

# Le nucléaire dans le futur et la transition énergétique/ complémentarité

*Christophe Behar est entré en 1984 au CEA<sup>1</sup> pour travailler dans le nucléaire civil puis dans le nucléaire militaire. En parallèle, il était chargé d'enseignement à l'École centrale de Paris ainsi qu'à l'École nationale supérieure des techniques avancées, et ses enseignements ont porté principalement sur le cycle du combustible. En 2009, il a été nommé directeur de l'Énergie Nucléaire au CEA, fonction qu'il a occupée jusqu'en 2016. Il a ensuite rejoint le groupe industriel Fayat<sup>2</sup> comme directeur de l'énergie. Christophe Behar est aussi président de la supply chain<sup>3</sup> nucléaire française au sein du GIFEN<sup>4</sup> (Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire).*

Ce chapitre est consacré au lien entre le nucléaire et la transition énergétique, et à sa complémentarité avec les énergies renouvelables. Plus précisément, il sera question de l'avenir du nucléaire, des études en cours ou envisagées pour l'adapter au

développement des renouvelables, et enfin, des réacteurs nucléaires du futur, avec un accent sur le rôle, majeur, de la chimie. Il ne s'agira pas seulement ici de montrer pourquoi le nucléaire est utile, mais aussi pourquoi nous aurons du nucléaire demain, après-demain et encore après-demain.

Le présent chapitre concerne exclusivement le nucléaire « de fission », comme celui des réacteurs actuellement en service. Le chapitre de B. Bigot de cet ouvrage considèrera

1. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives : [www.cea.fr/](http://www.cea.fr/)

2. <https://fayat.com/fr/>

3. Supply chain : chaîne d'approvisionnement.

4. Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire.

le nucléaire « de fusion » qui fait l'objet du programme de recherche ITER.

## 1 Le nucléaire est un candidat légitime pour être une énergie majeure dans les futures décennies

Cette assertion est souvent combattue dans l'opinion publique. Pourtant, il est constaté que la production d'électricité nucléaire, comparée aux autres sources d'énergie, y compris le solaire, est, sur tout le cycle de vie du moyen de production – de la construction à l'arrêt –, très peu émettrice de CO<sub>2</sub> par kilowatt heure (KWh) produit ; il se situe parmi les meilleures des sources d'énergie selon ce critère. Autre précision : l'uranium n'est pas une « ressource rare », comme on l'entend parfois. De plus, certaines technologies de réacteurs en limitent considérablement les consommations.

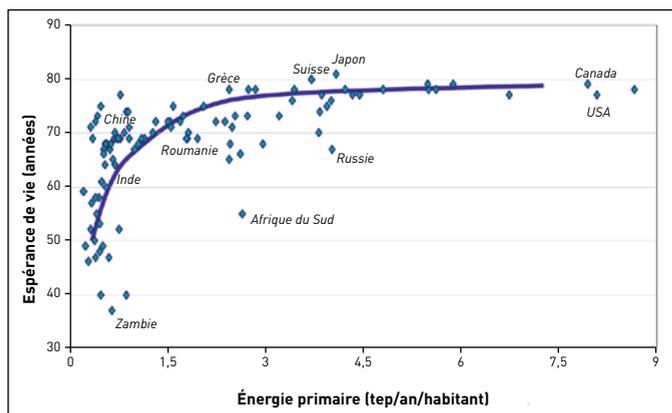


Figure 1

La consommation d'énergie influence l'espérance de vie.

### 1.1. La population mondiale va croître et chacun souhaite avoir accès à un meilleur niveau de vie

L'accès à l'énergie est directement lié au développement social et économique des populations. À l'inverse, l'absence d'énergie, d'électricité, interdit ou handicape la fourniture d'eau potable, l'accès aux soins, à l'instruction, la capacité de manger tous les jours à sa faim, etc. La *Figure 1* montre en effet la dépendance de l'espérance de vie des habitants en fonction de la consommation d'énergie primaire en tonnes d'équivalent pétrole (TEP) par an et par habitant. On observe qu'au-delà d'un certain seuil, l'espérance de vie est pratiquement constante, mais qu'au-dessous, elle chute brutalement.

