

Nouvelles Visions
Pour une société de la connaissance

Une étude de la FONDATION
CONCORDE (*)

LE NUCLEAIRE
DU FUTUR

Un atout de
développement durable

Mars 2008

(*) Avec le concours d'universitaires, d'élus et d'hommes et de
femmes de l'entreprise.

Rapporteur : Alexandra Pugliese

Dossier édité par la Fondation Concorde

Toute correspondance est à adresser au :

9, rue de Téhéran – 75008 Paris

Tél : 01.45.61.16.75

Fax : 01.45.61.15.19

Email : info@fondationconcorde.com

www.fondationconcorde.com

Directeur de la publication : M. Rousseau

les PME/PMI du nucléaire à produire de la croissance et à organiser formellement les réseaux qui les lient aux grandes entreprises afin de mieux pénétrer les marchés de nos pays clients.

PREAMBULE

Dans la conduite de sa politique pour la sécurité énergétique, notre pays s'est distingué en particulier dans la maîtrise de l'énergie nucléaire.

On constate aussi que les progrès technologiques dans ce domaine ont progressivement affaibli les positions s'opposant à cette filière.

L'une des critiques centrales des détracteurs du nucléaire n'a aujourd'hui plus lieu d'être : le recyclage des déchets radioactifs -qui auraient pu devenir le lourd héritage de sociétés imprévoyantes-, est devenu un atout dans la mesure où la conversion en nouveau carburant recyclé assure désormais l'avenir de cette source d'énergie dans un monde menacé par la pénurie des ressources.

À l'échelle du siècle, il s'agit donc d'une source d'énergie durable qui devrait permettre aux sociétés et à l'économie mondiale de se développer tout en respectant les objectifs climatiques les plus exigeants. Ce qui aujourd'hui n'est pas un mince avantage.

D'autre part, les avancées technologiques et les programmes de recherche en cours assurent désormais une sécurité quasi-totale au fonctionnement des centrales et d'excellentes capacités de confinement en cas d'accident, réduisant

l'argument de « dangerosité ». Ainsi levé l'un des obstacles majeurs à l'adhésion des populations, la filière peut prétendre répondre durablement à nos besoins.

Le talent de nos ingénieurs, l'expertise de nos entrepreneurs et de nos groupes industriels, tout comme la persévérance de nos décideurs politiques, auront raison des obstacles dressés par la passion et par la peur.

En faisant mieux comprendre ce qu'est « le nucléaire du futur », nous souhaitons contribuer à renforcer le leadership de notre pays dans ce secteur essentiel pour notre avenir économique et notre indépendance.

Ce document se veut donc un éclairage simple et documenté sur l'évolution technologique de la filière nucléaire ces dernières années, et ce qui est à prévoir d'ici 2040.

aujourd'hui s'orienter vers la Finance ou le Conseil, bien plus rémunérateurs.

Nos universités, d'autre part, devraient pouvoir concourir à la recherche nucléaire, comme à la stratégie géopolitique de notre pays. Sur le modèle d'institutions comme la School of International & Public Affairs de la Columbia University à New York, dotée d'instituts de recherche spécialisés (Center for Energy, par exemple) et finançant les travaux des meilleurs analystes dans ce domaine, nos universités doivent à l'avenir être en mesure d'attirer les plus grands spécialistes sur le sol du champion industriel du nucléaire qu'est la France.

Nous proposons ainsi qu'un groupe de travail réunissant des responsables des grandes entreprises du secteur, des experts et des universitaires soit créé auprès du ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, avec pour objectif de mettre en place les cadres et les moyens de formations d'ingénieurs et de chercheurs à la hauteur de nos ambitions.

Enfin, les grands acteurs du nucléaire s'appuient sur des pôles de compétitivité qui rassemblent organismes de R&D et industriels, le plus souvent des PME/PMI organisées en nébuleuses sur ces sites (complexe de Marcoule dans le Gard, du Tricastin, pôle de compétitivité TRIMATEC). Ces PME ont acquis un savoir-faire en matière d'ingénierie, de déconstruction, de génie civil ou encore d'assainissement ; des expertises liées à l'ancienneté des programmes nucléaires français et au refus de l'abandon des dits programmes au cours des deux dernières décennies. Aussi, il faut encourager

CONCLUSION ET PROPOSITIONS

Le nucléaire, une chance pour l'emploi

Le rôle-pilote international que continuera de jouer la France dans les prochaines années en matière de nucléaire pose la question des débouchés économiques pour notre pays. Nos entreprises du nucléaire, pionnières et implantées dans de nombreux pays offrent des opportunités de développement et d'emploi (plus de 8000 embauches par an chez Areva) qui ne peuvent être ignorées des politiques économiques et sociales.

