



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



Recommandations communes pour l'avenir de l'énergie nucléaire

Présentées par
L'Académie d'Ingénierie de Chine
L'Académie des technologies de France
L'Académie des sciences de France

31 août 2017

Avant-propos

À la fin de l'année 2016, l'Académie chinoise d'ingénierie et les académies françaises (Académie des technologies et Académie des sciences) ont mis en place un groupe d'étude conjoint franco-chinois. Son objectif général était de préparer une prise de position commune pour passer en revue les options politiques et technologiques, y compris la sûreté et la gestion des déchets, permettant de faire de la production d'énergie nucléaire une composante des futurs mix énergétiques dans les pays ayant le potentiel approprié pour la mise en œuvre de cette énergie.

Contexte

En ce qui concerne les activités nucléaires civiles en général, la France et la Russie peuvent, à l'heure actuelle, être considérées comme les pays leaders dans le monde. Cependant, la Chine fait des percées impressionnantes dans la mise en place de centrales nucléaires et apparaît comme l'un des leaders potentiels à l'avenir.

La Chine et la France sont convaincues que l'énergie nucléaire doit pouvoir contribuer efficacement à la réduction de la consommation de combustibles fossiles et par conséquent à une réduction notable des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Les deux pays sont confrontés à des problèmes similaires concernant le rôle des technologies nucléaires envisagées et leur acceptation par le public. Dans le contexte de la COP21, qui cible un monde « à faible teneur en carbone », les trois académies se sont mises d'accord sur un message commun adressé aux autres pays, concernant les questions nucléaires et touchant principalement leurs aspects scientifiques, technologiques, industriels, mais aussi économiques et sociétaux.

Ce message commun est le résultat du travail du groupe d'étude conjoint franco-chinois.

Contenu et public cible

Ce rapport couvre de nombreux aspects de l'énergie nucléaire et s'efforce d'en présenter une vision objective (place de l'énergie nucléaire dans le futur mix énergétique, bénéfices, points forts et points faibles de l'énergie nucléaire, perspectives de recherche et développement, technologie et sûreté, ingénierie, etc.), ainsi que des problèmes sociétaux (éducation, formation, perception des risques, sensibilisation du public, etc.) mais il est certes loin d'être exhaustif. Par exemple, la question importante de la durée de vie des centrales, l'extension éventuelle de leur exploitation, les questions relatives à leur démantèlement, ainsi que les aspects économiques de l'énergie nucléaire ne sont pas abordés. **Le rapport ne prétend pas non plus comparer toutes les méthodes de production d'énergie, ni leurs mérites et faiblesses respectifs.**

Bien que le groupe d'experts soit attentif aux problèmes rencontrés dans certains projets actuels de centrales nucléaires, ces thématiques ne sont pas spécifiquement prises en compte dans la présente étude et on n'essaye pas d'examiner ces difficultés. On considère que celles-ci ont vocation à être surmontées et que ce rapport commun doit se focaliser sur les méthodes et outils susceptibles d'améliorer le développement et l'achèvement des

projets futurs, en particulier ceux qui s'appuient sur la numérisation. Il y a également la volonté de ne pas interférer avec les affaires en cours, la gouvernance, les questions financières ou les discussions commerciales.

Le but de l'étude est de mettre au point, entre les académies partenaires, des déclarations communes qui sont documentées dans le présent rapport, alors même que les visions et la dynamique des deux pays ne sont pas strictement identiques.

En outre, ce rapport ne vise pas principalement le grand public. Si cela avait été le cas, il aurait fallu répondre à d'autres questions et organiser des discussions avec d'autres parties-prenantes, ce qui ne pouvait être organisé dans le délai prévu. Le public cible de l'étude est le public « professionnel » des pays qui incluent le développement de l'énergie nucléaire dans leur mix énergétique, et en particulier la communauté nucléaire mondiale lors de la réunion annuelle de l'AIEA. Les messages contenus dans le rapport commun sont l'expression d'experts nucléaires bénévoles et non directement impliqués dans les projets. Sur certains aspects, le groupe d'experts est conscient qu'un travail supplémentaire est nécessaire pour approfondir l'état de la question. Cela est vrai en particulier pour les problèmes sociétaux, où beaucoup plus doit être fait pour informer le public sur les questions d'énergie et sur les difficultés extraordinaires que l'on rencontrera en essayant de remplacer les combustibles fossiles par d'autres sources d'énergie, essentiellement sans carbone, mobilisables pour assurer une production répondant économiquement et de façon sûre à la demande. Pour mieux comprendre les préoccupations de la société, il faudra des efforts supplémentaires, - ce point est souligné mais nécessitera encore des approches novatrices. Les progrès dans ce domaine dépendront de l'implication du public dans les discussions sur ces questions et sur leurs solutions. Ce débat dépasse toutefois le propos du présent rapport.

