième génération de nucléaire avec EPR et ses 1600 MWe,

Ainsi, le premier EPR français (Flamanville 3), est prévu mis en service en 2022, mais en insistant, qu'en parallèle deux EPR, sur la base de construction française (EDF et Framatome) ont déjà été mis en service en Chine (Taishan), le premier en juin 2018 et le second en mai 2019. A ceci il faut ajouter, en prévision la mise en service de l'EPR finlandais (Olkiluoto) en cette année 2019, ou début 2020 (le chargement en combustible vient d'être lancé).

---

<sup>1</sup> Avec l'arrêt imposé de Fessenheim par la loi, le gouvernement semble oublier toute l'attention qu'il veut porter sur l'économie circulaire, sur le refus de l'obsolescence, soit comme garder en service ce qui répond à tous les critères, dont ceux de sureté. Un exemple d'aberration dictée par une idéologie.

Mais en pensant à l'avenir, et en revenant sur le passé, il faut noter, en France, les 2 RNR surgénérateurs, avec en premier Phénix et ses 250 MWe, en service de 1973 à 2009 (soit 36 ans) et Super Phénix et ses 1 200 MWe, en service de 1986 à 1997 (décision politique d'arrêt).

**Deux réalisations en avance pour la future 4<sup>o</sup> génération de nucléaire, ici assurée par des RNR sodium, que nous détaillerons plus loin.**

La suite, dans la mesure où le nucléaire n'est pas rejeté, voire limité (comme prévu dans la loi en préparation <sup>2</sup>), sera en grande partie fonction de l'acceptabilité, qui repose en grande partie sur l'analyse des plus et des moins.

En application du principe de précaution, qui ne doit pas se traduire, par celui de l'inaction, pour guider les choix et ne pas se bloquer sur des a priori idéologiques, il faut faire la balance entre les plus et les moins pour l'avenir du nucléaire.

Voir en Annexe, le détail argumentaire et notamment la synthèse mettant en avant l'avis de l'Académie Française de Médecine, qui considérant les bilans, se prononce clairement en établissant, que de tous les grands moyens de production d'électricité, c'est :

**« Le nucléaire qui a le plus faible impact sur la santé par kilowattheure produit ».**

**Une vision claire, simple, conduisant à poursuivre sur cette voie du nucléaire, mais en se posant la question : est- ce durable ?**

## **B) Le nucléaire durable ? Oui si surgénération**

Pas de confusion, le nucléaire n'est pas renouvelable. Ne confondons pas durable et renouvelable. L'ancienneté de sa source, l'uranium existe depuis des milliards d'années (voire aussi le thorium), ne lui confère ni plus ni moins de faveurs que les fossiles, eux, plus « jeunes », si anciens de centaines de millions d'années. Le stock est là, une fois pour toute. Il y a un fond de réserve à disposition, à extraire du tas après avoir creusé.

Le nucléaire ne serait-il comme les fossiles qu'une source, disponible à durée limitée qui se chiffrerait de l'ordre du siècle, comme l'indique le tableau ci-dessous, pour ces derniers ?

	<b>Ra/Pa (identifiées)</b>	<b>R ultimes ??</b>
<b>Pétrole</b>	<b>60 ans</b>	<b>X 2</b>
<b>Charbon</b>	<b>250 ans</b>	<b>X 2</b>
<b>Gaz</b>	<b>70 ans</b>	<b>X 2</b>
<b>Tous fossiles</b>	<b>104 ans</b>	

*Tableau : en nombre d'années, au rythme actuel d'utilisation, sur la base des réserves dites « identifiées », assez sûres, et celles repérées ultimes, possibles, mais en partie non garanties.*

---

<sup>2</sup> Sans justification technique, ou financière, mais des raisons idéologiques, on trouve notamment, l'injustifiable limitation des 63 GW de puissance installée nucléaire, et celle des 50 % pour 2035, année qui dans la loi précédente était prévue 2025. Il aura quand même fallu 2 ans pour que le gouvernement prenne conscience de l'impossibilité de répondre aux impositions idéologiques .

Pour le nucléaire, sur la base de la consommation actuelle mondiale, il y en aurait pour environ 270 ans<sup>3</sup>.

Il y aurait un peu de répit, si l'appel à l'uranium reste stable, mais en fait, il devrait fortement augmenter, le monde devant faire face dans l'avenir à un fort accroissement spécifique du vecteur électricité, comme le montre les évolutions récentes.

Ainsi, durant la dernière dizaine d'années, on note une croissance annuelle moyenne de la consommation d'électricité, au niveau mondial d'environ 2,4 %/an, contre seulement 1,5 %/an pour la totalité de l'énergie primaire, incluant la crise économique et financière 2007-2008 (subprimes, crises bancaire et financière) qui a secoué le Monde entier.

Cette tendance de plus d'électricité se constate surtout dans les pays en développement, ou ceux dits émergents. Ainsi en 10 ans la consommation électrique a été multipliée par 2,8 en Chine (pour + 5,5 % de population) et par 1,8 en Inde (pour + 17 % de population).

Cette tendance ne peut que s'amplifier au niveau mondial, vu le retard d'électrification des pays en développement, mais aussi au sein des pays développés, avec de plus en plus d'applications électriques pour les particuliers (chauffage avec les pompes à chaleur, climatisation, déplacements électriques collectifs et individuels ...) et de façon générale toute l'industrie, y compris celle des matières premières, sans oublier le monde informatique et ses datacenters, de plus en plus gourmands.

