

# Les nouveaux horizons du nucléaire

**Sylvain DAVID**

*Chercheur à l'institut de physique nucléaire d'Orsay à l'université Paris XI  
- Polytechnique*

Merci pour cette invitation. L'intitulé de cet exposé est « Les nouveaux horizons du nucléaire » ; je m'abstiendrai cependant de traiter les mini-réacteurs dont je ne suis pas spécialiste.

Je ne vais pas vous présenter de grandes vérités mais plutôt vous proposer des éléments de réflexion sur le nucléaire du futur. Je ne vais pas parler de la sûreté puisqu'on vient d'en parler longuement, mais je reviendrai sur l'impact que peut avoir Fukushima sur le développement du nucléaire.

Je suis persuadé qu'il y a des gens ici qui sont bien plus que moi spécialistes des réacteurs mais je pense qu'ils interviendront pendant la séance de questions si je dis des choses qui les heurtent. Je vais passer assez vite sur le début.

## **Panorama énergétique mondial**

Le nucléaire représente 6 % de la production mondiale en énergie primaire ; il y a 442 réacteurs actuellement dans le monde ; la part de l'électricité nucléaire dans le monde est de 15 %, plutôt en diminution puisqu'elle n'augmente quasiment plus, alors que la production électrique totale augmente continuellement (p.2).

Vous connaissez ce genre de courbe (p.3) : consommation d'électricité par habitant et par an aux USA, en France (où on voit l'effet de la crise), en Chine (où on voit une montée spectaculaire des kWh par habitant et par an, mais qui reste encore 4 fois plus faible que ce que l'on consomme en France) et au Nigeria (représentatif des pays pauvres subsahariens, où on est quasiment dans l'épaisseur de l'axe zéro à cette échelle).

Quand on multiplie par le nombre d'habitants, bien entendu la consommation bondit en Chine : 300 TWh par an, l'équivalent de la production de 50 réacteurs nucléaires, sont produits chaque année en plus, actuellement avec du charbon. Mais le jour où la Chine déciderait de

passer massivement au nucléaire, le potentiel de déploiement est de 50 réacteurs par an.

Avant de parler des réacteurs eux-mêmes, je vais parler des ressources en uranium et de la transition entre génération 3 et génération 4.

Dès qu'on parle de ressource, il faut savoir quelle sera la demande. Les hypothèses de cette construction du monde énergétique sont les suivantes : une population de 9 milliards de personnes en 2050, une consommation d'énergie mondiale de 20 Gtep par an (quasiment le double de la consommation au début des années 2000), l'idée étant de décrire ce que pourrait être un tel monde avec une division par 2 des émissions de gaz à effet de serre.

Hypothèses supplémentaires : la réduction des inégalités mondiales de consommation entre les populations les plus riches et les plus pauvres et une adéquation des sources et des besoins énergétiques (également en fonction des types de population : plus de biomasse pour les zones rurales, de l'énergie centralisée pour les pays développés technologiquement, essentiellement adaptée à des populations urbaines).

Vous avez ici (p.5) la répartition, dans les grandes régions du monde, de la consommation d'énergie totale par habitant et par an, en 2005 à gauche, en 2050 à droite. Un premier résultat en découle : lorsqu'on réduit les inégalités au niveau mondial, on arrive à une baisse de consommation d'énergie par habitant de 25 % pour les pays riches, alors qu'on l'a doublée au niveau mondial. La première conclusion est que la sobriété énergétique des pays riches n'empêche pas une augmentation de la consommation d'énergie au niveau mondial. On voit qu'en Asie, ces pays très peuplés ne devraient se développer actuellement qu'avec des sources sans CO<sub>2</sub>. Les populations les plus pauvres atteignent en 2050 une consommation de 1 tep/an /habitant, ce qui peut être encore jugé très faible quand on compare à ce que consomme un habitant des pays développés aujourd'hui, qui est presque de 5 tep/an/habitant.

Après, on construit le mix énergétique avec une adéquation des sources et des besoins (p.6). Et on arrive, en ayant mis des capacités d'énergies renouvelables relativement réalistes (mais aussi optimistes), à une capacité de 7 Gtep/an (chaleur + électricité), 12 à 15 Gt de CO<sub>2</sub> stockées

par an, un nucléaire multiplié par 8 au niveau mondial (p.7) pour atteindre au total 20 Gtep.

