

# Les réacteurs rapides, clés d'une énergie nucléaire durable

■ **Joël GUIDEZ**, CEA/DEN DIR

Les critères définissant une énergie durable, sont essentiellement le non épuisement des ressources, la minimisation de la pollution durant le fonctionnement et la bonne gestion des déchets pour le futur. Une application de ces critères est effectuée, à titre d'exemple, pour différents types d'énergie : fossiles, éolien, photovoltaïque, biomasse. Cette application est ensuite effectuée pour le nucléaire et montre clairement l'intérêt d'associer des réacteurs rapides au parc des réacteurs à eau, si le nucléaire veut encore mieux répondre à long terme à tous ces critères de durabilité.

## 1. Qu'est-ce qu'une énergie durable ?

Les questionnements initiaux sur les notions d'énergie durable se sont posés dans les termes "Quelle planète laissons-nous à nos enfants et aux générations futures ?"

Le premier critère est alors l'épuisement de la ressource. Pouvons-nous épuiser une ressource actuellement disponible, sans garantir une possibilité de remplacement dans le futur ?

Le deuxième critère est la pollution en fonctionnement, car cette pollution est aussi léguée aux générations suivantes. Si elle ne peut jamais être nulle, elle doit être réduite au maximum, pour avoir des effets aussi négligeables que possible.

Le troisième critère est la gestion des déchets finaux. Là aussi ces déchets doivent être minimisés et leur traçabilité ainsi que leur gestion organisées. Le but étant que ces déchets ne puissent pas apporter de nuisances aux futures générations.

C'est sur la base de ces trois critères que nous allons développer notre analyse.

## 2. Application des trois critères aux énergies fossiles

Il a fallu quelques milliers à quelques millions d'années pour créer nos énergies fossiles connues : charbon, gaz, pétrole, lignite et maintenant gaz de schiste. Au rythme actuel de consommation, la raréfaction et le renchérissement de ces produits est inévitable dans des délais assez courts de l'ordre du siècle.

Pour la pollution en fonctionnement, la liste en est trop longue : marées noires, coups de grisou, pollution des nappes phréatiques, dévastation des paysages, fumées et pollutions de l'air, rejets de produits toxiques, etc.



Fig. 1 - Site d'extraction de lignite en Allemagne

Si on prend le cas du charbon, N°1 mondial de la production d'électricité (environ 40 %), il contient des pourcentages variables et non négligeables de soufre, de mercure, etc. Même en Europe, où l'utilisation du charbon est réduite par rapport à la Chine, un rapport 2013 de "Health and environment alliance", financé par la Commission européenne (ref 1) estime que cette pollution spécifique entraîne en Europe chaque année 18 200 morts prématurées, 8500 nouveaux cas de bronchite chronique et 4 millions de jours de travail perdus.



Fig. 2 - Marée noire

Et bien sûr, ces énergies fossiles qui génèrent des tonnages importants de déchets ne s'en soucient pas. Tout est rejeté pour dilution. C'est en premier, le cas du CO<sub>2</sub>, avec les conséquences connues et avérées sur le réchauffement climatique de la planète. On est là en face

d'une pollution globale, avec des conséquences possibles importantes et encore mal connues : montée des eaux, disparition d'îles ou de villes côtières, suppression du Gulf Stream, acidification des mers et mort des récifs coralliens, disparition de glaciers, augmentation des tornades et événements climatiques extrêmes, etc..

Pire. Comme ces ressources fossiles sont de plus en plus rares, elles sont de plus en plus difficiles à trouver et utilisent des techniques de plus en plus polluantes. Par exemple, l'exploitation des sables bitumineux au Canada (Fig. 3), conduit à des pollutions importantes de l'eau, vise à raser la forêt sur une surface grande comme deux fois la Belgique et brûle quotidiennement des quantités de gaz, capables de chauffer deux millions de foyer.

Non, vraiment on ne peut pas dire que les énergies fossiles répondent à un seul des trois critères d'une énergie durable.