**Pour répondre à ces besoins croissants d'électricité, le nucléaire, en tant que source décarbonée doit occuper une place significative, en concurrence, ou complémentarité avec les renouvelables électrique, mais ceux-ci, hors hydraulique sont intermittents et ont besoin d'un secours (backup) déjà en puissance installée**

En conséquence, les besoins en uranium au niveau mondial devraient s'accroître, et ainsi la pénurie probable de combustibles pour les fossiles, au niveau du siècle, pourrait aussi affecter le nucléaire, encore plus rapidement, si l'accent est mis sur la Sortie de fossiles, **et si la priorité portée sur la lutte contre le changement climatique s'impose.**

Ce sujet, ressources, a été abordé dans le cadre de l'organisation internationale du GIF (Génération International Forum) et de la IV<sup>o</sup> génération, qui couvre les systèmes nucléaires à l'horizon du milieu du XXI<sup>e</sup> siècle, répondant à **des objectifs d'économie des ressources en uranium**, de compétitivité, d'amélioration de la sûreté par rapport aux réacteurs des générations précédentes, de réduction des déchets et de protection contre les actes de malveillance et les possibilités de détournement, ou de vol de matières nucléaires.

En précisant que le GIF ne se prononce pas sur l'avenir du nucléaire, comme un tout, mais dans le cadre du nucléaire, sur une sélection de filières.

Au titre de la IV<sup>o</sup> génération, c'est bien **l'économie des ressources en uranium, via la surgénération, qui constitue le point clé, et conduit à retenir les RNR-Na, en favori.**

D'autres filières, examinées, comme les GFR (Gas cooled Fast reactor) ou MSR ( Molten Salt Reactor) ont été considérées, mais reconnue, comme moins prometteuses, les premiers par l'analyse de sûreté, montrant les limites du gaz caloporteur, les seconds par l'absence de références solides, ce qui n'était pas le cas des RNR Na.

---

<sup>3</sup> Sans compter, ce qui est envisageable, le développement de l'extraction d'uranium à partir des phosphates, qui accroîtrait un peu cette durée (ordre de grandeur + 50 %), mais aussi celle à partir de l'eau de mer, qui semble difficilement envisageable avec le nucléaire actuel, mais par contre, quasiment sans limite, avec la surgénération.



## Situation actuelle de la filière RNR Na

A ce jour, au niveau mondial, nous ne partons pas de rien, et arrivons à environ 200 années/réacteur cumulées, en production d'électricité) et plus de 450 années si on prend en compte les réacteurs expérimentaux (comme Rapsodie, DFR...)

Dans l'ordre des années de mise en service, nous retenons comme repères principaux, les installations suivantes :

- BOR 50 en Russie et ses 55 MWe, toujours en service depuis 1968
- Phénix en France et ses 250 MWe (1973-2009) et ses 37 ans d'opérations
- PFR en Grande Bretagne (Ecosse) et ses 250 MWe (1974-1994)
- BN 350 au Kazakhstan (en fait ex URSS) pour un équivalent de 350 MWe (1974-1999)
- **BN 600 en Russie et ses 600 MWe, toujours en service depuis 1980, l'ancêtre**
- Superphénix (SPx) en France et ses 1 240 MWe (1985-1997)
- FBTR en Inde et ses 13 MWe, toujours en service depuis 1985
- Monju au Japon et ses 300 MWe, début de mise en service en 1994, mais retards divers, pour abandon définitif en 2017 (en partie conséquence Fukushima)
- CEFR en Chine et ses 25 MWe mis en service en 2010
- PFBR en Inde et ses 500 MWe, mis en service en 2014
- **BN 800 en Russie et ses 800 MWe, mis en service en 2015/2016, la référence Monde**

Au niveau mondial, la France, en première ligne, avec Phénix, puis Super Phénix, a passé le leadership de la filière à la Russie, suite au fiasco politico-idéologique de Super Phénix.

### En France, la douloureuse histoire de Super Phénix et la suite de la filière RNR Na

Superphénix (SPx), avec une puissance de 1 200 MWe, a fait l'objet d'une commande en 1977, de la société internationale Nersa (France 51 %, Italie 33 %, Allemagne 16 %), passée, sous forme de contrat clefs en mains auprès d'un groupement industriel européen, coordonné par la société française Novatome, du groupe Framatome/Areva

Superphénix fût le point de mire, de tous les mouvements anti nucléaires d'Europe de l'Ouest, détournant ainsi l'attention des opposants, des autres sites nucléaires PWR, qui notamment en France purent se développer, au calme.

Pour le bonheur des autres sites nucléaires, le diable était ailleurs à Creys Malville dans l'Isère, où devait se concentrer l'opposition. Ceci se traduit sur le site et dans la région, par de multiples manifestations avec la présence de groupes importants violents, venant notamment d'Allemagne et de Suisse. On retiendra le summum en 1982, avec un tir de nuit de 5 rockets à partir de la rive opposée du Rhône<sup>4</sup>.

En dépit de ce climat hostile, le chantier avança et la puissance nominale fut atteinte en décembre 1986, soit dans des délais satisfaisants, sans surcoût significatif, compte tenu du caractère prototype et aussi de l'organisation industrielle internationale, mise en œuvre.

Mais, après le succès de mise en service, et réalisation des principaux essais contractuels, des problèmes techniques ont été rencontrés dans les premières années de fonctionnement. Les défauts réels, significatifs, notamment la fuite du barillet, consécutif au changement

---

<sup>4</sup> Fut plusieurs années plus tard reconnu avoir été organisé, et fait par un élu du parti vert auprès du gouvernement cantonal de Genève, les rockets ayant été obtenues via la Fraction de l'Armée Rouge et le terroriste Carlos.

d'acier par rapport à Phénix furent corrigés au fur et à mesure. Situation non évitable à 100 %, pour une nouvelle filière à mettre au point<sup>5</sup>.