Dans cette construction qui prend en compte le développement des pays émergents, on peut imaginer un nucléaire qui se développe massivement. Et donc, dans toute la suite, on peut imaginer une enveloppe pour les scénarios nucléaires, entre 0 (si on sort du nucléaire d'ici 2050) et 4 à 5 Gtep (enveloppe maximale de ce qui peut être demandé au nucléaire). La discussion sur les ressources en uranium devra prendre en compte cette incertitude considérable de l'évolution à venir du nucléaire.

### **Le développement de l'énergie nucléaire et les disponibilités en combustible**

Pour relativiser le facteur 8 qui focalise un peu les questions, j'ai tracé en 2050 les kWh par habitant et par an dans cette construction (p.8). Pour les pays riches, on atteint presque 5000 kWh. En France, en 2010 on est presque à 7000 kWh nucléaire par an par habitant. On voit donc qu'un facteur 8 au niveau mondial, ce n'est pas nucléariser le monde entier. Cela permet aussi de relativiser ce facteur 8 : en 2050, il y aurait des milliards d'habitants urbains, développés, en Chine, en Inde, qui auraient accès à cette énergie, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

Ce fort développement du nucléaire n'était pas envisagé, il y a 10 ans, dans les scénarios plus standards, comme celui de l'AIE. Depuis 2 ou 3 ans, on voit passer des scénarios qui envisagent un déploiement relativement important du nucléaire dans les années qui viennent.

Si je regarde le potentiel de production des filières actuelles et des filières de génération 4, à gauche, vous avez la consommation d'uranium (p.10). Vous savez que les filières actuelles sont basées sur l'uranium 235, seul noyau fissile naturel, mais qui ne représente que 0,7 % de l'uranium naturel. Si je considère un réacteur de 1 GW électrique fonctionnant un an, la masse de matière fissionnée dans le réacteur chaque année est environ 1 tonne. Mais comme on n'utilise que l'uranium 235, pour faire fissionner une tonne de matière dans le réacteur, on extrait de terre 200 tonnes d'uranium naturel. On retrouve ainsi un taux d'utilisation de l'uranium de 0,5 %, cohérent avec les 0,7 % d'uranium 235.

Ces 200 tonnes peuvent très raisonnablement être réduites à 130 tonnes, sans changer aucune technologie, simplement en améliorant l'enrichissement en amont des réacteurs et en recyclant l'uranium et le plutonium du combustible utilisé, comme on le fait déjà en France. En généralisant ce recyclage et en améliorant l'enrichissement, on passe facilement de 200 à 130 tonnes sans aucune innovation technologique. Descendre en dessous de 130 tonnes (voire 100 tonnes), c'est en revanche très difficile avec les filières actuelles.

Il y a aussi les filières de 4<sup>ème</sup> génération, qui n'utilisent plus l'uranium 235 mais l'uranium 238. Celui-ci ne fissionne pas mais, lorsqu'il capture un neutron, il produit un noyau fissile de plutonium 239 qui, lui, va fissionner. Le principe de la régénération est donc très simple. Chaque fois qu'un atome de plutonium fissionne, un neutron est capturé par un noyau d'uranium 238, pour régénérer le plutonium disparu. Au final, dans un réacteur régénérateur, la masse de plutonium est constante, puisque chaque noyau consommé est régénéré. Le seul noyau consommé est donc l'uranium 238. Ainsi, vous voyez que, pour une tonne de plutonium fissionné, vous allez consommer une tonne d'uranium 238 régénérant le plutonium perdu. La consommation d'un réacteur régénérateur est donc d'une tonne d'uranium par an par gigawatt électrique, c'est-à-dire 200 fois moins que ce que l'on fait aujourd'hui.

De plus, comme le combustible n'est plus l'uranium 235 mais le 238, on peut utiliser les 300 000 tonnes d'uranium appauvri dont on dispose déjà en France, grâce à la filière d'enrichissement. Il n'y a donc plus besoin d'aller extraire de l'uranium des mines pendant des milliers d'années. C'est très positif vis à vis de la consommation des ressources.