Fig. 3 - Extraction de sables bitumineux au Canada

énergie. La fabrication des panneaux photovoltaïques est grosse consommatrice d'énergie, ce qui conduit à un bilan CO<sub>2</sub> nettement plus mauvais que le nucléaire ou l'éolien. De plus, ces panneaux consomment des produits type terres rares, dont l'extraction (actuellement en Chine) et l'épuisement sont sujets à discussion.

En fonctionnement, il n'y a pas de nuisance notable, sauf pour les champs de panneaux solaires, en concurrence avec des utilisations agricoles.

Après obsolescence, il serait nécessaire de retraiter ces panneaux qui contiennent des éléments polluants. Aucune filière n'est réellement en place, vu le changement rapide des sociétés de production et l'absence de continuité dans le temps. Aucun financement n'est par ailleurs prévu et le cycle de vie général des énergies renouvelables n'est pas toujours très clair.

#### Application au bois :

Le bois et la biomasse sont une grande source d'énergie primaire. Ils sont inépuisables dans la mesure où ils peuvent se reconstituer. Il faut pour cela une reforestation équivalente à la consommation, ce qui n'est pas toujours le cas (désertification à Haïti, au Sahel, au Cap vert, etc.).

Leur combustion libère du CO<sub>2</sub> et des particules. Si l'on estime qu'une quantité équivalente de bois se reconstitue, on arrive à un bilan CO<sub>2</sub> nul. Pour les particules, elles peuvent poser problème en agglomération (d'où les récentes interdictions en région parisienne).

Enfin il n'y a pas de gros problèmes de gestion des déchets finaux, la cendre pouvant être considérée comme un engrais.

#### Conclusion :

Aucune énergie ne peut répondre totalement aux trois critères de l'énergie durable. Ceci étant, et malgré les quelques réserves ci-dessus, les énergies renouvelables ont un bilan infiniment meilleur, en ce domaine, que les énergies fossiles.



Fig. 4 - Pollution due au charbon dans une ville chinoise

### 3. Application des trois critères à quelques énergies renouvelables

#### Application à l'éolien :

Si le vent est une énergie durable, les éoliennes ont la durée de vie d'un produit industriel. Elles consomment du béton, de l'acier, etc. pour une durée de vie donnée. Tout ceci conduit à un bilan CO<sub>2</sub> honorable et comparable au nucléaire.

En fonctionnement, on notera une pollution visuelle et sonore, ainsi que quelques problèmes avec la faune (oiseaux, chauve-souris, chiroptères, ...) ou avec l'utilisation agricole des terres environnantes.

En fin de vie, il faut soit prolonger par remise en état soit démanteler avec remise en état du paysage.

#### Application au photovoltaïque :

De la même manière, le soleil est une énergie durable mais pas les panneaux ou dispositifs utilisant cette

## 4. Application des trois critères au nucléaire

### 4.1 Premier critère : épuisement des ressources

#### 4.1.1 Consommation par les réacteurs à eau GEN II et GEN III

La grande majorité des réacteurs actuels sont des réacteurs à eau. Ils consomment environ 100 tonnes d'uranium naturel pour produire un GWh (ref 2). Les 440 réacteurs actuellement en opération dans le monde, consomment aujourd'hui 64 kt d'uranium par an.

Il faut rappeler que l'uranium est un produit extrêmement répandu.

La teneur en uranium dans l'eau de mer est en moyenne de 3 mg/m<sup>3</sup>, soit environ 4,5 milliards de tonnes. La teneur en uranium dans l'eau des rivières est un peu plus faible en moyenne. Le Rhône charrie près de 100 tonnes d'uranium par an. Enfin la teneur en uranium dans la roche est en moyenne de 3g/tonne. Un terrain de 20 mètres de côté et de profondeur dix mètres, contient en moyenne 24 kg d'uranium.

Les mines d'uranium sont simplement les endroits où la concentration est beaucoup plus forte, ce qui facilite l'extraction à un coût plus faible.

