

Marc de Andolenko*

LE NUCLÉAIRE DANS LA RESSOURCE ÉNERGÉTIQUE

Sans énergie, il n'y a pas de développement. Parmi les différentes formes d'énergie, on distingue les énergies primaires (telles que le charbon, le pétrole, le gaz...) des énergies secondaires, produites elles à partir des sources d'énergies primaires. Une des formes d'énergie secondaire la plus moderne et utilisée de nos jours est l'électricité. Les moyens aujourd'hui pour produire cette forme d'énergie sont très variés mais la plupart des unités de production utilisent des énergies primaires d'origine fossiles (pétrole, charbon...).

Il est de notoriété publique qu'un manque en énergies fossiles est à prévoir dans les années à venir ce qui pose la question du remplacement des moyens de production actuels. Par ailleurs, la production d'électricité, étant dominée par les carburants tels le pétrole et le charbon, est responsable à hauteur de 40 % des émissions de gaz à effet de serre, reconnus comme étant en grande partie responsables du dérèglement climatique actuel. Une prise de conscience grandissante sur l'impact des activités de l'homme sur le climat pousse les gouvernements à prendre des mesures pour lutter contre ce phénomène (Protocole de Kyoto, Plan National d'Allocation des Quotas (PNAQ) en Europe).

La situation peut se résumer ainsi : d'un côté, une consommation électrique qui va grimper en flèche du fait du nombre croissant

* Marc de Andolenko est président d'AREVA Chine.

d'individus dans les pays en développement voulant accéder à un meilleur niveau de vie et d'un autre côté, des contraintes environnementales et d'approvisionnement en combustibles qui poussent à changer drastiquement les moyens de production d'électricité.

Le nucléaire : une solution pour demain

La filière nucléaire répond à bien des problèmes précédemment soulevés et explique sa renaissance actuelle.

Tout d'abord, le projet « ExternE », démarré en 1991 par un consortium de chercheurs américains et européens, a pour but d'évaluer les impacts positifs ou négatifs sur l'environnement de chaque moyen de production d'électricité, aussi appelés externalités. Cette étude a révélé que le nucléaire, à égalité avec l'hydraulique et les énergies renouvelables, était un mode à privilégier du fait de son faible impact sur l'environnement et sur les populations.

Les réacteurs nucléaires ont eux aussi besoin d'un combustible : l'uranium. Cependant, les réserves de cette ressource se trouvent à 46 % dans des pays de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), plus stables politiquement, contre 6,5 % seulement pour le pétrole. Par ailleurs, les réserves en uranium sont aujourd'hui estimées à 4,7 millions de tonnes soit 70 ans de réserves au rythme de consommation actuelle, à comparer avec 40 ans de réserves pour le pétrole, 65 ans pour le gaz et 150 ans pour le charbon. A noter que ce chiffre pour le nucléaire est cependant calculé avec la technologie des réacteurs à eau actuels et que celui-ci peut être étendu à plusieurs milliers d'années du fait de la mise en service de réacteurs de technologie plus avancée.

Enfin, à noter qu'en plus de ces deux arguments, le nucléaire est très avantageux en termes de coûts d'électricité. En Europe, les prix « vus » par les utilisateurs se décomposent de la sorte : 65 % reflètent les coûts de production, 35 % les coûts d'acheminement et 5 % les coûts d'alimentation. Le coût de production s'effectue par méthode du coût moyen actualisé, ce qui consiste à faire un bilan économique sur l'ensemble de la vie de la centrale. Pour le nucléaire, le prix bas et peu

fluctuant du combustible comparé aux énergies fossiles rendent ce moyen de production très compétitif.

Phylogénie des réacteurs nucléaires

Les débuts de la filière nucléaire remontent à la fin de la seconde guerre mondiale et le chemin qui a mené vers les réacteurs que nous connaissons aujourd'hui relève d'une véritable sélection naturelle entre les différentes technologies.

Dans un premier temps, entre 1950 et 1960, une variété de réacteurs dits de Génération I qui correspondaient à des développements pour les premières applications civiles à vocation de production d'énergie.

Par la suite, des contraintes technologiques ou économiques confèrent des avantages sélectifs à certaines branches de réacteurs, ce qui a abouti à la naissance dans les années 1970 aux réacteurs dits de Génération II. Ce sont les réacteurs issus de cette période que l'on trouve aujourd'hui dispersés dans le monde : on en compte 441 aujourd'hui en fonctionnement. La Génération II regroupe pour la grande majorité des réacteurs à eau légère (360 réacteurs), mais aussi des réacteurs à eau lourde (41 réacteurs) et des réacteurs graphite-eau (16 réacteurs). L'eau légère et l'eau lourde sont les caloporteurs utilisés dans les réacteurs pour évacuer la chaleur du cœur du réacteur vers l'extérieur. Le graphite du réacteur graphite-eau est le modérateur qui empêche que la réaction du cœur ne « s'emballe ».