Ainsi, lors du dictat d'arrêt en 1997, tous les incidents rencontrés, y compris le plus important, celui du barillet, avaient été corrigés, sans aucune conséquence sanitaire pour le personnel et encore moins pour le public.

En fait l'ensemble des incidents, sur une période de 11 ans de janvier 1986 (premier couplage) à décembre 1996 s'est traduit par 25 mois de travaux, soit 19 % du temps. Cette pénalisation doit être placée à côté de 53 mois de fonctionnement cumulés, soit 40 % du temps, **dont même un taux de disponibilité de 90 % la dernière année**. Mais pour comprendre l'impact réel en temps, il faut ajouter l'essentiel, soit 54 mois de procédures administratives, soit 41 % du temps, y compris la reprise d'enquête d'utilité publique. Tout fut fait pour, via des attaques juridiques, retarder toute reprise après les incidents.

Le dictat d'arrêt fût notamment argumenté pour des raisons de coûts. Ceci est incompréhensible, si on considère que toutes les dépenses d'investissements étaient faites et que côté matière consommable, outre le combustible encore chargé, il y avait un demi/cœur complet, en attente de rechargement, soit la capacité de produire encore 30 milliards de kWh (30 TWh) et pas de nécessité d'achat de combustible pendant 4 ans.

Après l'abandon de Superphénix et la fin de mission de Phénix<sup>6</sup>, les équipes avaient été en grande partie dispersées, une relance des études de la filière a pu tardivement être relancée, dans ce qui fût appelé **programme Astrid**, (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*), avec en objectif 600 MWe, soit un intermédiaire entre Phenix et Super Phénix. Programme, qui visait notamment à montrer la faisabilité du bouclage du cycle de combustible en brûlant de l'uranium appauvri et du plutonium issu de la combustion du parc actuel est maintenant dans les limbes. Faute de finance, son premier objectif serait revu pour un projet de puissance réduite entre 100 à 200 MW. Mais, tout pourrait aussi être arrêté.

Le leadership est désormais Russe avec BN 600 et BN 800, et des études de projets de 1200 et 1600 MW, en notant un projet commun de BN 800 en Chine, en sachant que les Chinois développent en parallèle leur propre filière RNR, comme ils développent aussi leurs filières nationales, eau pressurisée, parmi d'autres.

## Principales caractéristiques techniques de la filière RNR Na

Ce sont des réacteurs nucléaires à neutrons rapides, dont les cœurs se caractérisent par des faibles sections efficaces de captures neutroniques, d'où de très fortes concentrations en combustibles et de fortes densités de puissance à extraire.

---

<sup>5</sup> Pour situer à la même époque, Ariane 4, qui avait eu son premier lancement en 1988, eut son premier échec en 1990, suivi de 2 autres échecs en 1994, avant ses succès ininterrompus. Toute avancée technologique n'est pas à l'abri de difficultés. Heureusement qu'Ariane n'était pas en visée de combines électorales

<sup>6</sup> Il faut noter que Phénix a été prolongé de vie à 36 ans, avec l'accord des autorités de sûreté, après mise à niveau, pour réaliser en partie, quelques essais, visant la transmutation, prévus à SPx, Un modèle de prolongation de vie réussi, alors qu'au titre outil de recherche, en prototype filière, les spécifications de construction de Phénix visaient 25 ans de marche.

Le combustible fissile est du plutonium au sein d'un oxyde mixte  $UO_2-PuO_2$ . Le faible enrichissement de 3 à 5 % d'uranium  $^{235}$ <sup>7</sup>, des réacteurs du type REP (PWR) est ici remplacé par du plutonium, venant du recyclage de ces derniers, en sachant que du plutonium se forme dans ces derniers au fur et à mesure de la vie en puissance.

Ceci impose un réfrigérant efficace, dont sont exclus tous ceux qui peuvent ralentir (thermaliser) les neutrons, avec notamment la présence d'atomes d'hydrogène, comme l'eau, les liquides organiques. Sont exclus aussi tous les gaz, faute de capacités thermiques suffisantes, y compris l'hélium, d'où le **choix du sodium essentiel et structurant sur la conception, l'exploitation**, ce qui associe des facteurs très positifs, et d'autres, plus négatifs, dont les conséquences devront et ont été maîtrisées.

Le sodium est un métal mou de couleur blanche, qui fond à 98 °C, et à la pression atmosphérique il bout à 882 °C.

Ce sera sous forme liquide, donc à température supérieure à 98 °C, qu'il sera utilisé, mettant à profit toutes ses qualités thermodynamiques favorables (conductibilité, coefficients d'échange, capacité calorifique)

Mais si on ajoute, que, comme métal, il dispose d'un coefficient de dilatation important, d'où, une forte aptitude pour **faciliter la convection naturelle**, par différence de densité, entre les colonnes de liquide montante et descendante, selon la température, et donc sans pompe (**caractère de passivité en évacuation de la puissance résiduelle**).

En liaison avec l'importance des masses de sodium stockées, dans le circuit primaire intégré, **tout est en place pour faire face aux incidents, accidents de circulation et la sûreté passive**.

La température de fusion de 97 °C n'est pas anodine, mais, sa prise en compte s'avère aisée, grâce à des équipements de préchauffage, avant remplissage, qui s'avèrent simples à mettre en œuvre, et peu coûteux. Cette température est suffisamment basse pour maintenir à l'état liquide ce métal, sans difficulté significative, en cas d'arrêt du réacteur, faciliter les approches inspection, maintenances simples, sans dépenser beaucoup d'énergie.