Un facteur clé en matière de transition énergétique, et plus précisément de besoins mondiaux en énergie, est l'évolution de la population mondiale. La *Figure 2* montre deux scénarios de croissance de la population : la courbe rouge et la courbe verte. Ils correspondent à des projections pour 2050, respectivement de 11 ou de 8 milliards d'habitants. Quoiqu'il en soit, ils impliquent de forts accroissements des besoins énergétiques, tels qu'illustrés sur la *Figure 3*.

La demande totale en énergie est tirée par la croissance de la population d'une part, et le souhait de vivre mieux d'autre part.

Si on considère la prévision d'évolution du mix énergétique<sup>5</sup> (*Figure 4*) sur les trente ans qui

5. Mix énergétique : répartition de l'énergie produite selon la source de production.

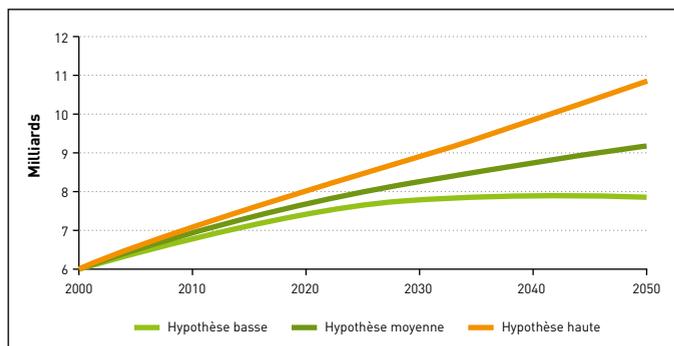


Figure 2

Prévision de l'évolution de la population mondiale d'après les Nations Unies.

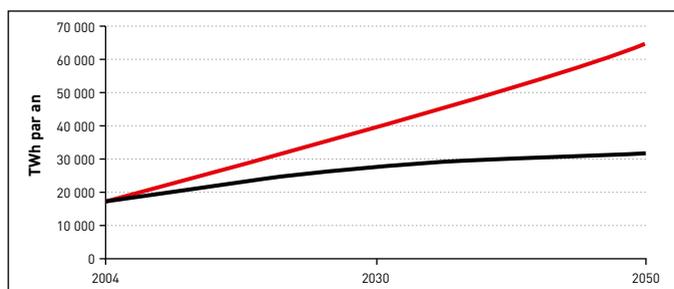


Figure 3

Projection de la demande en énergie primaire.

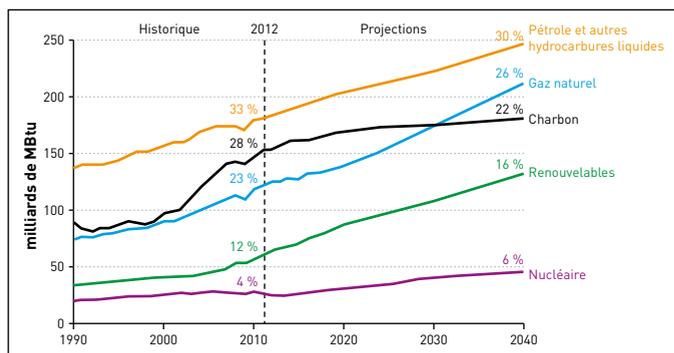


Figure 4

Prévision faite sur la répartition d'énergie dans le monde selon la source de production d'ici 2040.

Source : EIA.

viennent, on se rend compte que toutes les sources de production d'énergie électrique vont davantage être sollicitées, mais en premier lieu les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon). Malheureusement, cela va conduire à émettre plus de  $\text{CO}_2$ . Les énergies renouvelables vont croître de façon sensible, mais le nucléaire ne devrait connaître qu'une croissance extrêmement lente et limitée aux pays les plus développés pour des raisons évidentes.

### 1.2. Le nucléaire est un bon outil pour combattre le changement climatique car peu émetteur de $\text{CO}_2$

La **Figure 5** compare les émissions de gaz à effet de serre par les différentes sources d'énergie. Elle est un peu ancienne, mais au-delà des valeurs numériques, permet des comparaisons toujours valables. Bien entendu, les chiffres considèrent l'ensemble du cycle de vie des sources d'énergie. Ainsi, on prend en compte le fait que,

pour construire un barrage on a besoin de fabriquer du ciment, que ce ciment doit être mélangé à du sable pour faire du béton, que ce béton doit être transféré au point d'utilisation où l'on construit le barrage ou le réacteur, que l'on va faire fonctionner ce barrage ou ce réacteur, puis qu'en fin de vie il faudra arrêter le fonctionnement de l'installation et la démanteler.