Or la France rencontre des limites sur deux aspects liés à l'emploi du nucléaire : rémunération et formation.

Rémunération tout d'abord : la main-d'œuvre et les sous-traitants de nos champions énergétiques ne sont pas, en l'état actuel des choses, rémunérés de manière compétitive vis-à-vis de nos concurrents internationaux. Si la France souhaite intéresser citoyens et travailleurs à son avenir nucléaire, il semble impératif d'assurer des revenus stables et relativement élevés pour des personnels de plus en plus qualifiés. Nos ingénieurs doivent être intéressés à des carrières dans l'énergie afin d'assurer une relève qui préfère

SOMMAIRE

INTRODUCTION	6
Le nucléaire dans le mix énergétique du futur	14
Le nucléaire, champion écologique	14
Un nucléaire toujours plus sûr	16
La question des ressources	22
La course mondiale à l'uranium	22
La France et le nucléaire: un rôle-clé sur le plan international	25
Le rôle stratégique de la France	25
Le Forum Génération IV	28
Pourquoi la France a un rôle de premier plan à jouer	30
CONCLUSION	32

INTRODUCTION

La Troisième génération : une étape incontournable

De la Troisième génération...

La Troisième génération est aujourd'hui prête à prendre le relais du parc existant. Plus particulièrement, l'EPR (European Pressurized Reactor) développé par Areva est en mesure de répondre le plus efficacement possible aux besoins d'extension du parc nucléaire mondial.

La Troisième génération a d'autre part renforcé les dispositifs de sûreté des parcs electro-nucléaires, réponse indispensable et efficace à la catastrophe de Tchernobyl (1986).

La génération III présente toutefois des faiblesses quant à l'utilisation du potentiel énergétique des ressources en uranium. En effet, le plutonium produit à travers un premier passage du MOX (Cf. *La question résolue du traitement des déchets : horizon 2040*) en réacteurs recèle encore beaucoup de matière première fissile susceptible de constituer à nouveau du combustible. Il y existe donc une possibilité de « recycler plus » de combustible usé, et donc d'effectuer des économies plus importantes de matière première.

internationale, de promouvoir une forme efficace de co-développement, et d'installer durablement la référence industrielle française. La France est d'ores et déjà engagée dans tous les partenariats multilatéraux et bilatéraux avec les grands pays du nucléaire, et joue un rôle pilote sur la scène internationale. Pour conserver cette position, il faudra continuer à faire les bons choix : toujours rester à la pointe de la R&D, tout en donnant à notre industrie la capacité de rester durablement compétitive.

Les efforts réalisés dans cette direction par la nouvelle Présidence attestent de la volonté de développer l'influence française au moyen du nucléaire : les contrats et accords de coopération signés avec la Chine, le Maroc, et plus récemment avec d'autres pays du pourtour méditerranéen, ouvrent aujourd'hui de nouveaux horizons à notre pays.

Pourquoi la France a un rôle de premier plan à jouer

La France s'est historiquement imposée en championne du nucléaire. Une position qui a fait couler beaucoup d'encre dans le passé, mais qui représente aujourd'hui une chance géostratégique, politique et diplomatique.

Car dans le domaine industriel, notre pays a vu naître l'un des géants du nucléaire : AREVA, seul groupe impliqué dans toute la chaîne de production de l'électricité nucléaire, de l'extraction à la production de combustible, en passant par la conception et la construction des centrales. Un avantage de taille face à ses concurrents étrangers, souvent spécialisés dans un seul maillon.

Dans le domaine de la recherche, le Forum International GEN IV est actuellement présidé par la France, en la personne de Jacques BOUCHARD, précédemment Directeur de l'énergie nucléaire au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). Cela a renforcé la position déjà dominante de la France dans la coopération internationale : dotée de centres de recherches d'excellence (leadership du CEA) et forte d'une industrie nucléaire puissante (position dominante d'Areva, expertise d'exploitant d'EDF), la France fait aujourd'hui figure de pionnier du nucléaire et possède une avance considérable qu'il faudra s'attacher à conserver dans les années à venir.

