De deux maux...

Burton Richter, lauréat du prix Nobel, fait le point des promesses et des problèmes de l'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire connaît actuellement une renaissance motivée par deux nécessités vaguement liées : celle de disposer d'une énergie plus abondante pour soutenir la croissance mondiale, et celle de combattre le réchauffement planétaire dû aux émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile.

Avec les combustibles actuels, la croissance économique accroît les émissions ; les émissions provoquent des changements climatiques ; ces changements nuisent à l'économie. Le nucléaire permet de sortir de ce cycle.

Les prévisions de demande d'énergie au XXIe siècle donnent toutes globalement la même réponse. L'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA), par exemple, montre, dans son scénario de croissance moyenne, une demande d'énergie primaire doublant d'ici à la moitié du siècle et doublant presque encore d'ici à la fin de ce siècle. D'ici à 2030, les pays en développement devraient, en ce qui concerne la consommation d'énergie primaire, dépasser les pays industrialisés. À elle seule, la Chine dépassera les États-Unis comme premier consommateur d'énergie, et les croissances économiques chinoise et indienne sont déjà supérieures à ce que prévoyait l'IIASA.

Des problèmes se font déjà sentir pour deux des trois combustibles fossiles. Le prix du pétrole a augmenté en flèche. La demande croît en moyenne d'environ 1,5 million de barils/jour par an, ce qui nécessite, tous les dix ans, la production d'une nouvelle Arabie saoudite.

Le gaz naturel ne manque pas, mais il existe des contraintes de transport. Son prix a également augmenté et atteint aujourd'hui le niveau sans précédent de 9 à 10 dollars par million de BTU.

Le seul combustible fossile qui soit abondant est le charbon. Il est, cependant, très polluant et il faut, pour protéger l'environnement, mettre en œuvre des moyens techniques onéreux.

On s'inquiète de plus en plus du réchauffement planétaire, et même les États-Unis ont finalement admis qu'il existait un problème. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat prévoit, en scénario normal, une concentration atmosphérique de dioxyde de carbone de 750 ppm à la fin du siècle, avec une augmentation consécutive de 2 à 5° C de la température mondiale (moins à l'équateur et plus aux pôles).

On peut sûrement s'adapter à cette augmentation si c'est par le bas et en douceur. Si c'est par le haut et qu'il s'ensuit une instabilité climatique, il faut s'attendre à d'importants troubles économiques et sociaux.

Il est trop tard pour empêcher un certain réchauffement planétaire, mais on peut limiter ses effets en abandonnant les combustibles fossiles. D'éminents écologistes, dans ce contexte, en sont venus à reconsidérer leur opposition au nucléaire. De deux maux, en effet, il faut choisir le moindre. Est-ce le réchauffement planétaire ou est-ce le nucléaire ?

James Lovelock (écologiste et auteur de la fameuse hypothèse Gaia), parmi d'autres, a opté pour le nucléaire. Lorsque l'intérêt économique et l'intérêt écologique pointent dans la même direction, les choses peuvent commencer à avancer. Tous deux, aujourd'hui, soulignent la nécessité d'une énergie non fossile. Le nucléaire est l'une des solutions.

Il ne peut pas représenter toute la solution, mais peut en former une importante partie si l'on peut convaincre le public

qu'il est sûr, que l'on peut éliminer les déchets en toute sûreté et qu'il n'accroît pas le risque de prolifération des armements.

Le potentiel de croissance du nucléaire

Quelque 440 réacteurs fournissent, dans le monde, 16% de l'électricité. Environ 350 d'entre eux sont situés dans des pays de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), fournissant 24% de leur électricité. Le pays où la part du nucléaire est la plus élevée est la France, avec 78%. Pour un écologiste, la France devrait être considérée comme un modèle pour le monde. Son intensité de dioxyde de carbone (CO_2 par unité de PIB) est la plus faible au monde. Si l'intensité du monde entier était aussi faible que celle de la France, les émissions de CO_2 seraient réduites de moitié et le réchauffement planétaire nettement ralenti.