Avec ces propriétés, ce fluide de refroidissement permet d'atteindre des températures élevées, (490 °C et 184 bars pour SPx, au lieu de 288 °C, 71.1 bars pour N4), d'où un meilleur rendement du cycle de conversion, (41.3 % pour Super Phénix, à comparer aux 34,1 %, typique du PWR type N4)

**La très élevée température d'ébullition de 882 °C, à la pression atmosphérique, est un atout majeur, pour toute la conception et la sûreté, avec des marges considérables vis-à-vis du changement d'état en cas d'accident majeur.**

Il n'est pas nécessaire de le maintenir sous pression pour qu'il reste liquide, d'où pas de pression significative dans tous les circuits.

La pression n'est maintenue que légèrement supérieure à la pression atmosphérique, via des couvertures en gaz (argon en général en centrale, mais aussi en azote dans les boucles d'essais, ou les stockages basses températures), pour éviter les entrées d'air. Il ne reste à prendre en compte, lorsqu'on parle force de pression, que les seules forces de pesanteur

---

<sup>7</sup> Voir aussi pour certains réacteurs des combustibles MOx, contenant du plutonium. Ceci en opération dans 22 des 58 réacteurs français utilise le combustible MOx, issu de la chaîne de recyclage (recyclage qui permet de produire plus de 10% de l'électricité nucléaire française tout en réduisant le volume et la toxicité des déchets radioactifs.)

gravitaires avec les différences de hauteurs au sein des circuits. Ceci donne très peu de contraintes primaires sur les structures, qui en conséquence peuvent être très minces. Ainsi l'épaisseur en partie courante de la cuve de Superphénix de 25 mm pour un diamètre de 21,5 mètres. Ceci donne des rapports diamètre/épaisseur très différents des REP, exemple épaisseur de cuve 200 mm pour un diamètre interne de 3,988 mètres pour le palier 900 MWe.

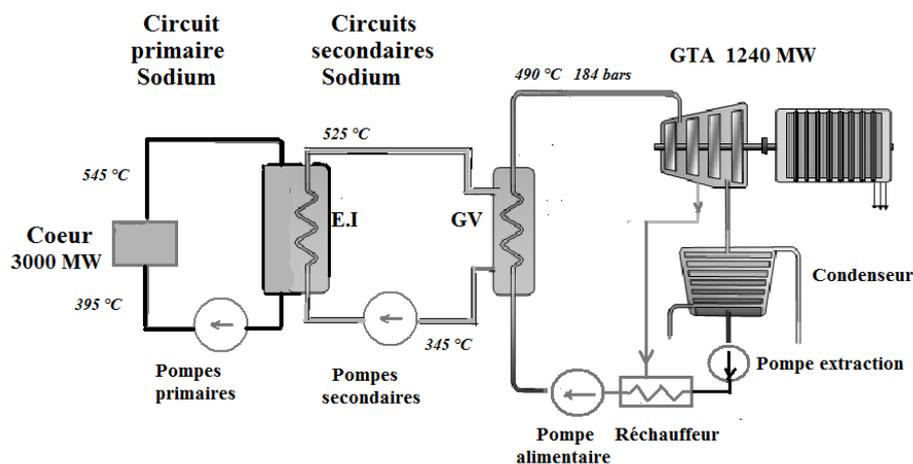
Cette relative minceur diminue l'importance des contraintes thermiques, ?e repérée aussi secondaire dans l'approche de dimensionnement, en sachant que RNR ou REP, répondent aux règles de base basées sur les mêmes fondamentaux, le RCCM (Règles de conception des îlots nucléaires REP) ayant été adapté aux RNR, avec le titre RCCMR, avec validation des autorités de sûreté.

**. Cette température élevée d'ébullition confère une marge considérable de sécurité, vis-à-vis du risque de changement d'état (liquide/gaz) lors des accidents de circulation de fluide.**

Autre avantage significatif majeur, le sodium ne corrode pas les canalisations, contrairement à l'eau utilisée dans les réacteurs du type REP. Les structures aussi bien en aciers austénitiques, que ferritiques de Phénix, inspectées après presque 40 ans de vie en sodium, se sont révélées comme neuves.

**Mais, comme points négatifs à maîtriser, il faut noter la forte réactivité chimique du sodium, tant avec l'eau (réaction forte), qu'avec l'air (combustion modérée, si on compare au fuel).**

C'est cette réactivité avec l'eau qui conduit à prévoir **un circuit intermédiaire, appelé circuit secondaire**, (nombre de boucles variable selon les installations) circuit tampon pour bien séparer le circuit actif, ou activé, autour du cœur, et l'eau du générateur de vapeur.



Le cycle thermique RNR-Na, données chiffrées pour Super Phénix

La présence des circuits de sodium secondaire (plusieurs, nombre variable selon les installations, 3 à Phénix, 4 à SPx) permet de séparer le risque chimique et celui d'origine nucléaire (ou radioactif), et conduit à n'avoir à traiter qu'une situation technique courante en pétrochimie, en dehors de tout risque de radioactivité.

Indépendamment des exigences de qualité de fabrication et des inspections périodiques, une grande importance est accordée à la détection de début de réaction sodium/eau. Les moyens nécessaires ont été obtenus avec le développement de capteurs spécifiques de présence d'hydrogène dans le sodium

(indicateur certain d'un début de réaction sodium/eau), ou dans l'argon des espaces gaz du circuit secondaire. Ces dispositifs de détection d'hydrogène se sont révélés très sensibles. Le moindre début de fuite est détecté, donne lieu à une alarme, qui conduit à arrêter l'arrivée d'eau. Rien de plus simple, il suffit de fermer une vanne.

Mais, comme ceci n'exclut pas absolument à 100 % une réaction violente, des dispositifs de sécurité, comme des disques de ruptures sont mis en place. Ils limitent le pic de pression engendré, qui pourrait se propager dans le circuit secondaire.