Ces réacteurs sont pour un peu moins de 50 % d'entre eux situés en Europe et en Russie contre 30 % en Amérique du Nord. Le Japon avec pas moins de 55 réacteurs installés totalise lui 10 % des réacteurs mondiaux : la marge pour augmenter le nombre de réacteurs dans les autres zones géographiques est donc très large. L'étape suivante consiste en les réacteurs dits de Génération III, véritable aboutissement de l'évolution de l'état de l'art dans les domaines de la fabrication, du montage, etc. mais aussi, et surtout, de la sûreté nucléaire.

La sûreté d'un réacteur nucléaire repose sur le principe de défense en profondeur selon lequel tout système est reconnu comme pouvant être défaillant et doit être remplacé par d'autres dispositifs. A tout moment,

l'opérateur d'un réacteur nucléaire doit s'assurer du contrôle de la réaction en chaîne dans le cœur, du refroidissement du combustible pour évacuer la chaleur et enfin du confinement des produits radioactifs et se doit donc de multiplier les systèmes pour maintenir ces trois fonctions essentielles. Les barrières de sûreté que sont les gaines métalliques contenant le combustible, l'enveloppe du circuit primaire et enfin l'enceinte de confinement autour des bâtiments du cœur assure le confinement des produits radioactifs.

Comme mentionné précédemment, les réacteurs de Génération III ont fait un grand pas en avant dans le domaine de la sûreté : le réacteur EPR™ d'AREVA présente par exemple des systèmes de sécurité quadruplés et une résistance inégalée aux agressions extérieures (crash d'avion de commerce de large taille). A noter que certains le rangent pour cette raison dans une catégorie dite de Génération III avancée ou Génération III+. Plusieurs réacteurs de Génération III sont actuellement en construction et il est à prévoir un fort essor de ce type de réacteurs aura lieu dans les vingt ou trente prochaines années à venir. Puis, à partir de 2040, la Génération III sera relayée par la Génération IV, qui comprend des réacteurs à neutrons rapides qui utiliseront le sodium liquide ou les sels fondus comme caloporteurs et qui sont aujourd'hui encore au stade de développement.

Le cycle du combustible

Le combustible nécessaire aux réacteurs nucléaires est l'uranium. A l'état naturel, l'uranium a la composition suivante : 99,3 % est de l'uranium U_{238} fertile et 0,7 % est de l'uranium U_{235} fissile. C'est cette dernière forme très réactive qui est utile dans le cœur.

L'uranium provient de deux sources possibles : de sources primaires, par l'extraction du minerai directement en milieu rocheux, ou de sources secondaires, étant alors un sous-produit des procédés industriels lié à la fabrication d'uranium (par retraitement ou issu de l'armement militaire). Le marché de l'uranium de source primaire est aujourd'hui marqué par un fort déséquilibre entre l'offre et la demande, avec une production mondiale suffisante pour couvrir seulement 60 % des besoins : les sources secondaires permettent de couvrir le reste. Pour l'uranium

naturel de source primaire, à noter que celui-ci n'est pas directement utilisé tel quel dans les réacteurs et le minerai doit suivre plusieurs étapes industrielles avant d'être placé dans le cœur.

En amont du cycle (soit avant la production d'électricité), les opérations commencent tout d'abord par l'extraction du minerai. Les mines d'uranium sont très concentrées géographiquement à la surface du globe. Ainsi, l'Australie, le Canada et le Kazakhstan totalisent 56 % de la production mondiale. Pour le reste, la Russie, le Niger et la Namibie se partagent équitablement environ 30 % du marché mondial. L'uranium extrait de ces gisements géologiques est alors concassé et transformé sur site en U_3O_8 ou « Yellow Cake ». Il est expédié sous cette forme à partir des mines vers les sites de conversion où le « Yellow Cake » se trouve ensuite transformé en UF_6 , crystal blanc qui devient gazeux à 60°C.

Pour la plupart des réacteurs actuels, l'uranium naturel doit être alors enrichi, c'est à dire qu'il s'agit d'augmenter la proportion d'uranium U_{235} par rapport à l'uranium U_{238} . Deux possibilités techniques sont à disposition aujourd'hui : la centrifugation, consistant à séparer les deux formes d'uranium par rotation très rapide dans des bols cylindriques, ou la diffusion gazeuse, qui utilise les différences dans les vitesses de migration résultant des différences atomiques entre les deux formes d'uranium U_{235} et U_{238} . A la fin de ce procédé, l'uranium enrichi est compacté et transformé en petites pastilles noires (alors chimiquement sous la forme d' UO_2). Ces pastilles sont alors placées dans des tubes ou « crayons », eux mêmes regroupés par assemblages de plusieurs éléments qui seront plongés dans le cœur.