L'avance française dans le nucléaire est l'opportunité de renouveler le rôle diplomatique français sur la scène

...à la Quatrième génération

Aussi, la Quatrième génération de réacteurs devrait-elle permettre de brûler la quasi-totalité des noyaux d'uranium naturel, et donc d'exploiter au maximum les potentialités du combustible de l'énergie atomique.

Par suite, la question du traitement des déchets sera en partie résolue par le traitement recyclage, dit « cycle fermé », par opposition au cycle ouvert dans lequel le combustible une fois passé en réacteur est considéré comme déchet ultime. Ces avancées en matière de traitement des déchets ont été encadrées par deux textes législatifs en France : la loi du 30 décembre 1991, qui a orienté les recherches sur la gestion de ces déchets, et la loi du 28 juin 2006 qui a plus récemment établi un calendrier relatif aux résultats de la recherche sur la gestion durable des déchets, et la mise en œuvre de ces solutions.

Sur le plan international, la coopération des grands pays du nucléaire au sein du Global Nuclear Energy Partnership (GNEP)¹, sur initiative du Department of Energy (DOE) américain, vise à créer un groupe d'Etats assurant la gestion des combustibles usés afin de permettre un accès toujours plus large à l'énergie nucléaire dans le monde, tout en

¹ Les Etats-Unis, la France, le Japon, la Grande-Bretagne, la Russie, la Chine et l'Inde sont membres du GNEP.

limitant encore davantage les risques de prolifération liés à l'accès aux technologies de l'enrichissement.

La France y soutient une démarche progressive, qui mettrait en service des usines de retraitement dites de « Génération 3 » dans un premier temps, afin d'assurer le recyclage du combustible utilisé dans les réacteurs actuels.

A l'horizon 2040, la génération IV offrira des perspectives durables à l'énergie nucléaire, par l'utilisation optimale des ressources en uranium et plutonium. Cela nous permettra de faire face à la raréfaction des ressources, concomitante à la progression de la demande mondiale.

Des objectifs communs pour un enjeu mondial

Les objectifs établis par le GIF forment un cahier des charges qui définit des objectifs conformes au développement durable :

- Compétitivité économique par rapport aux autres sources de production d'électricité,
- Sécurité au moins égale aux réacteurs de 3^{ème} Génération,
- Préservation des ressources,
- Réduction des déchets ultimes,
- Résistance accrue à la prolifération et aux agressions externes.

De cette façon, le nucléaire du futur devrait s'adapter mieux encore à l'évolution des besoins des sociétés.

Une convergence des programmes internationaux de R&D

Ce regroupement des forces des plus grands pays nucléaires en un système de coopération dans la Recherche & Développement permet la convergence des objectifs du nucléaire du futur, et la mutualisation des outils et moyens afin d'éviter la duplication des recherches.

champion des pays polluants (le pays est obligé de réduire de 40% ses émissions d'ici 2020 afin de respecter les dispositions du traité de Kyoto) reste un paradoxe difficilement tenable. L'Allemagne, notre partenaire historique, doit revenir dans la bonne voie d'un nucléaire qui a réglé ses principaux problèmes. La Fédération de l'industrie allemande n'a pas manqué de souligner que le démantèlement des centrales était paradoxal face à une politique de développement durable. C'est sans aucun doute l'un des grands enjeux industriels européens de ces prochaines années.

Le Forum Génération IV

Treize grandes nations pour la recherche nucléaire

Le Forum International Génération IV (GIF ou GEN IV) a été créé en 2001 à l'initiative du Department of Energy (DOE) américain : Etats-Unis, France, Japon, Corée du Sud, Argentine, Brésil, Suisse, Afrique du Sud, Royaume-Uni, Canada, Union Européenne (via Euratom en tant qu'observateur) -puis Russie et Chine, entrées en 2006- ont co-signé une Charte de Coopération pour la Recherche & Développement de systèmes nucléaires de nouvelle génération (« Génération IV »). L'accord-cadre a été signé le 25 février 2005 à Washington D.C.