La réactivité chimique avec l'air, moins brutales, explosive, se pose différemment que celle avec l'eau. Il est noté, en particulier, que les feux sodium, très différents des feux d'hydrocarbures, sont très peu énergétiques et dégagent peu de chaleur.

Mais avant de parler feux, il faut retenir qu'en l'absence de pression significative, l'apparition d'un défaut débouchant se traduit par un suintement hors tuyauterie, dans l'espace sous calorifuge, calorifuge qui lui-même sera en général enveloppé d'un mince tôle de métal ordinaire. La détection de la première trace de sodium est primordiale et doit conduire à la vidange du circuit concerné, sans attendre. Mais heureusement les techniques de détection de fuites de sodium existent et sont très sensibles, bien rodées. Elles ont fait leurs preuves.

Lors d'un feu, la quasi absence de flammes facilite l'approche notamment pour la confirmation d'un défaut. Par contre la fumée, si significative, peut gêner la vision. Si pour un petit feu, l'opérateur peut s'approcher à quelques centimètres, avec l'extincteur portatif approprié (voir poudre extinctrice ci-dessous) ou simplement une pelle, il faut prévoir pour des grands feux hypothétiques, des installations permanentes de récupération du sodium et d'injection de produit étouffant spécifiques, maintenant bien rodé, adapté pour lutter contre les feux sodium, expérimenté à très grande échelle, qui outre la limitant l'arrivée d'air, étouffe et arrête tout feu sodium débutant, ou même important comme les feux en nappe.

**En dehors des aspects réactivités chimiques, vues ci-dessus, il faut noter aussi comme élément à prendre en compte l'opacité,** qui a des répercussions sur les opérations de manutention du combustible, d'inspections et d'interventions.

Si pour les réacteurs à eau, la vision directe est possible et est à la base des opérations de manutention du combustible, d'inspections et d'interventions, l'opacité du sodium change partiellement les fondamentaux.

Le choix du sodium, sera en premier très structurant pour la manutention des combustibles (chargements/déchargements) du fait de son opacité, jointe à sa réactivité avec l'air. Alors que, pour un REP, toutes les opérations de manutention du combustible sont faites, quasiment directement à distance de quelques mètres, sous la protection vis-à-vis des rayonnements de plusieurs mètres d'eau, donc visibles, tout change avec le sodium opaque, et à isoler de tout contact à la moindre trace d'air et encore plus d'eau, ne serait-ce que la simple humidité ambiante.

Les manutentions d'assemblages (chargement de neufs ou déchargement d'usagés) se font réacteur arrêté à 180 °C. Les machines, de conceptions mécaniques simples, fonctionnent en sodium liquide (un très bon lubrifiant) ou en argon, ce qui ne pose pas au départ plus de difficultés que des mouvements en eau ou en air.

Cet état de fait, ne conduit pas à modifier fondamentalement les machines courantes, industrielles, utilisées en manutention, avec des prises par grappins mécaniques sur les têtes des assemblages, des transferts automatiques par des déplacements simples verticaux, ou rotations, parfois le suivi de rampes déjà installées.

Cette non visibilité a conduit toutefois à lancer la « visualisation » sous sodium. Il s'agit bien sûr, d'une visualisation indirecte. Cette visualisation a été prévue au départ avec l'objectif de contrôler les déplacements à distance de machines, afin de ne pas venir buter sur des obstacles, comme dans le noir, d'où l'idée des ondes ultrasons des chauves-souris. Aujourd'hui, où nous voyons des radars de recul installés de plus en plus sur nos simples voitures, il peut paraître saugrenu de se féliciter d'avoir mis ceci en place dans Phénix pour les manutentions en 1972. Mais à l'époque, c'était une première performance et on peut mesurer les progrès faits dans toutes ces technologies ultrasons, autant au niveau des capteurs/récepteurs, qu'au niveau des logiciels de dépouillement des mesures, avec tous les progrès de l'informatisation.

**L'opacité n'est donc, non plus pas un obstacle, lié aux spécificités du sodium difficile à surmonter, en comparaison de ses avantages physico chimiques, qui se retrouvent dans l'approche sureté.**

### **RNR Na, le circuit intégré**

De façon générale, un circuit se conçoit, avec des appareils spécifiques (chaudière, pompe, échangeur ...) bien séparés, reliés entre eux par des tuyauteries. Ainsi les REP sont à boucles et, pour ceux-ci, cuve, pompes et échangeurs du type générateurs de vapeur, sont reliés entre eux par des tuyauteries.

C'est lors des choix d'options faits en 1966/1967, que le concept du circuit primaire intégré a été adopté pour Phénix et ses 250 MWe, en pensant aussi au futur pour des centrales dans la gamme 1 000 MWe. Choix original, osé ? L'avenir confirmera que c'est de loin la meilleure solution aussi pour la sureté. Les Russes l'ont adopté pour BN 600, alors que BN 350 était à boucle.

Ce concept, que l'on appelle aussi du type piscine, intègre le cœur, les pompes, les échangeurs intermédiaires, et le sodium primaire, le tout installé, enfermé en totalité dans une seule et simple structure : la cuve principale, entourée d'une cuve de sécurité.

Le sodium primaire, activé à sa traversée du cœur, ou via des particules en suspension, ne sortira jamais de cette cuve.

La structure intégrée primaire est naturellement très favorable à la limitation des chocs thermiques, lors de tous les transitoires de fonctionnement. **Elle est aussi, et ceci est essentiel, très favorable à l'évacuation de la puissance résiduelle (ce résidu d'énergie encore à évacuer alors que la réaction nucléaire est déjà arrêtée), notamment en favorisant la convection naturelle, jointe à l'inertie du sodium contenu.**

## **D) La transmutation, aller plus loin ?**

Mais, en profitant des spécificités des neutrons rapides, se pose la question d'aller au-delà de la séparation du seul plutonium, et surgénération, et essayer de réduire en partie les ultimes constituants de ces déchets (essentiellement des actinides dits mineurs, Américium, Neptunium, Curium) en les transformant en déchets à vie courte.