La répartition des principales sources d'extraction dans le monde montre aussi une bonne répartition générale (fig 5).

Si on se réfère au livre rouge de l'AIEA (ref 5), les quantités d'uranium disponibles dans le monde sont les suivantes :

#### Ressources identifiées (2011)

≤ 260 \$/kg d'U	7097 kt
≤ 130 \$/kg d'U	5327 kt
≤ 80 \$/kg d'U	3079 kt
≤ 40 \$/kg d'U	681 kt

#### Ressources supplémentaires estimées

≤ 260 \$/kg d'U	6703 kt
≤ 130 \$/kg d'U	6242 kt
≤ 80 \$/kg d'U	1624 kt

On voit que ces quantités augmentent avec le prix d'extraction.

La consommation annuelle étant d'environ 64 kt, il apparaît que les ressources disponibles connues nous permettent une centaine d'années de consommation au rythme actuel, à un prix inférieur à 130\$/kg. Les ressources supplémentaires probables y ajoutent une centaine d'années complémentaires.

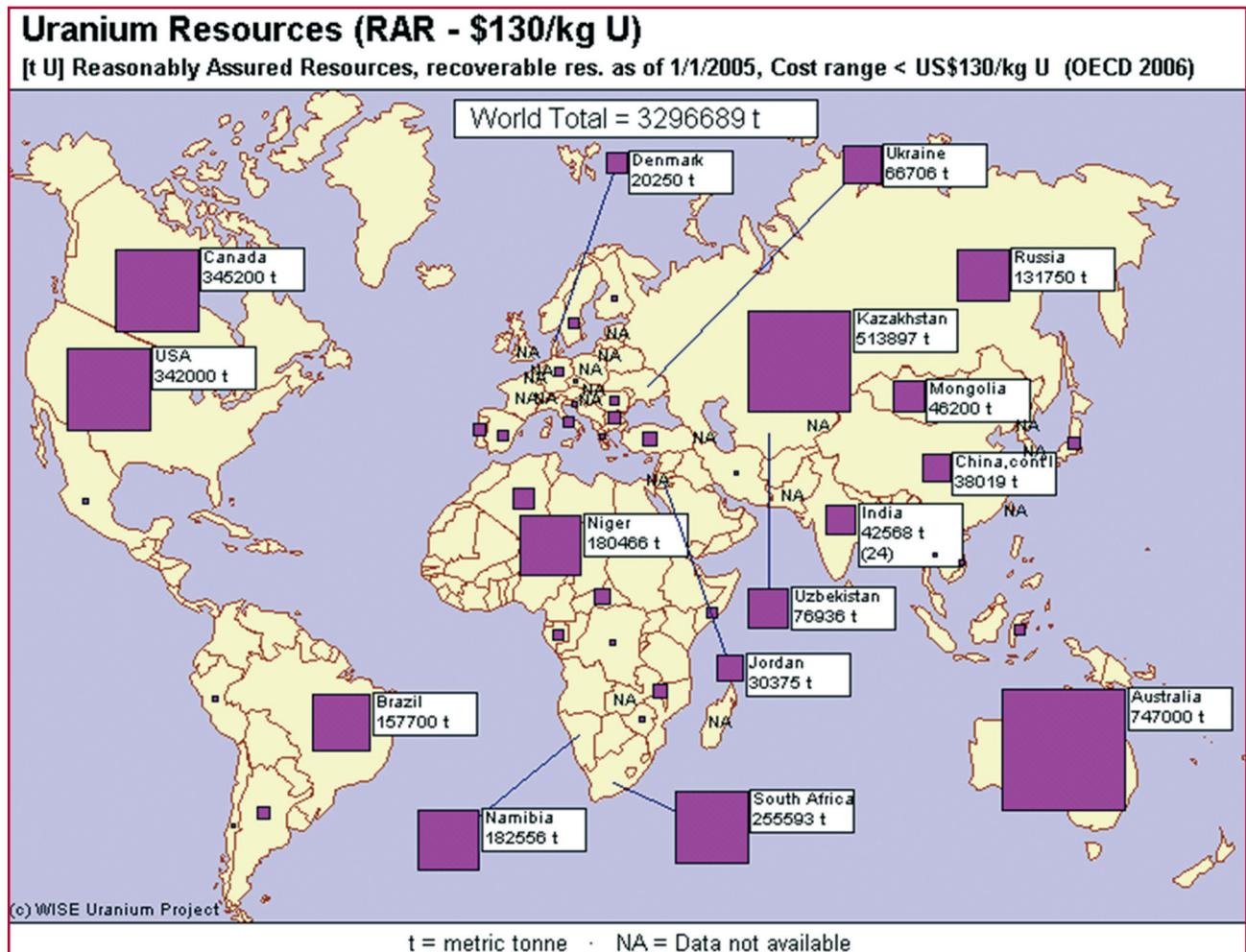


Fig. 5 - Répartition des ressources d'uranium dans le monde

Ceci étant, la durée de vie d'un réacteur troisième génération est de 60 ans et l'on voit qu'à un moment dans le siècle, une certaine visibilité sera nécessaire, pour lancer de nouveaux réacteurs.

**4.1.2 Les réacteurs rapides**

Ces réacteurs fonctionnent avec un combustible MOX (20 % Pu, 80 % uranium appauvri) et peuvent être surgénérateurs, c'est-à-dire qu'après retraitement on peut récupérer plus de plutonium que l'on en a introduit. Il est donc possible de refabriquer du combustible en remplaçant l'uranium appauvri. Dans la pratique, on fonctionne en brûlant tout l'uranium disponible, ce qui multiplie environ par cent les durées d'approvisionnement.

La figure 6 rappelle les valeurs des flux dans le cycle de retraitement français.

On voit que le retraitement du combustible des réacteurs à eau permet une production annuelle d'environ 10 t de Pu et de 7000 t d'uranium appauvri. Avec cette production annuelle de 10 t, la France dispose d'environ 200 t de Pu disponible en 2013. Pour l'uranium appauvri, c'est environ 300 000 t qui sont actuellement stockées.