Là où c'est plus complexe, c'est que cette réaction-là, équilibrée, n'est pas possible dans les réacteurs actuels, car l'énergie des neutrons y est trop faible. Il faut donc passer à des réacteurs à neutrons rapides, j'y reviendrai.

Un deuxième point intéressant : une fois le réacteur démarré, la masse de plutonium reste constante, il faut seulement fournir cette masse initiale de plutonium au démarrage. Actuellement, les concepts de réacteurs à neutrons rapides font état de presque 20 tonnes de plutonium par GW électrique installé. Pour vous donner une idée en France, 60 réacteurs à 20

tonnes, cela fait 1200 tonnes de plutonium. Actuellement, on a accumulé à peine 300 tonnes de plutonium dans les combustibles usés des réacteurs actuels. On comprend que pour passer à des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération régénérateurs, le plutonium est une matière précieuse, qu'on doit éviter de consommer, de mettre sous terre ou de vitrifier, empêchant de le récupérer. Les réacteurs du futur nécessitent d'accumuler du plutonium jusqu'à des inventaires de plus de 1000 tonnes. Ces réacteurs ne devraient commencer à produire à grande échelle qu'en 2050, peut-être plus tard ; mais d'ici 2050, on a les mains liées sur la disposition du plutonium qui n'est pas un déchet, ni vraiment une matière valorisable à court terme. Je dirais un mot sur le cycle thorium si j'ai le temps à la fin.

La gestion des ressources en uranium est plus compliquée encore que celle des ressources en pétrole. Les réacteurs de 3<sup>ème</sup> génération, type REP, ont un prix de revient du kWh qui augmente avec le prix de revient de l'uranium naturel ; mais la part du prix de revient de l'uranium dans le prix du kWh est très faible. Quant aux régénérateurs, ils consomment 200 fois moins. Il y a croisement des deux courbes (p.11) ; quand le prix de l'uranium atteint cette valeur, il devient plus rentable de construire des régénérateurs que des REP. Si les régénérateurs ne débouchent pas pour une question ou une autre, rien n'empêche de rechercher de l'uranium à des prix plus élevés. Indirectement, dès qu'on parle de ressources, on parle de ressources d'uranium à un prix d'extraction donné, prix évalué à partir des considérations précédentes.

Quand on met les barres d'erreur sur l'évolution du prix du kWh en fonction du prix de l'uranium (p.12), pour les REP et pour les réacteurs à neutrons rapides, plusieurs écoles s'affrontent :

- les gens qui travaillent sur les réacteurs au sodium disent que dès qu'on passe la barre des 130 \$ le kilo (quasiment le prix de l'uranium d'aujourd'hui), les réacteurs à neutrons rapides sont compétitifs,
- A l'inverse, les gens impliqués dans les réacteurs à eau considèrent que même à plus de 1000 \$ le kilo, on ne fera pas de réacteurs à neutrons rapides.

Il est donc difficile de parler à la fois des ressources en uranium et du passage de la 3ème à la 4ème génération ; il n'y a pas de consensus sur ce

sujet mais on peut considérer des ordres de grandeur (p.13). Ici, j'ai pris la puissance nucléaire mondiale, équivalent pleine puissance, soit 300 GW. La consommation d'uranium mondiale est de 60 000 tonnes par an. Les réserves prouvées, spéculatives, si on se base sur le livre rouge de l'AIE est de 17 millions de tonnes. Plusieurs références les situent entre 10 et 23 à 25 millions de tonnes. Ces réserves semblent raisonnables, mais il peut y en avoir plus ou moins.

Au taux actuel de consommation, on a 2 à 4 siècles de réserve. Si on prend en compte une multiplication par 8 de l'énergie nucléaire, cela fera moins de 50 ans de réserve. Si on se base sur ces chiffres, peu officiels, les réacteurs à neutrons rapides régénérateurs ne s'imposent dans le siècle qui vient que dans des scénarios où le nucléaire se déploie très massivement (multiplié par 5 à 10). En même temps, les promoteurs de scénarios de développement du nucléaire affirment la nécessité de passer rapidement aux réacteurs au sodium alors que la puissance installée augmente au plus d'un facteur 2,5 : il y a là un problème de cohérence. Mon interprétation est que les taux de déploiement envisagés étaient plus élevés mais qu'on n'osait pas le dire aussi clairement.