Une fois séparés, les radioéléments à transmuter pourraient être introduits dans le combustible des réacteurs sous forme d'une cible, ou dilués d'une manière homogène dans le combustible, profitant de l'efficacité et des très hauts flux de neutrons rapides.

Ce retraitement reposerait sur de nouvelles techniques physico chimiques, qui s'avèrent plus difficiles à maîtriser, et pas sans risque pour le personnel, que celles déjà mises en œuvre pour la seule séparation du Plutonium (Procédé hydrométallurgique appelé Purex (Plutonium Uranium Refining by Extraction) de traitement des combustibles à l'usine de La Hague).

Nouveaux procédés à mettre au point. Il ressort, qu'à ce jour, seule la voie Américium soit encore regardée avec intérêt, avec comme objectif de réduire l'importance du site de stockage souterrain des déchets radioactifs (beaucoup moins de chaleur à évacuer)

Une fois séparés, le comportement en réacteur a été testé sur Phénix, sur les différents oxydes des trois actinides concernés :  $\text{AmO}_2$ ,  $\text{NpO}_2$  et  $\text{CmO}_2$ , et sur le Technétium au titre produit de fission important, avec des rendements, souvent limités.

Si, la transmutation de certains actinides mineurs, comme l'Américium et le Neptunium, a été démontrée sur le plan scientifique, il reste encore des progrès à faire, pour l'adopter à l'échelle industrielle. Par contre, la transmutation du Curium, très radioactif, difficile à manipuler, continue de poser de gros problèmes.

## E) Conclusion, en regardant dans le marc de café

Enrico Fermi, l'un des pères fondateurs du nucléaire, s'était clairement prononcé, en disant, que : « *Le pays qui sera le premier à mettre au point un réacteur surgénérateur en tirera un avantage commercial décisif pour exploiter l'énergie nucléaire* ».

Ce pays a été la France, avec le développement des RNR Na (rapides/sodium), jusqu'en 1997, marquant l'assassinat de Super Phénix ;

Cette technologie de base, avec notamment le circuit intégré, et ses avantages intrinsèques vis-à-vis de la sûreté, a été reprise, consolidée en Russie, avec les modèles BN 600 et BN 800, et des projets ambitieux pour le futur, que regardent avec soin la Chine et l'Inde, tous deux très engagés dans le nucléaire de deuxième et de troisième génération.-

Cette filière RNR Na s'avère pouvoir répondre aux mêmes critères de sûreté que les filières actuelles de référence PWR, apportant en plus la possibilité de surgénération, pas cruciale à ce jour, compte tenu du marché de l'uranium. N'ayant pas eu un développement industriel comparable à celui de ces PWR, par manque de recul, toute comparaison financière est impossible.

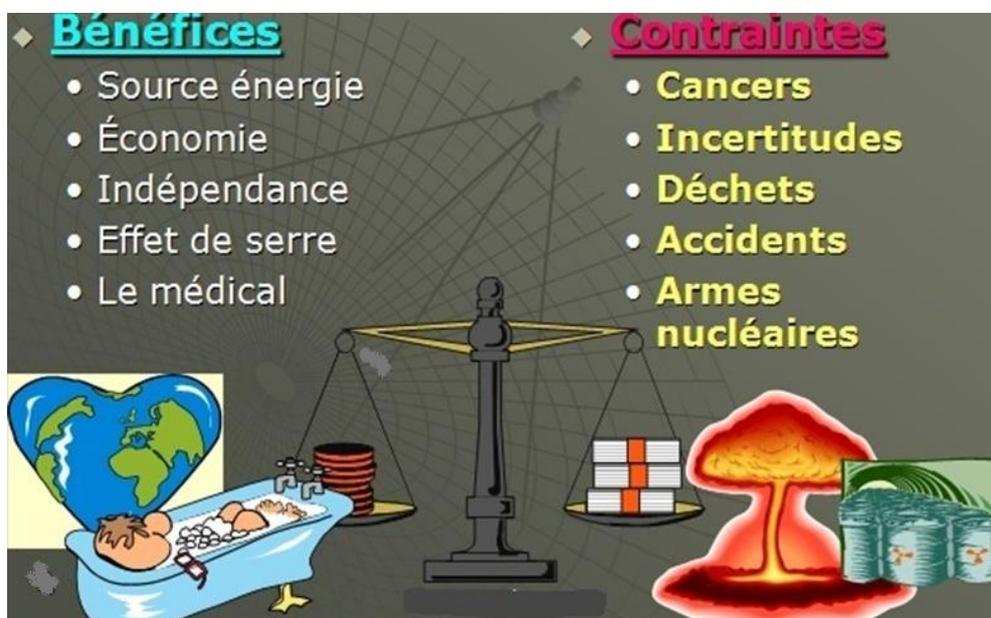
Une évidence, la présence d'un circuit supplémentaire intermédiaire, comme, les précautions spécifiques liées au sodium, pourraient amener à conclure, que le coût ne peut être que plus élevé. Mais, l'absence de pression, le meilleur rendement thermodynamique, et la différence des technologies mises en œuvre, avec les très épaisses pièces forgées des PWR et à l'opposé les structures minces des RNR, seules des études comparatives plus poussées basées sur de vraies réalisations, dans un même pays, pourraient conclure sur l'aspect économique, dans une perspective série à long terme.