encadré 1

L'évolution du nucléaire depuis 1963

L'atome a fait l'objet de nombreuses découvertes à partir du début du XX^{ème} siècle. Or il faudra attendre 1942 pour que la première expérience dans le domaine du nucléaire civil ait lieu, bien après la mise en œuvre du nucléaire militaire. Après une décennie d'expérimentations américaines et russes, le nucléaire ne rentre dans l'âge industriel qu'à partir des années soixante. La crise du pétrole de 1973 accélère l'industrialisation du nucléaire, dès lors considéré comme une alternative sérieuse : « l'or noir » est en effet devenu source d'instabilité et de dépendance (hausse des prix, tensions géopolitiques exacerbées jusqu'à la Guerre du Golfe et au-delà). La France, comme la Russie ou le Japon, se dote alors rapidement d'un parc nucléaire pour la production de son électricité, tandis qu'une fraction des opinions publiques freine cette dynamique dans d'autres pays, à l'exemple de la Suède qui met alors un terme à son programme.

On peut aujourd'hui proposer une chronologie des types de réacteurs expérimentés, puis mis en service depuis les années soixante, ainsi que les projets à venir:

- GENERATION I (1963 à 1994): Réacteurs UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz)
- GENERATION II (depuis 1977) : Réacteurs REP (Réacteurs à Eau Pressurisée)

- GENERATION III (à partir de 2015) : Réacteurs EPR optimisés (European Pressurized water Reactor)
- GENERATION IV (à partir de 2030-2050) : Réacteurs à neutrons rapides et à neutrons thermiques, dont 6 concepts sont actuellement à l'étude dans le cadre du Forum Génération IV, rassemblant 13 pays.

Aujourd'hui terminée, la première phase de production telle que nous l'avons connue de 1963 à 1994 a révolutionné notre rapport à l'énergie : **le nucléaire représente désormais plus de 78% de la production d'électricité en France**, l'un des taux les plus élevés au monde.

D'importants programmes de Recherche et Développement permettent en outre d'améliorer constamment la technologie du nucléaire.

La France fait véritablement figure de pionnier.

Quatre générations historiques

La Première génération (années 50-60) a rationalisé et développé la production d'électricité nucléaire dans les pays développés. La filière UNGG (Uranium naturel, Graphite, Gaz) fut le cycle de production prépondérant en France.

Les positions nucléaires en Europe

La production énergétique européenne est nucléaire à hauteur de 30%. La France et la Lituanie font encore figure d'exception, puisque toutes deux obtiennent plus de 78% de leurs électricités respectives grâce au nucléaire –un pourcentage bien au-delà de la moyenne européenne, et a fortiori mondiale.

Certains pays opèrent quant à eux un « retour » récent au nucléaire, après une période de prudence, voire de rejet. Le programme d'abandon progressif du nucléaire civil décidé à la fin des années 90 par voie référendaire en Suède est aujourd'hui remis en cause : le pays a décidé de prolonger l'existence de ses centrales de 40 à 60 ans, et d'adopter un moratoire sur l'abandon du nucléaire. En effet, tous les sondages d'opinion montrent qu'une grande majorité de Suédois sont désormais favorables au maintien de l'option nucléaire.

De même en Italie où, après les politiques farouchement anti-nucléaire menées depuis la fin des années 80, le pays revient discrètement dans le concert des nations « pro nucléaires », et envisage même d'acquiescer une part de l'EPR (évaluée aux alentours de 12,5%).

Enfin, l'Allemagne a adopté une position pour le moins ambiguë : partenaire industriel d'AREVA à travers AREVA-NP (ex-FRAMATOME), elle a décidé en 1998 de suspendre l'activité de ses centrales lorsque celles-ci arriveraient en fin de vie, au profit essentiellement du lignite, très polluant. Dans un pays aussi sensible à l'environnement, être le

Quant aux pays émergents, Chine et Inde en premier lieu, ils amorcent des programmes nucléaires particulièrement ambitieux d'ici 2030. Aussi, en ce qui concerne la Chine, la World Nuclear Association annonce plus de 116 projets de réacteurs –dont deux ont été vendus par AREVA lors de la visite du Président Sarkozy en novembre 2007. La demande chinoise en combustible va donc exploser, et a fait l'objet d'un autre contrat record lors de ce même voyage : la fourniture en uranium jusqu'en 2026.

Il faudra aussi compter avec la Russie, qui relance son programme nucléaire, ou encore les Etats-Unis, qui prévoient l'installation de trente réacteurs d'ici 2030 –dont plusieurs devraient être des EPR.