Voilà un scénario de déploiement du nucléaire d'un facteur 8 entre 2020 et 2050 (p.14) montrant la consommation cumulée d'uranium comparée aux réserves. Vous voyez que dans un scénario x2 en 2050, la consommation cumulée d'uranium atteint difficilement les 10 millions de tonnes, ce qui est bien en dessous des réserves de référence.

Une autre façon de voir les choses : ici, vous avez la consommation cumulée et la consommation engagée (p.15) ; ainsi dès que l'on construit un EPR, on comptabilise tout l'uranium que l'EPR consommera dans les 60 ans de son fonctionnement. Un électricien a besoin d'avoir un regard sur l'approvisionnement en uranium. Les valeurs sont donc plus grandes sur ces courbes, et la tension sur les ressources apparaît plus tôt. La peur de manquer d'uranium va pouvoir accélérer le recours aux réacteurs régénérateurs.

### **Les réacteurs régénérateurs à neutrons rapides**

Le recours aux régénérateurs peut être accéléré même sans contrainte due aux ressources globales disponibles ; on peut être contraint par le flux

auquel l'industrie minière est capable d'extraire l'uranium (p.16). Il est de plus en plus difficile d'ouvrir des mines, aucune ne produit actuellement plus de 10 000 tonnes d'uranium par an. On peut donc avoir des tensions sur les prix qui ne sont pas dues à un problème de ressources mais à leur exploitation. Cela peut être un argument pour accélérer le déploiement des réacteurs à neutrons rapides. Dès lors, on aura plutôt un scénario qui comporte une coexistence des réacteurs de 3ème et 4ème générations et pas une transition brutale.

Je vous l'ai dit, dans les réacteurs à eau actuels on n'a pas de neutrons rapides disponibles parce- qu'on les ralentit pour favoriser la fission de l'uranium 235. Dans les réacteurs à neutrons rapides, le ralentissement des neutrons est proscrit : il faut donc extraire la chaleur dégagée dans le cœur sans introduire d'eau et utiliser un autre caloporteur. Le meilleur que l'on ait trouvé aujourd'hui est le sodium. C'est un métal liquide dont le noyau est suffisamment lourd pour ne pas ralentir les neutrons ; de plus il possède des propriétés thermiques favorables à l'évacuation de la chaleur du cœur et à son transfert dans l'échangeur. Le problème du sodium est essentiellement une instabilité chimique au contact de l'air et de l'eau qui conduit à mettre en œuvre des systèmes de sûreté très développés, ce qui en fait une technologie complexe et donc plus chère. De plus ces réacteurs ont un handicap au niveau de la sûreté, car leur cœur, tel qu'il est conçu aujourd'hui, a un coefficient de vide positif : si on perd le sodium du cœur, la réactivité augmente et la puissance du cœur s'emballe. Bien qu'il soit difficile d'imaginer des situations conduisant à l'ébullition du sodium dans le cœur, c'est une préoccupation dont il faut tenir compte. Des alternatives au sodium peuvent être considérées :

- le plomb fondu a de bonnes propriétés neutroniques et de transfert thermique mais des problèmes importants de corrosion. On ne sait pas actuellement réaliser une cuve de réacteur qui tienne 50 ans avec du plomb fondu à 600°, essentiellement pour des problèmes de comportement de matériaux.
- un mélange plomb-bismuth dont la température de fusion, plus basse, diminue les problèmes de corrosion des matériaux. C'est une technologie étudiée par les Russes et les Belges dans le cadre d'un projet de petits réacteurs incinérateurs hybrides.