Sur l'ensemble du cycle de vie caractérisant la production d'énergie, on voit que l'hydraulique est le meilleur, mais son développement dépend des cours d'eau à disposition dans le pays. On voit aussi que le nucléaire est très bien placé. Quant aux énergies renouvelables, la situation présente des ambiguïtés : ainsi, pour prendre l'exemple du photovoltaïque, il faut tenir compte du fait que l'essentiel des panneaux photovoltaïques est fabriqué en Chine et utilise du charbon dans le procédés industriels de fabrication. Mais cette situation devrait évoluer dans l'avenir.

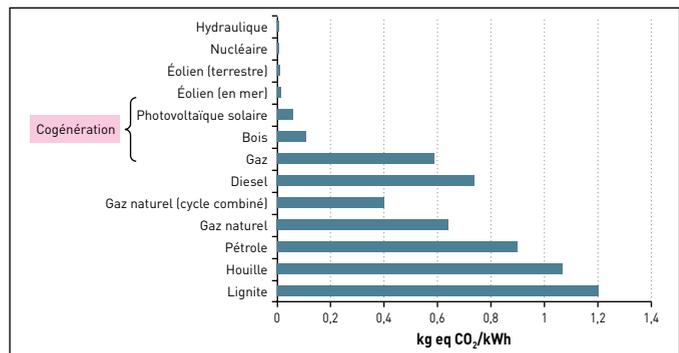


Figure 5

Émissions de gaz à effet de serre de certaines filières énergétiques.

En résumé, la stricte contrainte environnementale liée à la quantité de CO<sub>2</sub> créé par KWh produite place clairement le nucléaire dans les meilleurs systèmes producteurs d'électricité.

À ce stade, une observation qui tient non pas directement à la production mais à l'utilisation de l'énergie doit être faite : on envisage de substituer de plus en plus fortement l'énergie électrique à l'utilisation du pétrole (Figure 6). C'est particulièrement clair en matière de transport : on est poussé à acheter des véhicules électriques ou hybrides au lieu de véhicules essence ou diesel. Tout cela fait que la consommation d'énergie d'origine électrique va aller très clairement en croissant et qu'il va falloir pouvoir suivre et produire cette énergie électrique. Certes, les économies d'énergie sont quelque chose d'important mais liées au fait qu'on a de plus en plus besoin d'électricité en particulier pour les transports,

grand pourvoyeur de CO<sub>2</sub>, et nos besoins resteront probablement importants.

### 1.3. Les ressources en uranium peuvent devenir « illimitées », selon la technologie de réacteur retenue dans le futur et nous avons déjà ces ressources sur notre territoire

Un troisième point pour préciser la place du nucléaire dans la transition énergétique est celui des ressources en uranium. Certes, a priori, et à l'instar des ressources fossiles, elles vont aller en s'amenuisant (Figure 7). L'uranium, cependant, a un caractère très particulier intrinsèque à sa radioactivité. En effet, les techniques des réacteurs, non plus à « eau légère » comme les réacteurs actuels, mais des « réacteurs rapides », permettent de prolonger considérablement la durée de vie effective du combustible, qui pourrait atteindre quelques milliers d'années, comme on le verra plus loin.

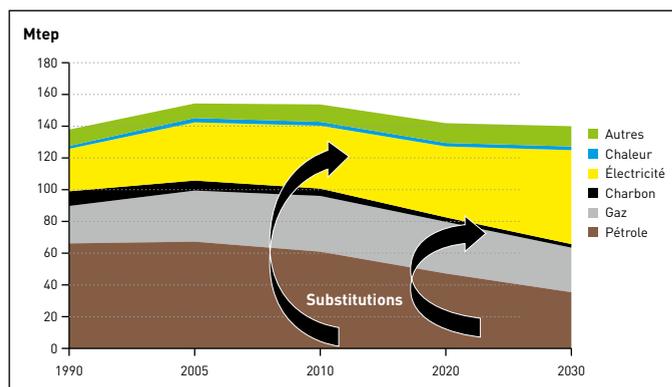


Figure 6

Analyse de l'évolution de la consommation d'énergie au profit de l'électricité.