Quand on sait qu'un parc de réacteurs rapides de 100 GWe consommerait moins de cent tonnes d'uranium appauvri par an, on voit que les matières déjà disponibles nous permettraient à elles seules des milliers d'années de production, sans nécessité de mine d'uranium ou d'unités d'enrichissement.

On notera par ailleurs que le thorium est environ trois fois plus abondant que l'uranium sur la planète et qu'en tant qu'élément fertile, il permettrait d'apporter encore un complément d'approvisionnement, si nécessaire (ref 4). En France, cette nécessité apparaît extrêmement lointaine vu la quantité d'uranium appauvri disponible.

**4.1.3 Conclusion sur la durabilité de l'approvisionnement**

La comparaison des ressources connues et de la consommation actuelle nous conduit à une bonne centaine d'années de fonctionnement au coût actuel qui ne joue aujourd'hui que faiblement sur le coût final de l'électricité : 2 à 3 % en 2013. De plus, Il est probable que la reprise de la prospection conduira à la découverte de nouveaux gisements.

De plus, le passage aux réacteurs rapides permettrait de multiplier d'un facteur cent les ressources. Ceci porte le fonctionnement à des milliers d'années avec les seuls stocks déjà disponibles d'uranium appauvri.

Passés ces milliers d'années, la part du coût de l'uranium dans la production d'un parc de réacteurs rapides devient tellement dérisoire, que l'on peut exploiter des gisements à très faible teneur et à coût d'extraction plus élevé. Il n'y a plus de vraie limite dans le temps.

**4.2 Deuxième critère : la pollution en fonctionnement**

**4.2.1 Fonctionnement normal**

Les rejets radioactifs sont très faibles (voir tableau ci-dessous). C'est principalement du tritium, soit environ 3 g/an pour l'ensemble du parc français.