Le cas du Moyen-Orient atteste, quant à lui, de l'engouement pour le nucléaire : « la terre de l'or noir » envisage désormais l'après pétrole, préoccupée désormais par l'assèchement des ressources et désireuse de réserver une part importante de la production de pétrole à l'exportation. Aussi, les deniers du pétrole font de plus en plus l'objet d'investissements dans le nucléaire, et tentent d'assurer l'avenir énergétique de ces grands consommateurs d'électricité (Emirats Arabes Unis, Egypte).

Les états du pourtour méditerranéen sont eux devenus des partenaires privilégiés des industriels français : le lancement du programme nucléaire civil marocain donne lieu à un partenariat étroit entre les deux pays.

La Deuxième génération (entrée en fonction dans les années 70 à 90) est actuellement en service : les réacteurs REP (Réacteurs à Eau sous Pression) dominent le marché mondial (3 réacteurs sur 5) et sont presque uniquement consacrés à la production électrogène. D'autres types de réacteurs (à eau bouillante, au gaz ou encore à eau lourde) sont exploités respectivement aux Etats-Unis, au Royaume-Uni et au Canada.

La Troisième génération est actuellement en chantier dans l'objectif d'une mise en service d'ici 2015 : elle comprend en particulier l'EPR franco-allemand² (European Pressurized water Reactor), dont le premier prototype est en cours de construction en Finlande.

Enfin, la **Quatrième génération** est à l'étude pour une mise en service industrielle vers 2040. Il s'agira pour ces réacteurs de permettre, outre la production d'électricité, la génération de chaleur (chauffage urbain, applications industrielles, dessalement d'eau de mer, comme cela sera envisagé au Maroc).

Cette génération IV devrait nous conduire en toute sécurité vers l'économie des ressources de matière première.

² L'EPR a été développé dans les années 1990 par Areva-NP (ex-Framatome), société commune du Français Areva et de l'Allemand Siemens AG.

encadré 2

Comprendre la notion de filière et de spectre neutronique

- le combustible : **l'uranium** (ou parfois le plutonium) est introduit dans le cœur du réacteur où se déroulent les réactions de fission

- le modérateur (réacteurs à spectre thermique): c'est un matériau à noyaux légers, comme **le graphite** ou **l'eau**, qui fait contrepoids avec le combustible (noyaux lourds) afin d'atteindre une vitesse de fission efficace.

- le caloporteur: c'est le fluide qui évacue du cœur l'énergie thermique obtenue par fission et la transporte vers les systèmes qui la rendront exploitable (sous forme d'électricité, mais aussi de chaleur dans certains cas) ; Le caloporteur peut donc être l'eau (qui peut aussi jouer le rôle de modérateur dans les réacteurs à eau), un métal liquide, ou du gaz.

Le spectre neutronique est, quant lui, la distribution de neutrons (énergie) présents dans le cœur d'un réacteur (par fission du combustible). Le choix de la vitesse de cette distribution permet de former 2 grandes familles de filières :

- Les filières à spectre neutronique thermique, qui font le choix de ralentir les neutrons lors de la fission afin d'atteindre un équilibre thermique.

La France et le nucléaire : un rôle-clé sur le plan international

Le rôle stratégique de la France

Les positions nucléaires dans le monde

De manière générale, on peut parler d'une reprise mondiale du nucléaire, qui fait désormais figure de solution durable et incontournable pour répondre aux besoins croissants d'électricité en respectant les exigences environnementales de réduction des émissions de CO₂. Ainsi, le nucléaire représente aujourd'hui 17% de la production mondiale d'électricité. Compte tenu des besoins de plus en plus grands et pressants des pays émergents, le pourcentage de la production mondiale devrait augmenter dans les 30 à 50 prochaines années. En ce qui concerne les pays développés ayant déjà fait le choix du nucléaire, il s'agira de renouveler et d'accroître leur puissance de production au moyen de technologies toujours plus avancées.

géopolitique qui émerge du « déplacement » de la matière première dans des pays non pétroliers.

Mais n'oublions pas que 15 à 20 années sont nécessaires afin d'ouvrir et exploiter une mine, et que des ressources disponibles à long terme dépendent des contrats commerciaux établis aujourd'hui. La question de la gestion des ressources est donc centrale, et bénéficie de la plus grande attention de la part des acteurs de la filière.

D'où l'importance de la R&D dans le domaine du recyclage du combustible utilisé, ce qui permettrait d'économiser quasiment à l'infini les réserves évaluées comme finies aujourd'hui.