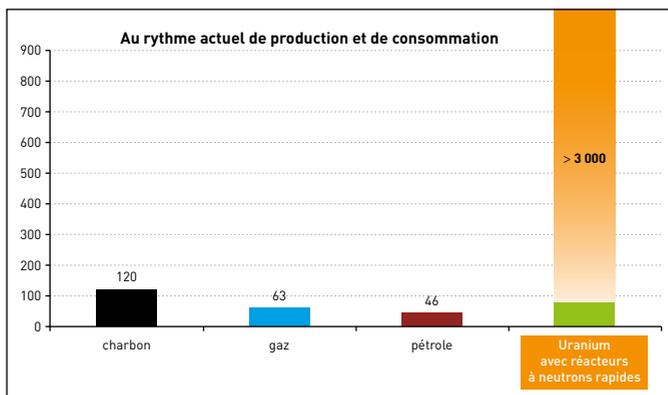


Figure 7

Durée de vie des ressources énergétiques en années.

Source : BP Statistical Review of World Energy, 2010. Livre rouge.

## 2 Adaptation des réacteurs nucléaires aux renouvelables

Les futurs contextes de production d'électricité, qui feront intervenir la production par « énergies renouvelables » et par réacteurs nucléaires, font apparaître de nouvelles contraintes sur ces derniers. Le premier point est lié à la fluctuation temporelle de la puissance électrique délivrée par les renouvelables : les réacteurs nucléaires doivent ainsi être capables de faire varier rapidement la puissance électrique qu'ils délivrent – par exemple de 80 % à la hausse ou à la baisse en une trentaine de minutes, performance à vrai dire déjà à la portée des réacteurs nucléaires du parc d'EDF d'aujourd'hui.

Un deuxième objectif est de rendre les réacteurs adaptés à la production de l'hydrogène, dont l'utilisation comme source d'énergie dans les transports de demain se profile comme majeure. La

production d'hydrogène se fera par dissociation de la molécule d'eau en apportant de l'énergie soit sous forme d'électricité soit directement de chaleur, deux procédés qui solliciteront les réacteurs nucléaires.

Pour coupler renouvelables et nucléaire avec ces objectifs principaux, il est nécessaire de poursuivre des développements de combustibles adaptés à des cyclages thermiques. Ces variations rapides et intenses de puissance cyclent thermiquement les crayons de combustible et peuvent induire des comportements thermomécaniques non désirés. Il faut aussi examiner l'impact de ce cyclage sur l'ensemble du réacteur, la cuve, mais aussi les générateurs de vapeur.

## 3 Quel réacteur au-delà de l'EPR ?

En présentant les « réacteurs du futur », il y a lieu de présenter « les différentes générations » du concept, résumées

sur la **Figure 8**, correspondant au cas français. Depuis 1950, nous sommes passés de la génération 1 des premiers réacteurs refroidis au gaz à la génération 2, puis à la génération 3 actuelle qui est un réacteur à eau pressurisée (REP) et à la préparation de la génération 4. Au-delà de la période actuelle, le diagramme fait figurer des points d'interrogation qui correspondent au déploiement de nouveaux réacteurs à neutrons rapides (RNR) probablement à la fin de ce siècle, ce que prévoit d'ailleurs le contrat de la filière nucléaire passé avec l'État.

### 3.1. Les différentes générations de réacteurs

Comment progresse-t-on d'une génération de réacteurs à une autre ? C'est en intégrant le retour d'expérience de la génération précédente. C'est

ainsi que les réacteurs dits de 3<sup>e</sup> génération intègrent des problématiques accidentelles comme Tchernobyl, Three Miles Island, Fukushima, comme les attentats du 11 septembre aux États-Unis... On améliore ainsi à chaque fois la sûreté de ces réacteurs, une demande permanente chez les utilisateurs finaux.