Radionucléide	Rejets annuels par français (TBQ.AN <sup>-1</sup> )	
	Effluents gazeux	Effluents liquides
<sup>3</sup> H	3,4.10 <sup>1</sup>	1,0.10 <sup>3</sup>

Les rejets thermiques sont de 2 GWth rejetés pour 1 GWe produit.

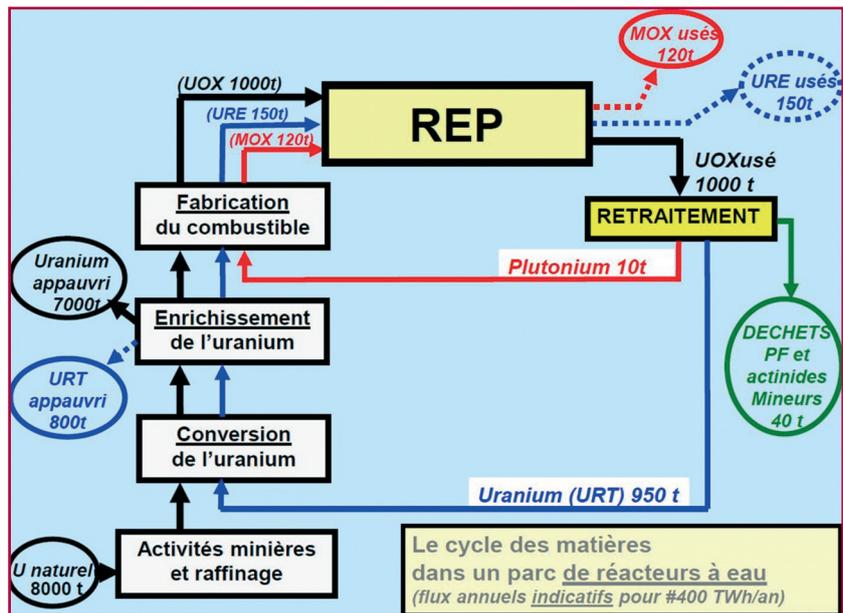


Fig. 6 - le cycle des matières nucléaires en France en 2013

L' échauffement de l'eau de refroidissement est d'une dizaine de degrés (avant mélange dans le cours d'eau) en cas de refroidissement en circuit ouvert (prélèvement de 50 m³/s restitués quasi instantanément), L' échauffement est de quelques dixièmes de degrés en cas de refroidissement par aéroréfrigérant (prélèvement d'environ 2 m³/s dont 1,3 m³/s restitués au cours d'eau).

Les rejets chimiques sont aussi très faibles (surtout de l'acide borique dilué, voir tableau ci-dessous).

Substances rejetées	Ordre de grandeur des quantités rejetées par réacteur nucléaire par an ( en kg)
Acide Borique	1000 à 7000
Hydrazine	< 6
Lithine	< 1
Morpholine	40 à 250
Ammonium	< 3000
Phosphates	< 1000

Comparaison radiologique avec le charbon :

Ces valeurs où l'on parle en grammes ou en kilogrammes, sont à comparer aux pollutions des centrales à charbon où l'unité est plutôt le millier de tonnes, en termes de rejets chimiques divers ! Ce que l'on sait moins c'est que uranium, thorium, potassium et leurs descendants sont présents dans le charbon à des doses variables (de moins de 1 à plus de 20 ppm pour l'uranium ou le thorium). Après combustion, ils sont rejetés sous forme de gaz, de fumées et de cendres, ce qui induit des conséquences radiologiques. La dose collective de 1,6 à 2,6 HSievert/GW.an pour un réacteur nucléaire monte à des valeurs de 4 à 20 HSievert pour une centrale au charbon (réf 3) et peut même induire des dosimétries hors du site (ref 8). Quant aux cendres restantes, elles ont une activité d'environ un millier de Bq/kg, essentiellement due au thorium, uranium, et potassium, (ref 6, 7 et 8), mais ne sont pas spécialement gérées, ce qui a parfois posé des problèmes lors de leur réutilisation dans le bâtiment. Une étude de l'ORNL de 1982, montrait que l'ensemble des réacteurs nucléaires américains avait consommé moins d'uranium que ce qui avait été rejeté par l'ensemble des centrales au charbon américaines.