- Les filières à spectre neutronique rapide, qui laissent au contraire les neutrons s'échapper à leur vitesse naturelle (environ 20,000 Km/s).

Aujourd'hui, la quasi-totalité des réacteurs en exploitation dans le monde a fait le choix du spectre thermique.

Dans le cadre de l'expérimentation actuelle, la priorité est donnée, en France, à la recherche sur les réacteurs dits à « neutrons rapides » (RNR), comportant des possibilités de recyclage du combustible. Tandis qu'en Russie, en Chine et en Inde, des prototypes RNR existent déjà mais ne satisfont pas à l'ensemble des critères du Forum Génération IV. Le CEA a été chargé de concevoir un tel prototype à l'horizon 2020. Des verrous technologiques doivent encore être franchis pour lancer des prototypes de réacteurs satisfaisant à 100% le cahier du Forum Génération IV.

Le nucléaire dans le mix énergétique du futur

Le nucléaire, champion écologique

Le co-fondateur de *Greenpeace*, Patrick Moore, l'avouait encore récemment : « les mouvements verts doivent revoir leur position concernant la source d'énergie qui peut préserver notre planète ». Le nucléaire a su prouver son efficacité et sa durabilité.

À l'heure des quotas en matière d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂), l'atome est devenu une solution performante et propre : **il dégage aussi peu de CO₂ que l'énergie éolienne**, tout en assurant une production d'énergie dans des quantités plus élevées et plus constantes face à la demande croissante, comme nous le verrons plus loin.

Force est de constater que les mentalités ont évolué au sujet du nucléaire : il est non seulement prouvé aujourd'hui que les rejets de CO₂ sont très faibles, mais aussi que la gestion des déchets est réalisée au moyen de solutions durables et sécurisées.

En premier lieu, les ressources « classiques » connues nous permettent d'envisager le bon fonctionnement de la production nucléaire dans les 60 années à venir, au rythme actuel. Cela sans compter le recours aux réacteurs à neutrons rapides qui permettront le recyclage du plutonium contenu dans le combustible déjà utilisé³. Les ressources en uranium pourront donc, grâce à cette avancée technologique majeure, couvrir nos besoins pour plusieurs millénaires.

Les plus importants gisements d'uranium sont aujourd'hui situés au Canada, en Australie et au Kazakhstan, représentant à eux trois 50% des ressources identifiées. Le Niger figure lui aussi parmi les plus importants extracteurs. Fort d'un partenariat avec Kazatomprom (Kazakhstan), le géant français Areva sera par exemple en mesure de produire plus de 12 000 tonnes d'uranium en 2012 (contre seulement 5 500 en 2006). Les principaux acteurs du nucléaire au niveau mondial –Areva en tête– sont ainsi conduits à sécuriser leurs approvisionnements auprès des pays producteurs. Aussi, la prospection mondiale est aujourd'hui relancée.

La « diplomatie de l'uranium », alors que sont d'ores et déjà mis en oeuvre des projets miniers en Namibie (2009), en Afrique du Sud (2011) ou encore en République centrafricaine (2012), doit prendre en compte la nouvelle donne

³ Le plutonium représentant 99,3% de l'uranium minéral, cela revient donc à diviser le besoin en matière première par un ordre de grandeur de 50 à 100.

La question des ressources

La course mondiale à l'uranium

L'industrie nucléaire bénéficie d'un regain d'intérêt partout dans le monde, bien que l'Europe reste paradoxalement timorée. Amenuisement des réserves de pétrole et flambée du prix du baril d'un côté, prévisions du besoin énergétique mondial -qui devrait doubler d'ici 2030- de l'autre, ajoutés à la dimension écologique, font de l'énergie nucléaire une nouvelle alternative très attractive aux énergies fossiles afin de produire de l'électricité partout dans le monde.

Rappelons que les modes de production d'énergies fossiles entrent aujourd'hui dans une logique de « réserve finie » : les réserves de pétrole ou de gaz connaissent une limite qui, certes, recule en fonction des investissements consentis à l'exploration, mais qui connaîtra un terme plus rapide que celui de l'uranium.

Les ressources en uranium, au contraire, sont loin de représenter une limite au développement du nucléaire.