La génération 1 était celle des réacteurs dits « uranium naturel-graphite-gaz », qui ne nécessitent aucun enrichissement d'uranium<sup>6</sup>, une opération dont la maîtrise industrielle n'était pas assurée à l'époque. Sa maîtrise a permis le passage à la génération 2, dont trois types sont mentionnés sur la **Figure 8** : les REP 900, les 1300, ainsi que les N4.

6. Enrichissement d'uranium : procédé ayant pour but d'augmenter la proportion d'uranium 235 dans un uranium naturel.

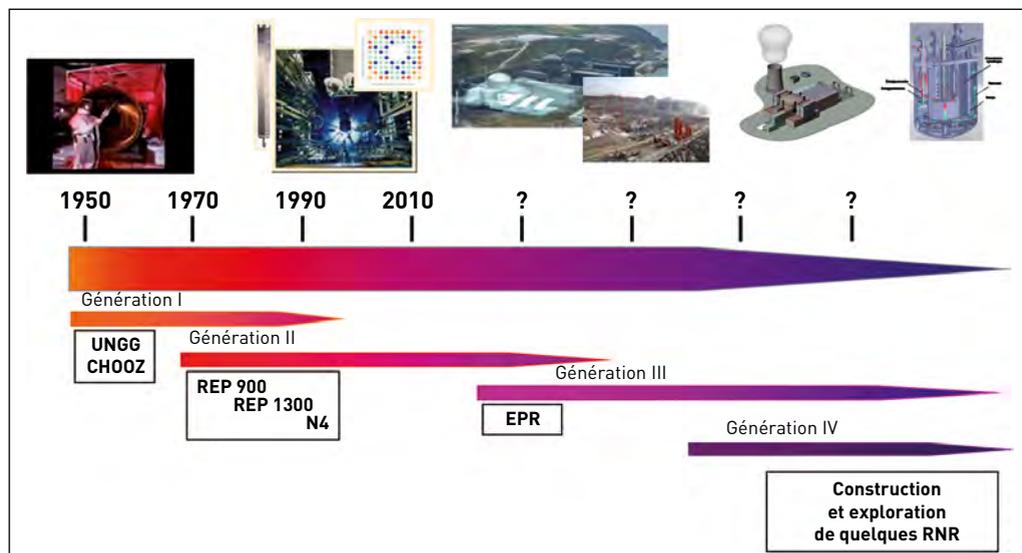


Figure 8

Les générations de réacteurs depuis 1950.

La génération 3 est celle des EPR actuellement encore en construction en France (site de Flamanville) mais déjà opérationnels en Chine sur Taishan 1 et 2 et en construction au Royaume-Uni et en Finlande.

### 3.2. Quels avantages à développer la génération 4 ?

Il y a potentiellement trois raisons pour développer des réacteurs à neutrons rapides. Une première raison est d'assurer plus complètement le recyclage total des matières, un objectif que l'industrie électronucléaire réalise avec succès depuis longtemps, tout simplement pour des raisons d'économie de matière. Une deuxième raison tient à la problématique de la préservation de la ressource en uranium, et une troisième est l'aide que ce type de réacteur peut apporter à la gestion des déchets nucléaires à vie longue, participant ainsi à « l'appropriation du nucléaire » par la population.

#### 3.2.1. Premier avantage : le recyclage des matières

Pour comprendre le recyclage des matières nucléaires<sup>7</sup>, il faut comprendre le schéma de la **Figure 9**. Le fonctionnement d'un réacteur, est associé à un « cycle du combustible ». En France on utilise un « cycle fermé » parce qu'on traite les combustibles usés pour en extraire la matière nucléaire encore valorisable, toujours dans l'esprit de recyclage et de préservation de la ressource. La première tâche du cycle est d'extraire l'uranium naturel des mines ; la France, au travers d'Orano, exploite des mines d'uranium dans différents pays. On doit ensuite concentrer cet uranium et le convertir dans un produit appelé « yellow cake » ; enfin,

7. Voir dans *L'Actualité Chimique* n° 345-346 les dossiers « Le cycle du combustible nucléaire », par Paul Rigny, et « Les déchets nucléaires et leur gestion », par Paul Rigny, Bernard Bonin et Jean-Marie Gras.