La course, à la compétition financière n'est pas d'actualité, mais ceci va changer, si lors de ce siècle, le nucléaire, au niveau mondial, reposant sur les modèles actuels se développe et fait appel à un uranium rare. Cette tendance serait accentuée, si l'action vise à répondre **aux besoins croissants, du type exponentiel de l'électricité décarbonée, ce qui semble inévitable, mais pour quand : 2050, 2080, 2150 ... ?**

Alors, l'approche de la pénurie de la fourniture d'uranium naturel, peut faire balancer les données et conduire à développer **la surgénération type RNR Na**, la démonstration de la faisabilité, ayant déjà été faite, tant en France, qu'en Russie.

## Annexe L'acceptabilité du nucléaire

### Principe de précaution, la balance du pour et du contre



**Mais le pire des maux serait le manque d'énergie, et la plongée vers la décroissance, même dite heureuse...**

#### **Parmi les plus, on trouve :**

- Lutte contre l'effet de serre.

Alors que l'on compte environ 6 kg de gaz carbonique rejeté par MWh produit pour le nucléaire, soit sensiblement le même ordre de grandeur que l'hydraulique, ce chiffre atteint 1000 pour le charbon, et le gaz naturel en CCG avec encore à 430, soit presque 70 fois plus.

**Le nucléaire s'avère une base indispensable, complétée par les économies d'énergie et le développement des renouvelables thermiques, dans la lutte contre l'aggravation de l'effet de serre.**

Le nucléaire pourrait aussi intervenir, dans le cadre d'un mix énergétique, en complément à l'emploi des renouvelables électriques intermittents (solaire et éolien), mais ceci ne se

traduirait que par une faible baisse de la puissance installée, car ce mix dégraderait le rendement du nucléaire

### L'indépendance énergétique

Le nucléaire permet à la France de produire son électricité par ses propres moyens, en toute indépendance par rapport aux marchés extérieurs.

Il est vrai que l'uranium est importé, mais la matière première ne représente qu'environ 3 % du coût du kilowattheure produit. L'essentiel des dépenses soit 97 % reste national, ce qui est loin d'être le cas pour, par exemple, le gaz pour lequel plus de 80 % de l'argent va à l'étranger.

Mais, en plus sur la base des seuls stocks d'uranium naturel présents en France, en attente ou dans le cycle de production, nous disposons d'une disponibilité avec nos besoins actuels de 6 ans, sans importation.

**Ce facteur indépendance énergétique sera multiplié, renforcé avec la surgénération, en fait indépendance totale pour des milliers de siècle !**

### - Les coûts modérés, garantis stables de l'électricité

En comparaison à d'autres sources d'énergie, le nucléaire nécessite des investissements initiaux très importants, mais bénéficie d'un coût d'exploitation très faible pour le combustible. Ainsi, si sa structure économique est proche de celle de l'hydraulique, elle est à l'opposé de celle du gaz, le charbon se situant de ce point de vue entre nucléaire/hydraulique et gaz.

Le coût du nucléaire fait l'objet de nombreuses controverses et évaluations. Il faut rappeler le rapport de la Cour des Comptes (Rapport 2013/2014) pour le parc actuel EDF en service, qui donne un coût économique de 59,8 €/MWh, avec la méthode dite « CCE » (coût courant économique).

Même s'il devait un peu augmenter, dans le futur, avec la suite des EPR, **le nucléaire reste la source d'électricité la moins chère en France, pour une électricité, adaptable aux besoins, rien, à voir avec celle produite par les renouvelables intermittents et aléatoires.**

Ces derniers donnent une production hachée, dépendante de la nature, souvent là quand on n'en a pas besoin, mais à l'inverse absente, lorsque les besoins sont vitaux. Et en plus ils sont subventionnés à ce jour.

### **Parmi les moins, exprimés sous forme de réserves sociétales.**

#### - La peur de la radioactivité des rayonnements

Il faut en premier rappeler la citation, très ancienne, mais de plus en plus d'actualité : « *Toutes les choses sont poison, et rien n'est sans poison, seule la dose fait, qu'une chose n'est pas un poison* ». *Paracelse (XV<sup>e</sup> siècle)*

Avant d'évoquer les risques associés aux rayonnements, il faut se référer aux doses naturelles, que nous subissons apparemment sans conséquence sur nos santé. Pour ce, il faut oublier le Becquerel, qui avec des chiffres pharaoniques, fait si aisément peur, et se baser sur le Sievert Sv (et plus couramment sur son millième le mSv), seule unité quantifiée, accessible, qui traduit l'impact éventuel d'un rayonnement sur l'homme.

En France les rayonnements naturels annuels correspondent à des doses moyennes de 2,4 mSv, avec de fortes variations géographiques, pouvant en de vastes régions atteindre 5 mSv, et en quelques lieux spécifiques 25 mSv. Et on trouve beaucoup plus dans des régions du Monde, plus peuplées, avec des gens tous en bonne santé.

Si des fortes doses sont néfastes, voire mortelles (au-delà de quelques Sievert), il peut être considéré que, ce qui est désignée par « petites doses » avec une limite à 100 mSv pour les adultes et 50 mSv pour les enfants, sont sans conséquence pour la santé.

**Aucune étude, ni épidémiologique sur l'homme, ni sur les animaux, n'a jamais pu montrer de relation de cause à effet entre les faibles doses et l'apparition de cancers.**

Que les marchands de peur cessent de se prononcer pour des doses ridicules, autour du mSv.

#### - La peur des accidents

Pour se baser sur la réalité, il faut évoquer la centrale de Three Miles Island, en 1979, celle de Tchernobyl en 1986, et enfin Fukushima en 2011, trois accidents majeurs, ayant marqué l'histoire du nucléaire.