Présentation lors de la réunion de l'AIEA de septembre 2017 à Vienne

Les trois partenaires concluent leur travail collectif en exposant leurs points de vue communs à la communauté nucléaire mondiale, y compris les décideurs, lors d'une réunion parallèle de l'Assemblée générale annuelle de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), prévue le 20 septembre 2017. La présentation mettra en évidence le partenariat actuel entre les académies chinoise et françaises et il est souhaité qu'elle permette de mettre en perspective certaines des difficultés rencontrées dans les projets occidentaux actuels, en apportant un point de vue plus large et visant le long terme.

Synthèse et recommandations

La France et la Chine sont toutes deux des pays disposant de grandes et durables capacités en termes de génération d'électricité, grâce à leurs centrales nucléaires. La France a également une longue expérience en ce qui concerne l'exploitation de réacteurs nucléaires et d'installations liées au cycle fermé du combustible. La Chine est quant à elle un pays où l'augmentation de la capacité nucléaire s'envisage d'ores et déjà comme la plus grande expansion jamais réalisée au monde en ce domaine pour les années à venir. Les deux pays sont engagés dans une phase de transition de leur production d'électricité pour optimiser leurs « mix » énergétiques, et disposent tous deux également de programmes de Recherche et Développement (R&D) afin de préparer la prochaine génération de systèmes nucléaires.

Ayant toutes trois un intérêt commun pour les énergies durables et agissant en tant que corps indépendants, les trois Académies (l'Académie d'Ingénierie Chinoise, l'Académie Française des Technologies et l'Académie Française des Sciences) ont décidé d'analyser certains des problèmes et défis que soulève le domaine de l'énergie nucléaire. Elles sont parvenues aux considérations et recommandations suivantes.

1. Supprimer toute émission de carbone de nos systèmes de génération d'énergie, c'est-à-dire les décarboner, pose plusieurs problèmes importants qu'il ne faut pas sous-estimer. On considère, en général, qu'une telle démarche requerra une augmentation de la contribution du vecteur électrique (mobilité terrestre, industrie, usages urbains, etc.). L'énergie nucléaire fait partie des options les plus réalistes permettant de pourvoir à la demande d'énergie électrique. La génération de centrales nucléaires la plus récente représente une option hautement réaliste pour fournir cette énergie de façon sûre, efficace et propre, tout en résolvant simultanément les problèmes environnementaux et les problèmes posés par le changement climatique. Elles peuvent fournir, de façon fiable et en continu une énergie redistribuable et compléter d'autres sources de génération d'électricité renouvelables, telles que le vent ou le solaire photovoltaïque, qui ont un caractère principalement intermittent, dont la production fluctue indépendamment de la demande et qui fournissent une énergie moins aisée à répartir pour répondre à ladite demande.

2. Comme la production d'énergie nucléaire est très concentrée sur de grandes centrales regroupées sur un nombre limité de sites, elle a une empreinte moindre sur l'environnement (car son emprise territoriale est plus réduite) en comparaison d'autres sources de générations d'électricité plus diluées. Elle est capable de fournir toute l'électricité nécessaire au bon fonctionnement des mégapoles actuelles, et de celles à venir. L'énergie nucléaire utilise de l'uranium, une ressource abondante, à l'abri d'éventuelles manipulations du marché, ce qui assure la sécurité de son approvisionnement.

- Dans le futur envisageable, il n'y aura aucune solution permettant de stocker économiquement de grandes quantités d'électricité. Il est ainsi nécessaire de trouver d'autres moyens de compenser les productions intermittentes afin de s'assurer qu'on peut répondre à une demande encore plus fluctuante avec une grande réactivité et une

grande couverture et ce à tout moment. Toutefois, si ces moyens de compensation des énergies renouvelables devaient se faire en utilisant des combustibles fossiles, l'objectif de décarbonation serait manqué.