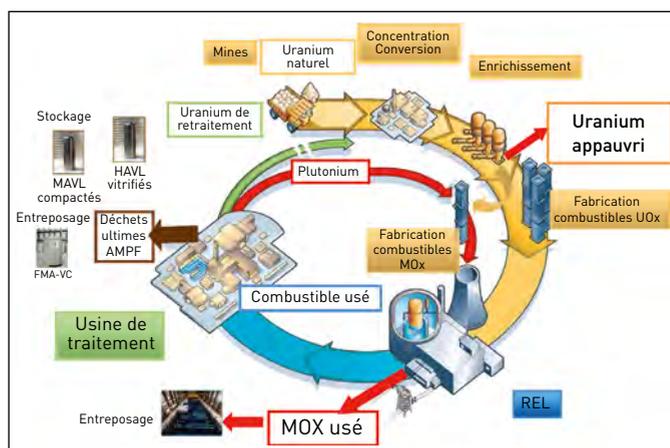


Figure 9

Cycle du combustible pour un réacteur à eau légère.

on enrichit isotopiquement l'uranium.

Des précisions sur cette opération d'enrichissement : l'uranium naturel contient très peu d'isotopes<sup>8</sup> d'uranium 235 fissile aisément dans un réacteur de génération actuelle (0,72 %). Tout le reste est principalement de l'uranium 238. Le fonctionnement des réacteurs repose sur la réaction de fission de l'isotope 235. On doit donc enrichir l'uranium naturel en cet isotope 235 jusqu'à une teneur de 3,5 à 4,5 %. Cette opération crée en même temps un flux d'uranium appauvri (Figure 10).

Aujourd'hui en France, on a un stock d'uranium appauvri extrêmement important lié aux opérations de l'usine d'enrichissement de Pierrelatte dans la vallée du Rhône. Pour les réacteurs à neutrons rapides, ce stock d'uranium appauvri constitue naturellement, à terme, une « mine d'uranium » utilisable pour fabriquer du combustible pour ce type de réacteur. Une fois qu'on a enrichi notre uranium pour les réacteurs à eau légère de type UOx, on rentre ce combustible dans le cœur de réacteur et on le brûle pour produire de l'électricité.

En France, on a pris la décision voilà plusieurs dizaines d'années de recycler ce combustible usé parce qu'il contient beaucoup de matières valorisables, en particulier de l'uranium dit « uranium de retraitement » et du plutonium. Ce combustible usé est retraité

dans l'usine de La Hague dans le Cotentin. Trois flux sortent de cette usine :

- premier flux : l'uranium de retraitement (la flèche verte sur la figure) qui quitte l'usine de La Hague ;

- deuxième flux : du plutonium, qui est bien entendu une matière énergétique valorisable ;

- troisième flux : ce sont les déchets dits ultimes, en particulier les déchets nucléaires dits de haute activité à vie longue (HAVL). Ce sont d'ailleurs principalement sur ces déchets-là, et non sur la totalité des déchets nucléaires créés, que portent les débats.

Les flux d'uranium de traitement et de plutonium sont réutilisés dans la fabrication d'un combustible que l'on appelle oxyde mixte (MOx), utilisable dans les réacteurs à eau légère français avec l'oxyde d'uranium (UOx). En sortie de réacteur, après quelques années de fonctionnement, on a du MOx dit « usé », qui est aujourd'hui entreposé en vue

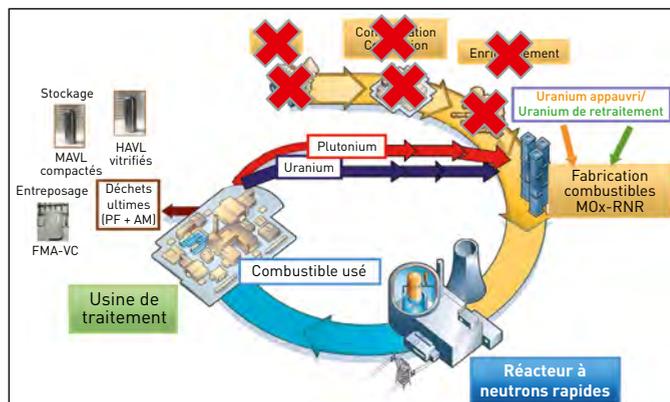


Figure 10

Cycle du combustible pour un réacteur à neutrons rapides.