Les projections de croissance du nucléaire sont aléatoires en raison de l'incertitude du coût des trois problèmes mentionnés plus haut : la sûreté, l'élimination des déchets et le risque de prolifération.

Sûreté : la nouvelle génération de réacteurs à eau ordinaire a été conçue pour être plus simple à exploiter et à entretenir que l'ancienne, et a été dotée de systèmes de sûreté passive plus nombreux.

Avec un solide cadre de réglementation et d'inspection, on peut assurer la sûreté des systèmes nucléaires. Sans un tel cadre, le risque croît. On ne peut confier à aucune industrie le soin de s'autoréguler lorsque les conséquences d'un accident dépassent le cadre de cette seule industrie.

Traitement du combustible usé : séparément, les trois principaux éléments du combustible usé posent peu de problèmes.

L'uranium seul, qui forme l'essentiel du combustible usé, ne pose aucun problème. Il n'est pas assez radioactif pour être inquiétant. Il contient plus d'uranium 235 que le minerai naturel et peut donc servir à l'enrichissement, voire être replacé dans les mines dont il provient.

Les fragments de fission, second élément le plus abondant, ne posent aucun problème scientifique ou technique. Il ne faut les stocker, pour la plupart d'entre eux, que quelques centaines d'années.

Il est facile de construire un solide confinement résistant le temps requis (si les Égyptiens ont pu construire des pyramides qui ont duré 6 000 ans, nous devrions pouvoir en faire au moins autant).

Le problème du combustible usé tient au 1% restant, composé de plutonium et d'actinides mineurs (neptunium, américium et curium). Certains de ces éléments ont une toxicité élevée et une longue durée de vie.

Il existe globalement deux façons de protéger le public contre ces matières : isoler celles-ci de la biosphère pendant des centaines de milliers d'années ou les détruire par bombardement de neutrons.

L'isolement est le principe qui sous-tend le système « d'élimination directe », que préconisent les États-Unis pour des raisons de prévention de la prolifération. Dans un monde qui posséderait un programme nucléaire très développé, je ne pense pas que ce système soit tenable.

Son problème tient à la fois à la perception publique, qui est un problème politique, et à ses limites techniques. Le premier problème technique tient à la chaleur qui se dégage pendant les 1 500 premières années de stockage, et qui limite la densité de matières que l'on peut placer dans un dépôt. La chaleur initiale que produisent les fragments de fission n'est pas difficile à traiter. La décroissance du plutonium 241 en américium 241, qui décroît ensuite en neptunium 237, est, pendant les 1 000 premières années, la principale source de chaleur. La capacité d'un dépôt sera déterminée par les limites d'élévation de la température de la roche du fait de cette source.

Le second problème technique tient aux rayonnements à très long terme. Ici, la même chaîne de décroissance plutonium-américium-neptunium maximise l'élément à longue période, obligeant à l'isoler de la biosphère pendant des centaines de milliers d'années.

Aux États-Unis, par exemple, si le nucléaire devait continuer de représenter 20% des besoins du pays en électricité jusqu'à la fin du siècle, le combustible usé nécessiterait, dans un scénario « d'élimination directe », neuf dépôts de la capacité de Yucca Mountain. Si le nombre de réacteurs devait y augmenter pour atteindre, d'ici au milieu du siècle, les 300 GWe projetés par l'étude du Massachusetts Institute of Technology (MIT), le pays devrait ouvrir un nouveau Yucca Mountain tous les six ou sept ans, ce qui serait une performance, car nous n'avons pas réussi à ouvrir le premier. Dans un monde recourant de façon généralisée au nucléaire, ce cycle ne semble pas tenable.

L'autre solution est un système de retraitement qui sépare les principaux éléments, traite chacun d'eux de façon appropriée et, de façon spécifique, celui qui présente les risques à long terme. Le système de retraitement le plus développé est celui de la France. Les Français fabriquent du combustible à oxydes mixtes (MOX) en séparant le plutonium (Pu) du combustible usé et en le mélangeant à une quantité appropriée d'uranium (U). L'uranium excédentaire est envoyé vers une usine d'enrichissement.