Ces trois accidents ont conduit à des conséquences sur la santé, très diverses et controversées. Si le bilan s'écrit de façon sûre, sans contestation, par zéro conséquence santé pour le premier, qui représente le type de réacteur construit en France, il monte à de très nombreux morts pour le second, avec des évaluations diverses, allant d'un peu moins de cent à plusieurs milliers<sup>8</sup>, sans évoquer les 10 millions de morts avancés par Greenpeace et répétées régulièrement par la chaîne de télévision franco-allemande, Arte, non neutre sur sa propagande anti-nucléaire. Mais à force d'asséner des contre-vérités, certaines finissent par marquer !

Quant au dernier accident au Japon, on peut avoir lu, ou entendu sur France 2, au journal télévisé, « *Fukushima 20 000 morts* », ou, à la une des journaux, comme le Figaro un titre « *Fukushima au moins 10 000 morts* ». Ces chiffres répétés par tous les médias, et les marchands de peur, ne peuvent que marquer les esprits. Or, à ce jour, les évaluations seraient proches de zéro décès, ou maladie liée aux rayonnements, peut être un, à venir.

Mais il faudra surtout tenir compte conséquences indirectes sur leurs santé, des milliers de personnes déplacées, comme il est de même des autres déplacés au Japon, sans lien avec la centrale, liés au seul tsunami, qui ne s'est pas limité à la zone de Fukushima, zone où du fait du nucléaire, on pourrait afficher zéro mort ?

Quelles que soient les controverses autour de ces chiffres, **nous pouvons affirmer qu'au niveau mondial l'électronucléaire a fait moins de morts en 50 années d'exploitation que les autres grandes sources de production d'électricité n'en font en une seule année.**

#### - Les déchets

L'affirmation que « l'on ne sait pas quoi faire des déchets » et qu'ils constitueraient une menace pour la santé des générations futures est fautive, et clairement démentie par la pratique industrielle française sur plusieurs dizaines d'années.

---

<sup>8</sup> En face sont présentés des chiffres documentés, comme le rapport établi par l'UNSCEAR qui dans son dernier rapport 2011, annonce entre environ 100 morts recensés, et au maximum 4000 cancers mortels, potentiels à venir dans les 75 ans suivant l'accident, sur la base de la loi RLSS (loi linéaire sans seuil), enveloppe pessimiste.

Il faut préciser, que ce rapport a été validé par 8 institutions indépendantes de l'ONU, dont l'OMS, et surtout, car directement concernés, par les gouvernements de Russie d'Ukraine et de Belarus. C'est beaucoup, inacceptable, mais ceci se réfère à un modèle de réacteur (RBMK) que nous n'aurions jamais construit en Europe, et qui à ce jour ne reste en opération qu'en Russie. Ceux en Ukraine, ont été définitivement arrêtés, le pays très dépendant du charbon, ses morts, sa pollution se prépare à relancer le nucléaire, sur la base de réacteurs à eau pressurisée.

En effet, c'est tout à l'honneur de l'industrie nucléaire que, pour la première fois dans l'histoire industrielle, on se soit préoccupé de gérer les déchets produits, dès l'origine, et on l'a fait consciencieusement.

La quantité totale de tous les déchets nucléaires est relativement faible. Ils représentent environ 1 kilo par habitant et par an, dont 10 grammes à vies longues et très radioactifs, contre 4 000 kg pour les autres déchets, dont 100 kilos de matières toxiques, dangereuses (mercure, plomb, arsenic...)

En France, tous les déchets nucléaires sont conditionnés, entreposés et stockés selon des techniques éprouvées et sûres. **Leur gestion assurée par l'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs) n'entraîne aucune nuisance significative pour les personnes ou l'environnement.**

Plus de 90 % des déchets nucléaires sont à vie courte, et sont stockés dans trois centres (La Manche, Soullaines, Morvilliers) sans dommage significatif pour l'environnement, occupant des surfaces très réduites.

Les déchets à vie longue et de haute activité sont incorporés, dès l'usine de retraitement, dans une matrice de verre qui piège les radioéléments. Cette méthode est mise en œuvre depuis 40 ans, sans qu'il en résulte une quelconque nuisance. Que trouver de plus stable que le verre, en sachant que les déchets ne sont pas, mis en bouteille, mais chimiquement intégrés à vie dans la matrice.

Si cet entreposage dans des puits bétonnés est gérable, car les volumes sont très réduits, il n'est pas considéré comme durable à l'échelle de plusieurs générations. Il n'y a jamais eu urgence à retenir une solution définitive, on pouvait atteindre plusieurs dizaines d'années avant de statuer. C'est cette attente qui a donné à tort l'impression, qu'on ne sait quoi faire.

Mais désormais, en optimisant les différentes possibilités, la solution de gestion retenue est le stockage géologique profond Cigeo (Centre industriel de stockage géologique). Cette solution de stockage définitif en couche géologique profonde, toutes études faites, a été décidée avec un centre devant entrer en service en 2025.

En synthèse, après avoir évoqué, les pour et les contres, comme l'aspect santé reste prépondérant, face à tous ces arguments, pour certains contradictoires, rien de plus sage, que de se baser, sur l'avis de l'Académie Française de Médecine, qui « considérant les bilans, tant mondiaux, qu'europeens », s'est prononcée clairement, lors du débat national sur la transition énergétique, établissant, que « de tous les grands moyens de production d'électricité, c'est :

**« Le nucléaire qui a le plus faible impact sur la santé par kilowattheure produit ».**

**Une vision claire, simple, conduisant à poursuivre sur cette voie du nucléaire, mais après avoir posé la question de la durabilité, ajouter, qu'il faut reprendre le chemin tracé par nos anciens, de développer la filière RNR Na.**