8. Isotopes : atomes ayant le même numéro atomique mais une des masses atomiques différentes (nombre de nucléons différents).

d'une future utilisation dans les réacteurs à eau légère (en cours d'étude) et en tout cas dans les réacteurs à neutrons rapides (voir ci-dessous).

La diversité des matières rendues disponibles par le cycle du combustible est une source considérable de souplesse dans le choix des types de réacteurs. Si on change de type de réacteur, on change de cycle du combustible, on change de technologie. Si on quitte les réacteurs à eau légère pour des réacteurs à neutrons rapides, on simplifie le cycle du combustible et on n'a plus besoin de toutes les opérations amont du cycle hors celles qui servent à fabriquer le combustible. On peut utiliser l'uranium appauvri aujourd'hui entreposé près des usines d'enrichissement de la vallée du Rhône. Avec un mélange plutonium/uranium/uranium de retraitement/uranium appauvri, on fabrique un nouveau type de combustible appelé MOx RNR. C'est un MOx avec des teneurs en plutonium plus importantes que celles

des réacteurs à eau légère, et on peut recycler ces matières un très grand nombre de fois.

### 3.2.2. Deuxième enjeu : la préservation de la ressource en uranium

La **Figure 11** montre une application numérique rapide pour comprendre qu'avec les réacteurs à neutrons rapides on préserve la ressource en uranium.

Dans un réacteur à eau légère, on utilise 200 tonnes d'uranium naturel (contenant approximativement 2 tonnes d'U235 et 198 tonnes d'U238), que l'on transforme en 40 tonnes d'uranium enrichi à 5 % (contenant approximativement 2 tonnes d'U235 et 38 tonnes d'U238) pour produire un giga watt électrique.

Dans un réacteur à neutrons rapides, il suffit d'un mélange de 8 tonnes d'uranium appauvri ou d'uranium de retraitement – sans aucun uranium naturel – et de l'ordre de 1 à 2 tonnes de plutonium pour fabriquer 9 tonnes de combustible MOx

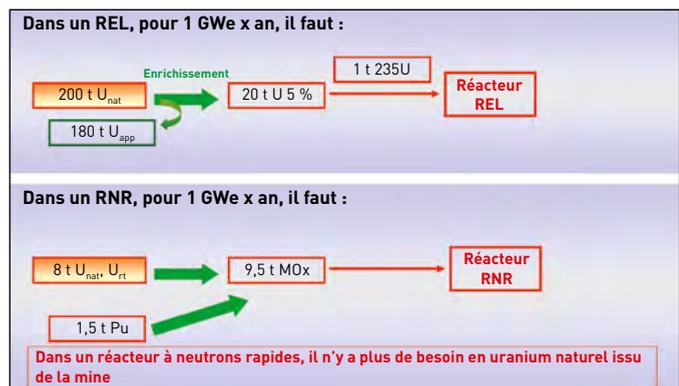


Figure 11

Consommation de la ressource en uranium en chiffres.

RNR et produire un GWatt électrique.

On peut voir aussi sur la **Figure 12** qu'en fonction des scénarios d'utilisation d'uranium dans des parcs nucléaires mondiaux, on peut atteindre l'absence d'alimentation en uranium naturel aux alentours de l'année 2100.

### 3.2.3. Troisième point : appropriation du nucléaire par l'opinion publique

Il s'agit en fait de la problématique des actinides<sup>9</sup> mineurs qui s'explique avec le schéma de la **Figure 13** où l'on voit comment la radioactivité intrinsèque des déchets, c'est-à-dire « l'impact radioactif » sur la biosphère du déchet nucléaire, décroît avec le temps.