- Il y a de plus des limites techniques et économiques à l'insertion d'une énergie intermittente à l'intérieur des grands réseaux électriques (concernant par exemple, la stabilité du réseau, ou les plans de rétablissement en cas de black-out à grande échelle, etc.).
3. L'énergie nucléaire reste une technologie relativement nouvelle, et qui connaît continuellement de nouveaux progrès.
- Les accidents majeurs ont été analysés, et il en a été tiré des leçons et retours d'expériences qui ont mené à des changements significatifs dans la conception et l'exploitation des réacteurs.
 - La dernière génération de réacteurs (Gen-III) actuellement en construction a été conçue afin de s'assurer qu'il n'y ait, essentiellement, aucune conséquence radiologique significative au-delà des limites du site nucléaire lui-même, même en cas d'accident sérieux incluant une fusion du cœur du réacteur.
4. On anticipe également d'autres progrès, dont le développement devrait être fortement encouragé, comme :
- La conception de réacteurs de Gen-IV, ce qui inclut les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (SFR), capables d'utiliser tout l'uranium mais également de permettre le multi-recyclage du combustible utilisé ainsi que la transmutation des éléments radioactifs à très longue vie présents dans les déchets radioactifs.
 - La conception de Petits Réacteurs Modulaires (SMR) adaptés aux petits réseaux électriques. Leur construction modulaire permet d'alléger la complexité des grands chantiers de construction.
5. Par conséquent, il est important de maintenir des efforts constants de R&D ciblés sur la réduction des coûts et des risques, ce qui devrait inclure :
- Un partage des ressources humaines et des infrastructures de recherche.
 - La consolidation et le développement de programmes d'études et de formation à tous niveaux, pour concevoir, construire et faire fonctionner les réacteurs nucléaires.
6. Le développement correct de l'énergie nucléaire requiert l'existence d'autorités de sûreté compétentes et indépendantes.
- Ces dernières peuvent s'appuyer sur des Organismes Techniques de Sûreté (TSO), qui doivent être à leur tour compétents et indépendants.
 - Un dialogue technique doit exister entre ces autorités, opérateurs, et vendeurs pour assurer que les exigences en termes de sûreté prennent en compte l'évolution du savoir scientifique et technique, et se fondent sur une évaluation objective des risques.
 - La convergence des exigences en matière de sûreté entre tous les régulateurs d'États est un prérequis pour la standardisation des modèles de réacteur. Cette standardisation constituerait en elle-même une amélioration de la sûreté. Dans la situation présente, les autorités de sûreté ne s'accordent pas sur la définition du niveau de sûreté à exiger de

l'énergie nucléaire, certaines préférant mettre en place des approches coût-bénéfice, que rejettent les autres : l'atteinte d'une harmonisation entre toutes ces instances est véritablement essentielle. Les Académies recommandent quant à elles une approche « fondée sur une appréciation des risques » qui équilibre nouvelles exigences en matière de sûreté et bénéfices engendrés.

7. Les défis principaux de l'industrie nucléaire s'organisent principalement autour de trois points : (1) gestion des déchets, (2) maîtrise des coûts et financement de nouveaux projets (3) transmission du message selon lequel les améliorations de la sécurité des opérations nucléaires ont atteint un niveau tel que l'acceptabilité sociale devrait en découler naturellement.
 - a. La gestion de déchets radioactifs de faibles ou moyennes activités est mise en place industriellement avec des solutions prouvées et acceptées. Des technologies permettant de conditionner les Déchets de Haute Activité à Vie Longue (HL-LLW) (avec ou sans retraitement du combustible usé) existent. La communauté scientifique et technique n'a pas encore identifié d'obstacle majeur au stockage des déchets radioactifs HL-LLW conditionnés, en couches géologiques profondes soigneusement sélectionnées. En revanche, il faut poursuivre la caractérisation de tels sites.
 - b. L'industrie nucléaire doit intensifier ses efforts afin de mieux contrôler le coût et la durée des projets nucléaires.
 - Une analyse sans complaisance des difficultés rencontrées par certains projets récents doit être entreprise par les propriétaires et les vendeurs. Les Académies recommandent que les conclusions de ces analyses soient rendues publiques.
 - Les Académies recommandent à l'industrie nucléaire d'accélérer la mise en place des technologies digitales, dont l'usage se révèle très bénéfique dans d'autres industries. Ces technologies aident à réduire de façon significative les coûts et les délais de projets, tout en améliorant la qualité. Trois domaines se révèlent d'une importance toute particulière :
 - ✓ L'utilisation et la poursuite du développement de modèles de simulation à coupler avec les outils de conception
 - ✓ La digitalisation des systèmes d'instrumentation et de contrôle
 - ✓ L'utilisation d'une plate-forme digitale de Gestion du Cycle de Vie des Produits (PLM) munie d'une base de données unique englobant conception en 3D, construction, opération, et gestion du cycle de vie du produit.
 - L'introduction de ces technologies requiert une certaine coopération entre autorités de sûreté, ainsi que l'harmonisation des diverses réglementations, particulièrement dans le domaine de la cyber sécurité.
 - L'énergie nucléaire est une industrie à longs cycles de vie qui requièrent un investissement initial significatif. Il est important pour cela de recevoir des financements adéquats de la part des banques d'investissement internationales.