La question résolue du traitement des déchets : horizon 2040

Alors que dans nombre des autres pays nucléaires, le combustible usé est traité comme déchet radioactif, la France a su, depuis les années 80, mettre en œuvre des techniques de retraitement efficaces. Le combustible MOX (Mixed OXide : mélange d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium) permet l'extraction de l'uranium et du plutonium présents dans le combustible dit « usé » (c'est à dire déjà utilisé dans un réacteur). Ainsi, l'énergie encore présente dans ce combustible utilisé n'est pas gâchée, et **l'extraction du plutonium, principal facteur de radioactivité à long terme, réduit considérablement la nuisance des déchets ultimes obtenus.**

Le traitement des déchets fait toutefois l'objet des recherches les plus avancées dans le cadre des travaux du GIF (Generation IV International Forum) sur la Quatrième génération. L'objectif est clair : réduire quantité et toxicité des déchets produits par des réacteurs eux-mêmes moins consommateurs d'uranium.

La transmutation permet de traiter des produits très radioactifs et/ou à durée de vie très longue, autres que le plutonium et l'uranium déjà retraités (*voir plus haut*). Les études du CEA s'attachent à trouver comment séparer ces éléments (les actinides mineurs) du reste des produits du combustible usé, et comment les retraiter afin de modifier leur toxicité et de réduire leur longévité. Aujourd'hui au point en laboratoire, la technique est travaillée dans le sens

d'une efficacité à échelle industrielle. Quant au stockage, les recherches vont dans le sens de la flexibilité industrielle.

Un nucléaire toujours plus sûr

Prévenir les accidents et limiter leurs conséquences

L'une des grandes priorités du rassemblement des pays exploitant le nucléaire, réunis au sein du Forum Génération IV est, de toute évidence, la sûreté des installations. Des progrès gigantesques ont été réalisés sur la Troisième Génération, pour laquelle sûreté et performance ont été systématiquement renforcées, grâce à la conjonction de plusieurs niveaux de sécurité visant à prévenir l'accident grave et à en diminuer l'impact externe éventuel (pas d'évacuation des populations, par exemple).

La sûreté nucléaire revient à garantir le confinement de l'activité du cœur d'un réacteur, dans lequel des « séquences » parfois complexes peuvent se révéler dangereuses. Aussi oriente-t-on les recherches en direction d'une plus grande maîtrise de la réactivité, c'est à dire du comportement neutronique, et du refroidissement, donc de l'activité thermique du réacteur. Tout cela est relié au choix du type de caloporteur, de combustible et de spectre neutronique.

réserves abondantes et durables, réparties de manière homogène sur le globe, donc une tranquillité géostratégique assurée (contrairement au pétrole ou au gaz). Beaucoup d'atouts aussi dans les possibilités de transformation de la houille, à la fois bonne pour la production d'énergie et de nombreux autres produits dérivés.

Cependant **le charbon est l'énergie la plus émettrice de CO₂**, son exploitation reviendrait donc à se positionner contre la tendance mondiale de réduction des émissions de gaz à effet de serre. De nombreuses recherches avancent la possibilité de rendre le charbon « propre » grâce à un processus de captation des émissions de CO₂ durant la combustion, et de stockage en couches profondes dudit résidu. **Mais à raison de plusieurs dizaines de milliards de tonnes à enfouir par an, à une estimation moyenne de 5€ par tonne, cette solution coûte beaucoup trop cher pour demeurer compétitive, les procédés technologiques n'étant pas encore à maturité (et risquant de ne pas l'être avant 2020).** Polluant et cher, le charbon est donc une solution controversée.

Les énergies issues de la biomasse : vers des carburants issus de la biomasse non vivrière

Les recherches sont désormais étendues à de nouvelles sources d'énergie. Les énergies dites issues de la biomasse, ou agroc carburants donnent de nouvelles perspectives écologiques : le procédé naturel photosynthétique est simplement systématisé dans un processus industriel, afin de produire dans des quantités plus importantes. La matière première, elle, va du bois aux céréales, et jusqu'à la canne à sucre.

Or, un problème majeur se pose: les ressources sont d'ores et déjà plus que limitées sur le marché mondial. De tels procédés énergétiques donneraient lieu à une flambée des prix des céréales, ou à des déforestations accélérées dans les parties du globe les plus sensibles (le Sud en particulier). L'Institut International de la Recherche sur les Politiques Alimentaires (Ifrpri) nous prévient : d'ici 2020, nous pourrions assister à une augmentation de l'ordre de 72% du prix des céréales si les plans de développement de la bioénergie sont maintenus. Une situation qui aggraverait de fait celle que nous connaissons déjà en matière alimentaire.