- l'hélium possède un noyau léger qui ralentit les neutrons mais, sous forme gazeuse, il y a très peu de matière. La difficulté ici est essentiellement la capacité de l'hélium à évacuer la puissance dégagée dans le cœur, notamment en situation accidentelle. Comme le caloporteur représente peu de matière, il a peu d'inertie thermique. Si on perd la pression dans l'enceinte d'hélium, la température augmentera fortement et il faudra développer un combustible résistant à de très hautes températures. Aujourd'hui, on sait le faire avec des microbilles (on dispose les actinides qui fissionnent au centre d'une microbille d'un millimètre de diamètre, entourée de carbure de silicium). Ainsi, on confine le combustible de façon très locale mais les couches entourant les actinides contiennent du carbone qui ralentit les neutrons. L'objectif est donc de trouver un combustible qui a de bonnes propriétés de confinement en situation accidentelle et qui ne contient pas de carbone pour ne pas ralentir les neutrons.
- une technologie plus innovante, avec un combustible liquide, j'y reviendrai à la fin. Le combustible sert lui-même de caloporteur ; il est très bien adapté au cycle thorium et a l'avantage de pouvoir être extrait en continu pour un retraitement en ligne. On peut ainsi enlever au fur et à mesure les produits de fission qui empoisonnent le cœur. La difficulté majeure est de faire circuler un combustible hautement radioactif jusque dans l'échangeur.

Un mot sur ASTRID , projet de réacteur au sodium de 600 MW électrique lancé après la déclaration de Jacques CHIRAC en 2004. L'objectif est de faire un démonstrateur de génération 4 d'ici 2020. Quand on écoute les ingénieurs des réacteurs régénérateurs, d'ici 2020, on n'a pas le temps de développer des régénérateurs autres qu'au sodium. C'est la même technologie que les réacteurs PHENIX et SUPERPHENIX, avec une puissance intermédiaire. Par contre, on étudie actuellement des concepts de réacteurs au sodium, à cœur très hétérogène ; le but est d'obtenir un coefficient de vidange faible, voire négatif, plus favorable à la sûreté donc au développement de ces réacteurs. Les recherches doivent être poursuivies.

## **La gestion du combustible et des déchets**

La gestion du plutonium est un sujet sensible. Aujourd'hui, le plutonium est recyclé une fois sous forme de combustible MOX dans les réacteurs à eau sous pression. Après son utilisation en réacteur, le combustible MOX est entreposé et n'est pas considéré comme un déchet. C'est une matière valorisable qui ne relève pas de la loi sur les déchets nucléaires. On aura besoin, en effet, de centaines de tonnes de plutonium si on veut pouvoir démarrer des réacteurs à neutrons rapides dans le futur.

Ici, vous avez le scénario standard de déploiement des réacteurs de 4ème génération (p19). C'est le plus optimiste en termes de date : les REP qui s'arrêtent, les EPR qui démarrent et les RNR au sodium en rouge. Dans ce scénario, la masse de plutonium atteint plus de 1000 tonnes à l'équilibre, une fois tous les RNR démarrés. Ce schéma a été réalisé en 2010. Depuis, chaque année, les RNR ont tendance à prendre une tonne de plutonium en plus dans l'inventaire car quand on veut sécuriser un réacteur sodium, on augmente la masse de plutonium. Le scénario de référence du multi-recyclage de l'uranium et du plutonium dans les RNR comporte des éléments essentiels :

- les 1000 tonnes de plutonium circulant entre les réacteurs et les usines de retraitement.
- au-delà du recyclage du combustible, uranium et plutonium, les déchets constitués par tous les produits de fission et tous les actinides mineurs, c'est-à-dire tous les noyaux plus lourds que le plutonium qui ne représentent pratiquement pas de valeur énergétique (américium, curium etc.).

On considère attentivement la transmutation qui consiste à ne plus inclure les actinides mineurs dans les déchets mais à les recycler en continu dans les RNR.

On a représenté la radio-toxicité (radioactivité pondérée par un facteur qui prend en compte le risque que l'on prend quand on avale des éléments radioactifs) (p.22):

- des déchets actuels, qui proviennent du retraitement des premiers combustibles à uranium dont on a extrait l'uranium et le plutonium (recyclés sous forme de combustible MOX) ;

- les déchets issus d'un RNR de référence, c'est-à-dire sans transmutation d'actinides mineurs. L'idée que les RNR produisent moins de déchets que les réacteurs actuels est fautive, puisque les déchets issus des RNR sont plus radiotoxiques que les déchets actuels, s'ils ne sont pas traités par transmutation.
- ce n'est qu'en recyclant les actinides mineurs qu'on arrive à des déchets plus faibles en termes de radio-toxicité, en gros d'un petit facteur 10 par rapport aux déchets actuels.