Les fragments de fission et les actinides mineurs sont vitrifiés en vue de leur entreposage en dépôt. Le verre utilisé pour la vitrification semble avoir une durée de vie

de plusieurs centaines de milliers d'années dans l'argile du dépôt français proposé.

La fabrication de combustible MOX et la vitrification ne résolvent, cependant, qu'une partie du problème. La question suivante est de savoir que faire du combustible MOX usé. On prévoit de le conserver non retraité en attendant la mise en service commerciale de réacteurs à spectre rapide. Ces réacteurs brûlent un mélange de plutonium et d'uranium 238 et peuvent, en principe, également brûler tous les actinides mineurs.

Il est possible de créer une sorte de programme de recyclage continu dans lequel le plutonium provenant du combustible MOX usé est utilisé pour lancer le système à spectre rapide ; le combustible usé provenant du système à spectre rapide est retraité ; tout le plutonium et les actinides mineurs retournent dans du nouveau combustible, etc. En principe, rien ne va dans un dépôt à l'exception des fragments de fission et ceux-ci n'ont besoin d'être stockés que quelques centaines d'années. Cela sonne bien en principe, mais il reste beaucoup à faire pour le mettre en pratique.

Prolifération : un important objectif de la communauté internationale est de prévenir la prolifération des armes nucléaires. Il est plus compliqué d'atteindre ce but dans un monde possédant un programme nucléaire élargi impliquant plusieurs pays. Il existe un risque de détournement de matières de qualité militaire à la fois en début de cycle du combustible (enrichissement de l'uranium) et en fin de cycle (retraitement et traitement du combustible usé). Plus le nombre d'endroits où cela s'effectue est élevé, plus la situation est difficile à surveiller.

Des programmes d'armement clandestins ont vu le jour à ces deux stades. Le Pakistan et l'Afrique du Sud, qui a renoncé à l'arme nucléaire dans le cadre d'un programme supervisé par l'AIEA, ont fabriqué leurs armes en début de cycle. La Libye faisait de même jusqu'à ce qu'elle abandonne, récemment, ses efforts.

On ne connaît pas bien les intentions de l'Iran. L'Inde, Israël et la Corée du Nord ont obtenu leurs matières de qualité militaire en fin de cycle, utilisant des réacteurs modérés par eau lourde pour produire le plutonium nécessaire.

Le niveau d'avancement technique de ces pays va de très faible à très élevé, or tous sont parvenus à leurs fins. La science qui sous-tend l'armement nucléaire est bien connue et les techniques ne semblent guère difficiles à maîtriser par la recherche interne ou l'acquisition illicite.

Il doit être clair que la seule façon de limiter la prolifération est de lier les États par des accords internationaux prévoyant des inspections effectives comme moyen de dissuasion et des sanctions réelles en cas de violation.

Nous, membres de la communauté scientifique et technique, pouvons donner aux diplomates les moyens de surveiller le respect des accords plus simplement et de manière moins intrusive. Ces techniques forment le cœur des systèmes utilisés pour détecter les activités de prolifération le plus tôt possible. Elles doivent permettre de détecter les vols et détournements de matières de qualité militaire ainsi que les installations clandestines qui pourraient être utilisées pour fabriquer de telles matières.

La mise au point de techniques avancées n'a pas bénéficié, ces derniers temps, d'un financement considérable. Il faudrait mettre en œuvre, à cet effet, un programme coordonné au plan international. Il faut que les techniques antiprolifération soient intégrées à la conception de tous les nouveaux réacteurs, usines d'enrichissement, usines de retraitement et sites de fabrication du combustible.

Des techniques non encore utilisées peuvent donner, dans certains domaines critiques, des résultats rapides. Dans une usine d'enrichissement, par exemple, il n'est pas long de vérifier que l'uranium 235 correspond aux chiffres déclarés. Un point sur lequel on s'interroge de nouveau est celui des mérites relatifs, en matière de résistance à la prolifération, du cycle du combustible unique et de diverses stratégies de retraitement.

Un groupe international d'experts a effectué, pour le Ministère américain de l'énergie, une analyse documentée dans un rapport publié en novembre 2004 et intitulé « An Evaluation of Proliferation Resistant Characteristics of Light Water Reactor Fuels ». Cette analyse attribue à chaque phase du cycle du combustible nucléaire une note de risque, puis totalise les risques.