La courbe horizontale (en rouge) est la radiotoxicité intrinsèque<sup>10</sup> d'une mine d'uranium telle qu'on la trouve dans la nature. Les trois autres courbes décrivent l'évolution de cette radiotoxicité potentielle en fonction du temps selon trois cas de figure :

- en bleu foncé est représentée l'évolution de la radiotoxicité du combustible utilisé en l'absence de tout traitement. On voit une décroissance extrêmement lente pour rejoindre au bout de 250 000 ans la radiotoxicité de la mine d'uranium ;
- la courbe médiane correspond à la situation actuelle où l'on traite le combustible à La Hague et on en extrait le

9. Actinide : famille d'atomes de numéros 89 à 103.

10. Radiotoxicité intrinsèque : toxicité suite à des réactions nucléaires qui émettent des rayonnements.

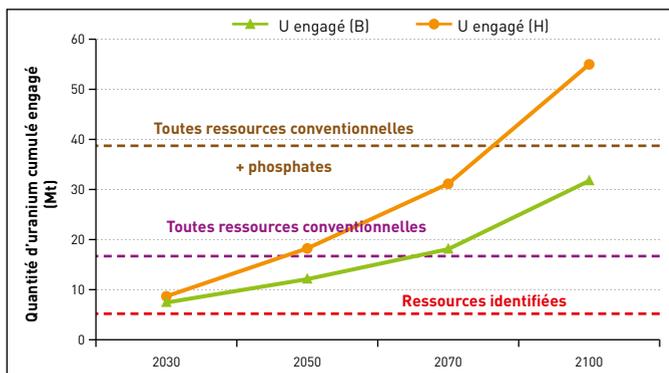


Figure 12

Utilisation des ressources en Uranium avec REP seuls pour deux scénarios (haut et bas).

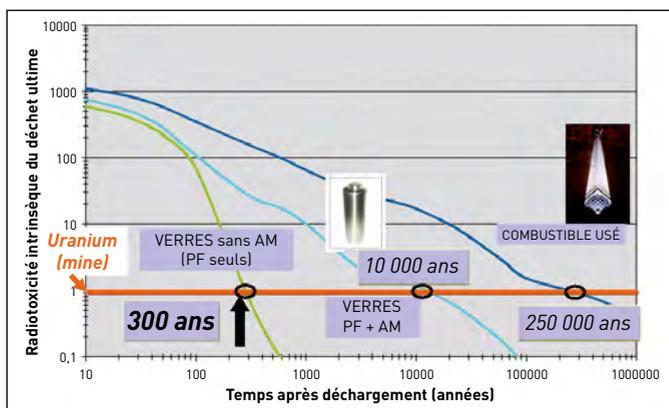


Figure 13

Diminuer la radiotoxicité à long terme et la charge thermique des déchets ultimes.

plutonium. La décroissance de la radiotoxicité du combustible fait rejoindre celle de la mine d'uranium au bout de 10 000 ans ;

- la radiotoxicité de ce combustible est essentiellement portée sur les temps longs par ce qu'on appelle les actinides mineurs américium, neptunium, curium. Si l'on extrait ces trois composants (par exemple par complexation par

des molécules extractantes), la radiotoxicité intrinsèque de ces déchets chute beaucoup plus vite. En 300 ans on peut rejoindre la radiotoxicité de la mine (courbe verte).

Cette dernière situation serait plus facilement acceptée du grand public. Cela étant, une fois que sont extraits ces

trois actinides mineurs, très radioactifs, se pose la question de savoir comment les gérer. La solution consisterait à utiliser les réacteurs à neutrons rapides qui, contrairement aux réacteurs à eau légère, sont aptes à brûler ces actinides. C'est le troisième intérêt des RNR.

## La chimie pour l'avenir du nucléaire

Nous mentionnions plus haut que la chimie était partout dans l'industrie nucléaire. Elle est clairement partout dans le cycle du combustible, très fortement sollicitée par les procédés existants, que ce soit en amont ou en aval du cycle, mais aussi dans les réacteurs par exemple pour le développement de matériaux. Elle l'est aussi dans les laboratoires, ainsi que l'illustre l'allusion aux « molécules extractantes » pour la gestion des déchets.

Pour être un peu provocateur, on pourrait dire que ce que fait le nucléaire c'est de la chimie verte, cette chimie théorisée dans la décennie 1990-2000 avec des objectifs de préservation de la matière première (ce que fait le nucléaire en particulier avec les opérations de retraitement), de privilégier des procédés peu consommateurs d'énergie, de limiter l'impact sur l'environnement et la santé des travailleurs. Tout est en place pour assurer la pérennité de l'industrie nucléaire qui, en France, représente 220 000 emplois et un taux d'embauche très important dans le domaine de la chimie, certes, que ce soit pour l'industrie ou pour la recherche.