#### 4.2.2 Fonctionnement accidentel

Les pollutions radioactives des sols autour des centrales de Tchernobyl, puis de Fukushima ont été des messages très négatifs dans l'opinion vis-à-vis du nucléaire. Il faut rappeler que les réacteurs de génération III et IV sont conçus pour diminuer encore les probabilités d'incident graves. Et de plus la structure de l'enceinte et les dispositifs de mitigation sont conçus pour que même dans le cas de l'accident le plus grave imaginable, l'enceinte reste intègre et les conséquences négligeables autour du réacteur.

#### 4.2.3 Conclusion sur la pollution en fonctionnement

Personne ne conteste qu'en fonctionnement normal, les réacteurs nucléaires existants sont une des sources d'énergie disponibles la moins polluante, en termes de rejets, de pollution chimique, de pollution des sols ou de l'atmosphère. Les dispositions prises sur les réacteurs de troisième et quatrième génération permettent de plus d'éviter toutes conséquences hors site en cas d'accident maximal. Pour les réacteurs rapides, on notera simplement que le REX de leur bilan environnemental en fonctionnement est encore meilleur que celui des réacteurs existants (Réf. 9).

### 4.3 Troisième critère : quels déchets finaux ?

Pour une production d'un gigawatt pendant un an, une centrale du parc nucléaire produit environ 100 m<sup>3</sup> de déchets faible activité vie courte (volumes stockés), 5 m<sup>3</sup> de déchets faible ou moyenne activité vie longue,

2,5 m<sup>3</sup> de verres haute activité vie longue (40 m<sup>3</sup> de combustible usé si on ne traite pas) (ref 2).

La même centrale au charbon produira 350 000 m<sup>3</sup> de cendres, 6000 tonnes de poussière et 8 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Sans compter les tonnes de SO<sub>2</sub>, NO, et de métaux lourds dont le mercure.

On voit aussitôt les deux grandes différences : tout d'abord au niveau des tonnages produits et ensuite sur la politique de gestion. Pour l'énergie fossile, tout est rejeté sans précautions particulières avec les conséquences décrites au début de cet article sur la santé et le climat, alors que les déchets nucléaires sont intégralement stockés et gérés dans la durée. Ils n'induisent donc aucune conséquence négative.

L'essentiel, en quantité, des déchets radioactifs sont à 99 % des déchets de procédé (filtres, résines, ...) ou de maintenance (calorifuges, outils, contaminés) et/ou d'activation diverses. Ces déchets sont de faible ou moyenne activité et de courte durée de vie. Ils sont intégralement collectés, inventoriés, conditionnés et stockés. La durée de surveillance nécessaire pour ces déchets est limitée du fait de leur décroissance radioactive rapide. Ils ne posent donc aucun problème d'un point de vue environnemental. Ces déchets correspondent, en France, à environ un kg par an et par habitant. A titre de comparaison, chaque habitant génère par an, 2200 kg de déchets ménagers divers et 800 kg de déchets industriels dont 100 kg à haute toxicité (et à durée de vie infinie, contrairement aux déchets radioactifs qui décroissent dans le temps).

Le combustible représente un déchet à haute activité, à longue durée de vie et en quantité très faible. Le traitement permet d'en récupérer 96 %. Les 4 % restants (40 t/an) sont vitrifiés (Fig. 7), pour mise en forme dans un conditionnement ultime (Fig. 8). Ce sont ces conteneurs qui seront stockés en piscine pour refroidissement, avant leur stockage définitif.