Toutes les variantes de cycle unique et de retraitement obtiennent une note similaire. Le risque accru qui existe lorsque le plutonium est disponible en cas de retraitement est contrebalancé par le risque de détournement réduit qui existe pendant l'enrichissement — celui-ci étant moins important — ainsi que par l'obstacle radiologique qui survient après la seconde combustion et la difficulté accrue de fabriquer une arme à partir de matières de plus en plus dégradées.

Ces notes ne doivent pas être considérées comme des mesures précises. Tout ce qu'elles disent, c'est que pour des personnes sensées, le cycle unique n'est pas très différent du cycle avec retraitement.

Le directeur général de l'AIEA, Mohamed ElBaradei, et le président George Bush ont proposé de commencer à étudier sérieusement la perspective d'une internationalisation du cycle du combustible nucléaire. Dans un tel scénario, l'enrichissement et le retraitement s'effectuent dans certains pays — les pays fournisseurs. Les autres sont consommateurs. Les pays fournisseurs produisent le combustible nucléaire et récupèrent le combustible usé pour le retraiter, séparant les éléments en éléments éliminables et éléments recyclables.

Mis en œuvre avec succès, un tel programme présenterait d'énormes avantages pour les pays consommateurs, en particulier les plus petits. Ils ne seraient pas obligés de

construire des usines d'enrichissement ou de traiter ou d'éliminer le combustible usé.

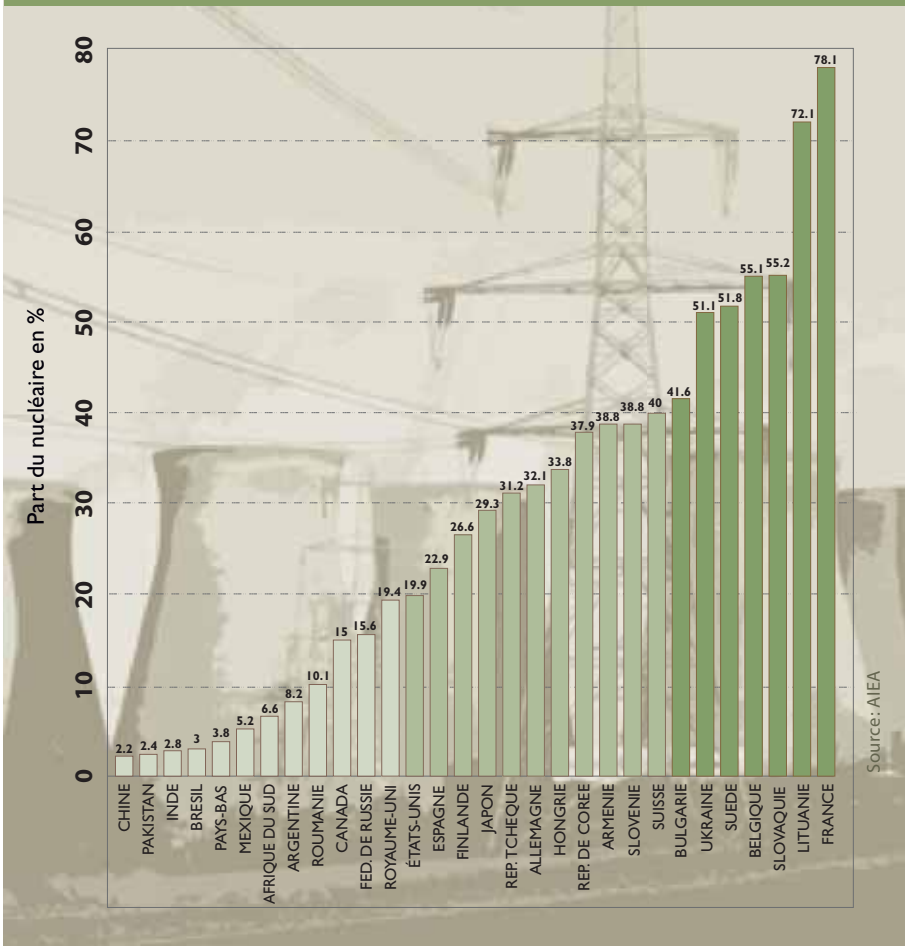
Aucune de ces activités n'est rentable à petite échelle et les petits pays ne disposent pas toujours de formations géologiques appropriées. En échange de ces avantages, les pays consommateurs renonceraient aux matières de qualité militaire utilisées en début et en fin de cycle du combustible.