La transmutation peut aboutir à des déchets moins chauds. On peut donc les concentrer plus facilement pour les mettre sous terre puisque les montées en température sont moins rapides. Ici, vous voyez que dans un parc de stockage comme celui de BURE, il faudrait 500 hectares de stockage pour les déchets des RNR sans transmutation mais 100 hectares avec transmutation (p.23). On peut ainsi gagner un facteur 5 sur la superficie des sites de stockage des déchets les plus radioactifs, grâce à la transmutation. En plus de baisser la radio-toxicité, on réduit la chaleur et on peut concentrer les déchets plus facilement.

Il y a un paradoxe : plus on peut concentrer les produits de fission, plus on peut en stocker.. Comme ce sont les produits de fission qui diffusent, cela peut paraître préjudiciable aux populations qui habitent près du site... Mais en transmutant les déchets des RNR, on gagne globalement beaucoup sur la radio-toxicité des déchets (p.24).

Il est intéressant de comparer ces déchets produits chaque année à l'inventaire du RNR qui tourne sans cesse entre les réacteurs et les usines de retraitement (ces fameuses 1000 tonnes de plutonium pour 60 réacteurs). Ici, vous avez la radio-toxicité du cœur : en rouge sans transmutation, en orange avec. La radio-toxicité est exprimée en Sv/GWe.an.

Quand vous avez un facteur 10 000, cela signifie simplement que si on arrête un réacteur dans 10 000 ans, la radio-toxicité de son combustible contenant les 20 tonnes de plutonium sera équivalente à la somme de tous les déchets qu'il aura produits pendant 10 000 ans.

Le cœur est donc 10 000 fois plus radiotoxique que les déchets qu'il produit chaque année. Cela signifie que les déchets produits pendant 10

000 ans sont équivalents à la radio-toxicité du cœur le jour où on arrête la filière. La critique de la fuite en avant du nucléaire mise en avant par les écologistes n'est pas complètement infondée : on se focalise beaucoup sur la production de déchets mais on oublie que pour faire fonctionner un RNR, on a besoin de 20 tonnes de plutonium et que, le jour où on arrête, la gestion de ce cœur de plutonium sera bien plus compliquée que celle de la totalité des déchets produits auparavant. Brutalement, en un an, vous avez le cœur sur les bras (voire l'ensemble des cœurs)...

### **Après Fukushima**

Après Fukushima, la Chine et l'Inde ont dit que ça ne changeait pas grand-chose et qu'elles allaient continuer leur programme de développement du nucléaire. Je pense qu'il n'est pas du tout sûr que le déploiement du nucléaire s'arrête après Fukushima. Il est probable qu'il sera ralenti voire retardé dans les pays en voie de développement.

La question du recours à la régénération est quand même posée : est-ce qu'on a besoin de réacteurs à neutrons rapides dans les 40 – 50 ans qui viennent ? Ce n'était pas du tout évident avant Fukushima, ça s'imposait uniquement si le nucléaire se développait d'un facteur 10. Ce n'est plus du tout évident depuis Fukushima et je dirais que le statut du plutonium qui est un point assez important, est plus que jamais ambigu. Si le nucléaire stagne pendant 200 ans, le plutonium est un déchet. S'il continue, ce n'est pas un déchet. Mais si c'est un déchet, c'est le déchet majeur en termes de risque radiotoxique, radioactif, prolifération, chaleur résiduelle etc.

Je rebondis sur une des questions posées précédemment quant à la communication : j'ai quand même une critique majeure à formuler à l'encontre de la communication du nucléaire sur le plutonium. Elle le passe parfaitement sous silence du fait que la loi dit que le plutonium est une matière valorisable, il ne rentre donc pas dans le débat public. On n'a même pas le droit d'en parler et je trouve que cela est gênant. Ceci pour susciter des questions, vous l'avez compris ; je m'arrête là.