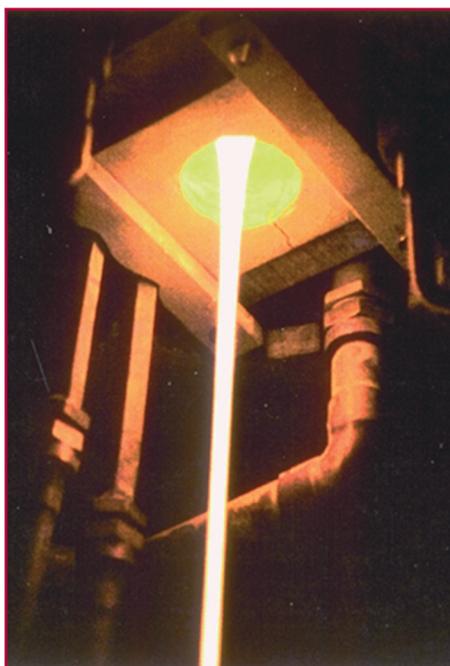


Fig. 7 - Vitrification des déchets



Fig. 8 - Conteneur ultime des déchets vitrifiés

La quantité est d'environ 2g/an et par habitant. Cela veut dire qu'un Français qui aura pendant 80 ans utilisé une énergie électrique à 75 % nucléaire, n'aura généré que 160 g de déchets ultimes gérés et stockés, sans aucun rejet dans l'environnement. Quelle industrie fait mieux ?

Le rôle des rapides est important dans ce cycle du combustible jusqu'au déchet final. En effet leurs capacités de multi-recyclage leur permettent de brûler tout l'uranium et le MOX, qui après un passage en REP ont une composition isotopique dégradée ne leur permettant plus d'être réutilisés dans un réacteur à eau. C'est donc grâce à cette potentialité que la quantité de déchets ultimes est si faible. On notera de plus que leur spectre neutronique les rend capables de transmuter les actinides mineurs. Ceci ouvre aussi à long terme des possibilités de minimiser encore, si nécessaire, la radiotoxicité des déchets ultimes avant leur stockage définitif.

En conclusion, l'industrie nucléaire est la seule à générer si peu de déchets en quantités, ce qui lui permet contrairement aux autres de ne pas les diluer dans l'environnement mais de les stocker et de les gérer en évitant tout rejet ou toute pollution.

## 5. Conclusion

Le triptyque Réacteurs à eau/ Retraitement du combustible/Réacteurs rapides, permet à l'industrie nucléaire de répondre aux trois critères de l'énergie durable :

- L'approvisionnement en combustible est assuré sur des millénaires, grâce aux possibilités d'introduction progressive dans le parc, de réacteurs rapides permettant de boucler le cycle du combustible.

- Les améliorations apportées sur les réacteurs deuxième génération, puis leur remplacement progressif par les réacteurs de troisième et quatrième génération, permettront d'améliorer encore un bilan environnemental en fonctionnement déjà remarquable.

- Les possibilités de multi-recyclage des rapides permettent de minimiser encore et la quantité et la radiotoxicité des déchets finaux, qui par ailleurs sont déjà gérés et stockés pour éviter toute nuisance environnementale.

## Références

[1] "The unpaid health bill. How coal power plants make us sick". A 2013 report from the Health and environmental alliance.

[2] "Moi U 235 atome radioactif". Flammarion. Pages 102 et 112.

[3] AIEA Bulletin 2/1989. "Diversité des rayonnements : l'énergie nucléaire sous son vrai jour"

[4] "Cycle du combustible au thorium". D. Grenèche. Technique de l'ingénieur. BN 3 563

[5] Red book AIEA AEN 2011 sur la disponibilité de l'uranium.

[6] "Natural radionuclides from coal fired thermal plants- estimation of atmospheric release and inhalation risk." Radioprotection. Vol. 46 N°6(2011). S173-S179

[7] "Rare earth elements in fly ashes created during the coal burning process in certain coal-fired power plants operating in Poland-Upper Silesian region". Danuta Smolka-Danielowska. Journal of environmental radio activity 101 (210). 965-968

[8] "Coal an impure fuel source. Radiation effects of coal-fired power plant in Turkey" Hacettepe journal of biology and chemistry (2010) 38 (4). 259-268

[9] "Phenix. Le retour d'expérience". Chapitre 24