Pour que cela fonctionne, il faut créer un régime international qui garantira aux pays consommateurs l'accès au combustible dont ils ont besoin. Cela ne sera pas facile et il faudra disposer, à cet effet, d'un ensemble de pays fournisseurs géographiquement et politiquement varié.

En ce qui concerne le risque de prolifération en fin de cycle, la tâche sera encore plus complexe. Il faut impérativement réduire ce risque car on a vu, avec la Corée du Nord, avec quelle rapidité un pays peut «s'affranchir» d'un accord international et concevoir des armes s'il dispose des matières requises. Ce pays s'est retiré au pied levé du Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires, a expulsé les inspecteurs de l'AIEA puis a retraité le combustible usé de son réacteur de Yongbyon, acquérant ainsi le plutonium nécessaire pour fabriquer une bombe en très peu de temps.

PART DU NUCLÉAIRE DANS LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Monde, 2004



Les pays fournisseurs qui devront récupérer le combustible usé à traiter ne le feront que s'ils disposent d'une solution au problème de l'élimination des déchets. En cas de généralisation du nucléaire, il va se produire, dans le monde, d'énormes quantités de combustible usé. Les projections mentionnées plus haut font état d'une capacité nucléaire de plus d'un térawatt (électrique) produisant plus de 20 000 tonnes de combustible usé par an.

Ce combustible usé contiendra quelque 200 tonnes de plutonium et d'actinides mineurs et 800 tonnes de fragments de fission. Le cycle unique ne pourra pas y faire face sans requérir un nouveau dépôt de la taille de Yucca Mountain tous les deux ou trois ans. Le retraitement, par recyclage continu dans des réacteurs rapides, permettra de faire face à ce scénario. Seuls les fragments de fission seront stockés en dépôt, où ils ne resteront que quelques centaines d'années au lieu de centaines de milliers d'années.

Pour résumer, le nucléaire est un important élément d'une stratégie qui vise à donner au monde les moyens énergétiques dont il a besoin pour développer son économie tout en réduisant la consommation de combustibles fossiles et les émissions de gaz à effet de serre. Pour y parvenir à grande échelle, il faudra progresser sur les plans à la fois physique et politique.

Nous, spécialistes de la physique, pouvons produire des réacteurs meilleurs et plus sûrs, de meilleures façons d'éliminer le combustible usé et de meilleures techniques de surveillance. La meilleure façon d'y parvenir sera d'opérer au plan international pour répartir le coût et dégager un consensus sur ce qu'il faut faire. Les pays seront plus à l'aise avec ce qui sortira de ces activités s'ils y participent.

S'il est souhaitable que l'action physique soit menée au plan international, l'action politique, elle, ne peut être menée que sur ce plan. L'AIEA semble être l'endroit idéal pour commencer et les premiers pas ont déjà été faits. J'attends avec impatience que d'autres, plus importants, suivent dans les deux domaines.

Burton Richter (brichter@slac.stan¬ford.edu) enseigne au Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) de l'Université de Stanford, centre qu'il a dirigé de 1984 à 1999. Il s'est vu attribuer le prix Nobel 1976 de physique avec Samuel C. Ting «pour leur contribution innovante à la découverte d'une particule élémentaire lourde d'un nouveau type».

Le présent article s'inspire du discours que l'auteur a prononcé au Forum scientifique de l'AIEA en septembre 2005. Pour de plus amples informations, consulter le site www.iaea.org. Les graphiques et tableaux qui illustraient le discours peuvent être consultés à l'adresse www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2005/SF_Presentations05/Session1/BRichter_IAEA_Session_1.pdf