Dans le cœur, le combustible est irradié et sa structure atomique est modifiée. Dans le combustible utilisé ou usé, il est possible de trouver encore 95 % d'uranium (0,8 % sont de l' U_{235}), 1 % de plutonium ainsi que des produits de fission et des actinides mineurs, ces derniers étant hautement radioactifs. Deux solutions se présentent alors : soit le cycle est fermé et les matériaux radioactifs vont être recyclés, soit le cycle est ouvert et dans ce cas, tous les déchets vont simplement être rapidement traités et stockés. Le cycle fermé, bien que coûteux en temps (un cycle de recyclage dure 15 ans !) permet de diviser par cinq les volumes des déchets à stocker et par dix la toxicité des déchets à long terme.

Si l'on considère le cycle fermé en aval (soit après la production d'électricité), après avoir été stocké près de la centrale dans une piscine pour refroidissement et décroissance de la radioactivité, cet UO_2 usé est dans un premier temps traité chimiquement afin d'extraire les matières recyclables que sont l'uranium et le plutonium. Ces deux composants peuvent ensuite être utilisés pour la fabrication du MOX (Mixed Oxyde fuel) à hauteur de 93 % pour l'uranium et 7 % pour le plutonium. Ce combustible, dont la production a été industrialisée dès les années 1970 en Allemagne puis en 1985 en France, a pratiquement le même comportement que les assemblages d' UO_2 dans le cœur mais un manque de retour d'expérience l'empêche pour l'instant d'être autorisé à être utilisé dans l'ensemble du parc nucléaire (utilisé dans environ 35 réacteur à eau légère en Europe actuellement).

Les actinides mineurs et autres produits de fission sont eux calcinés, vitrifiés puis emballés dans des conteneurs et constituent les déchets nucléaires. A noter que les colis de déchets radioactifs sont à 15 % composés de déchets et 85 % d'enrobage et d'emballage et empaquetés selon le principe similaire à celui d'une poupée russe. Ces matières radioactives sont classées selon deux critères principaux qui sont le niveau d'activité et la durée de vie. Ainsi, on distingue les déchets à vie très courte (<100 jours), à vie courte (<30 ans) et à vie longue (>30 ans) ainsi que les déchets de très faible, faible, moyenne et haute activité. En France, en terme de volume et en comptant tous les déchets radioactifs (pas seulement issus uniquement du parc nucléaire mais aussi du milieu médical, militaire...), les déchets de faible activité à vie courte (20000 m^3 par an) et les déchets de moyenne activité à vie courte (2000 m^3 par an) représentent 93 % du volume total de déchets alors que les déchets à haute activité et à vie longue (200 m^3 par an) représentent 7 % du volume total (à titre de comparaison, le volume d'une piscine olympique est de 3000 m^3). La solution de stockage géologique est actuellement sous étude pour les déchets à moyenne activité et vie longue et à haute activité. Ce mode de stockage est basé sur le concept de sureté passive, c'est à dire indépendante de l'action de l'homme, et le principe de protection faisant intervenir des fonctions multiples. Ici, la barrière géologique vient s'ajouter aux barrières que sont les emballages et les matrices vitreuses. Les Etats-Unis sont pour l'instant le seul pays à

posséder un site de stockage géologique mais la France, la Finlande et la Suède montrent un intérêt croissant pour ce mode de stockage.

Le nucléaire : les administrations et l'opinion publique

Sur le plan européen, la Communauté pour l'Energie Atomique est chargée depuis le Traité EURATOM du 25 mars 1957 d'élaborer une réglementation européenne. Sur le plan international, il existe plusieurs institutions dont la plus célèbre est l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA).

En France, la réglementation nucléaire se fonde sur un cadre juridique très contraignant et selon les principes de prévention, de précaution, de pollueur-payeur, d'information et privation du public aux décisions et enfin de responsabilité des exploitants en ce qui concerne leurs installations. Les lois concernant la sûreté nucléaire s'articule donc en pratique autour de trois axes : une responsabilité technique qui relève de l'exploitant, un contrôle des pouvoirs publics (représentés notamment par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)), qui veillent au respect des normes de sûreté, et un contrôle institutionnel pour s'assurer de la transparence de l'information. Au plan technique, ce sont donc les pouvoirs publics qui posent les objectifs en termes de sûreté puis les exploitants qui proposent des solutions pour y parvenir. Après approbation de ces solutions par les pouvoirs publics, l'exploitation met en œuvre des moyens dans les installations qui sont ensuite inspectées fréquemment par les autorités.