Le charbon : une alternative très polluante, et sans procédé de capture-séquestration du CO2 à maturité.

Le charbon refait surface en réaction à l'amenuisement des réserves naturelles de pétrole. Encouragée par les grands producteurs, tels que la Chine, l'alternative charbon représente une concurrence réaliste pour le nucléaire : des

Une politique de sécurité rigoureuse

La sécurisation doit pouvoir assurer la protection des installations nucléaires en cas d'évènements naturels (séismes, tsunami, inondations...) ou terroristes. L'une des solutions à l'étude consiste à enterrer les bâtiments des futures centrales afin de réduire l'impact d'une attaque d'avion gros-porteur, par exemple. Relié à la problématique de la non-prolifération, l'aspect géostratégique est très présent dans les travaux de recherche en cours.

Dans le même domaine, le recrutement du personnel des centrales, tout comme le transport des matériaux radioactifs, font l'objet de méthodes très rigoureuses.

La France, en sa qualité de pionnier, est en mesure de diffuser les bonnes pratiques dans d'autres pays souhaitant accéder au nucléaire. L'expérience et l'expertise en matière de sûreté et de sécurité font l'objet d'échanges internationaux, en réponse à des menaces toujours plus diversifiées.

Les limites des sources d'énergie alternatives

Les énergies nouvelles renouvelables sont complémentaires du nucléaire, et la France est engagée dans des programmes ambitieux de Recherche & Développement sur ces énergies, parfois dites aussi « alternatives ».

Les énergies renouvelables alternatives au nucléaire ne pourraient toutefois tenir lieu de véritables solutions de substitution à long terme. Dans la perspective d'une

production à très grande échelle, les solutions alternatives et renouvelables présentent des limites physiques qui les rendent inadaptées à une utilisation « en base ».

Les éoliennes : Une puissance nominale beaucoup trop basse

La technologie éolienne est, pour ainsi dire, ancestrale : les moulins à vent en furent la première application « industrielle ». L'énergie éolienne est aujourd'hui défendue à bien des égards : consommatrice de vent, donc d'une matière première non polluante, elle assurerait grâce à de gigantesques installations le plus souvent en mer, l'approvisionnement à moindres frais en énergie renouvelable (l'installation d'une éolienne d'une puissance nominale d'1 Mega Watt coûtant environ 1 million d'Euros).

Or les besoins prévisionnels en énergie sont infiniment supérieurs à ce que les parcs éoliens seraient susceptibles de produire, même en exploitation à plein régime. **Il faudrait 250 éoliennes en régime plein afin d'atteindre la même production d'énergie qu'une seule centrale nucléaire** : un rapport d'autant plus déséquilibré qu'il supposerait la présence de vent sans interruption sur une année entière. Or quand une centrale fonctionne 80% du temps sur une année, un parc éolien ne peut fonctionner que 30% du temps, phénomène dû à l'absence fréquente de vent.

Il en résulte donc une solution très limitée en termes de production en base, bien qu'elle demeure intéressante en

appoint. Un pari trop grand sur l'éolien reviendrait à sous-estimer la demande future en énergie, à fragiliser les réseaux de transport d'électricité interconnectés et à devoir solliciter en complément des sources de production d'électricité fossiles (charbon, gaz), émettrices de CO2.

L'énergie solaire : un équipement coûteux et polluant

L'énergie solaire est elle aussi très « en vogue » : le procédé de captation photovoltaïque permet de produire des quantités toujours plus importantes d'énergie à partir des rayonnements solaires. En outre, l'énergie solaire permet l'approvisionnement en énergie de lieux pouvant être très isolés ou au contraire très centraux, car les installations de captation sont adaptables (toitures en centre ville, installations en plein désert, etc.).

Or l'énergie solaire présente deux inconvénients, en outre liés : la fabrication de cellules photovoltaïques, composants principaux des installations de captation, est à la fois polluante et chère, malgré la baisse progressive des prix du solaire depuis le début des années 90. Une large diffusion du solaire photovoltaïque ferait nécessairement appel à des subventions publiques directes ou indirectes, étape indispensable afin d'intéresser les investisseurs privés.