Les exploitants se doivent aussi de rendre public leur rapport annuel de sûreté. Un des outils facilitant la lecture par le public des incidents nucléaires est une échelle INES (International Nuclear Event Scale) qui comprend 8 niveaux, de 0 à 7. En France, on recense chaque année plusieurs centaines d'incidents de niveau 0 ou 1 (légère sortie de fonctionnement) et seulement 2 à 3 événements classés niveau 2 (contamination importante et/ou défaillance des systèmes de sûreté). Le niveau 7 étant un accident majeur tel que celui de Tchernobyl en 1986.

Malgré la transparence sur les activités nucléaires, plus de 60 % de la population française pense que la vérité concernant les vrais dangers du nucléaire est cachée. Les populations en Europe, de façon générale,

s'avouent en effet mal renseignées sur les enjeux des nucléaires, d'où une perception plutôt négative de ce mode de production d'électricité. Dans les autres zones géographiques planétaires, les mentalités sont souvent plus réceptives : c'est notamment le cas en Asie et c'est en train de devenir le cas aux Etats-Unis, ou les populations se rendent peu à peu compte des avantages de cette forme d'énergie.

Par ailleurs, malheureusement pour le nucléaire civil, la première image publique de la fission nucléaire est la bombe d'Hiroshima ce qui rend cette filière conceptuellement indissociable des activités militaires. Des efforts de coopération internationale tentent de limiter la dispersion, ou prolifération, de la science de l'atome telle que l'illustre la signature de la traite de non-prolifération (TNP) en 1968. De nombreux chocs ont néanmoins émus et continuent d'émouvoir l'opinion publique internationale : l'Inde conduisit en 1974 un essai nucléaire « clandestin » puis on découvrit en Irak un programme clandestin après la guerre du Golfe en 1991 et enfin plus récemment, l'Iran qui a reconnu que, bien qu'ayant ratifié le TNP, a mené depuis 18 ans un programme secret de développement d'enrichissement d'uranium. Mais quels sont les vrais liens entre l'industrie nucléaire et la prolifération ? Il doit être reconnu tout d'abord qu'un pays qui entreprend un programme nucléaire civil aura certainement les compétences nécessaires ainsi que des matières fissiles en quantités suffisantes pour basculer vers un programme nucléaire militaire. Cependant, mener un programme en secret est rendue très difficile aujourd'hui par les contrôles des instances internationales. Par ailleurs, la perte de toute coopération internationale dans le milieu nucléaire qui résulterait de la prise de conscience internationale de ces opérations clandestines serait un prix lourd à payer pour le pays dans la suite de son programme. Enfin, une autre menace qui pèse est la création par des groupes terroristes indépendants de « bombes sales », ou bombes de petites tailles, bien moins puissantes que les bombes atomiques.

*

En conclusion, la renaissance actuelle du nucléaire civil et surtout son extension à de nombreux pays pose la question de la non-prolifération. Comment dissuader les nouveaux entrants de développer trop vite les

étapes sensibles du cycle, tout en leur garantissant l'accès aux services du cycle tant que leur comportement vis-à-vis de la non-prolifération est irréprochable ? Les solutions actuellement discutées au niveau international incluent des scénarios tels que la multinationalisation des usines sensibles du cycle ou la fourniture complètement intégrée des services liés au cycle.

« On sait par exemple que le système de pensée de la Chine n'a jamais séparé la science de l'éthique, alors que les choses ont pris une tournure, beaucoup plus menaçante, quant la révolution scientifique européenne eut fait table rase de la cause finale d'Aristote et chassé l'éthique du savoir. Ce processus a eu ceci de bon qu'il a opéré une distinction entre les grands volets de l'expérience humaine, mais il est devenu dangereux lorsqu'il a ouvert aux pires d'entre les hommes l'accès aux grandes découvertes de la science, qu'ils ont dès lors utilisées à des fins désastreuses pour l'humanité toute entière.

La science se doit d'être vécue parallèlement à la religion, à la philosophie, à l'histoire et à l'expérience esthétique ; seule elle peut s'avérer très néfaste. Aujourd'hui, par exemple, il ne nous reste qu'à espérer que le potentiel destructeurs des armes atomiques, que la science a placé dans tant de mains, restera contrôlé par des hommes responsables et sensés et qu'aucun manique ne lâchera la bride à des puissances capables de détruire non seulement l'humanité, mais toute forme de vie sur terre. »

Joseph Needham