c. L'industrie nucléaire ne peut se développer si elle n'est pas acceptée par l'opinion publique ou soutenue par les gouvernements :

- Les aspects liés à la sûreté doivent être abordés de façon complète, et les améliorations actuelles et passées des opérations nucléaires doivent être clairement expliquées au public.
- Étant donné que le débat sur l'énergie touche des domaines techniques et économiques complexes, il ne peut être mené que sur la base d'informations bien structurées et de données fiables.
- Il est capital de donner des informations totales et objectives. Les associations non-gouvernementales doivent certes pouvoir s'exprimer et être écoutées, mais c'est aussi le cas des différents exploitants, concepteurs, autorités de sûreté et experts en ingénierie nucléaire et en économie. Les gouvernements devraient s'enquérir de l'opinion des experts, et faire appel à l'expertise de leurs Académies nationales.

8. L'industrie nucléaire devrait être partagée avec les pays émergents, par le biais de coopérations internationales et bilatérales. Les pays qui ont construit une infrastructure nucléaire, comme la Chine et la France, devraient aider ceux des pays émergents qui sont politiquement stables à développer l'énergie nucléaire d'une façon sûre, fiable et efficace. En parallèle, la communauté nucléaire devrait favoriser ce développement en progressant dans deux directions :

- Dans la standardisation et la stabilisation des processus de licensing et de réglementation
- Dans la généralisation des accords d'achat sur le long terme d'énergie électrique (PPA), avec des garanties gouvernementales.

Table des Matières

Avant-Propos.....	2
Synthèse et recommandations.....	4
Section 1. Introduction : l'importance capitale de l'énergie nucléaire à l'intérieur du futur mix énergétique mondial, et défis à surmonter	10
Section 2. Histoire, situation actuelle, problèmes et défis du développement nucléaire	13
Section 3. La faisabilité et les défis représentés par le déploiement sur le court et moyen terme des centrales nucléaires GEN-III	17
Section 4. Promesses et défis des nouvelles conceptions innovantes des futurs réacteurs de 4 ^{ème} génération	21
Section 5. Promesses et défis des nouveaux concepts innovants de réacteurs et de technologies : les Petits Réacteurs Modulaires ; des technologies avancées.....	29
Section 6. La gestion actuelle des déchets radioactifs et les perspectives pour l'avenir.....	34
Section 7. Organismes Techniques de Soutien (TSO) reliés à la sûreté	43
Section 8. Défis pour l'avenir, et plus spécifiquement les futures méthodologies d'outils novateurs de conception et de digitalisation.....	47
Section 9. L'importance des installations de recherche nucléaire et infrastructures.....	52
Section 10. Défis en matière d'éducation et de formation	55
Section 11. Ingénierie et gestion de projets nucléaires	60
Section 12. Assurer la sûreté tout en gardant le coût et la complexité sous contrôle	65
Section 13. La pertinence des approches internationales de soutien à la préparation de projets dans les pays émergents.....	68
Section 14. L'évaluation des impacts sur la santé humaine au bout de cinquante ans d'activités dans le nucléaire	73
Section 15. Perception des risques relative à des dangers réels	79
Section 16. Amélioration de la prise de conscience du Public et exigences de Gouvernance	84
Section 17. Organisation, méthodologies et rôles des différents acteurs dans l'amélioration de la compréhension du public.....	88
Glossaire	91
Auteurs et contributeurs.....	94
Remerciements	94
Notes biographiques	95

Section 1. Introduction : l'importance capitale de l'énergie nucléaire à l'intérieur du futur mix énergétique mondial, et défis à surmonter

En tant que source de développement social et économique, l'énergie est essentielle à la vie humaine, à la santé et au bien-être. Répondre à la demande mondiale en énergie, tout en réduisant en même temps les émissions globales de gaz à effets de serre (GHG) soulève des défis fondamentaux pour le futur de la planète.

Depuis les années 1950, l'usage pacifique du nucléaire dans le civil s'est révélé être une option de production potentielle d'électricité permettant d'éviter d'avoir à recourir aux énergies fossiles comme le charbon, le pétrole ou le gaz. Depuis peu, l'énergie nucléaire est également aussi considérée comme une source d'énergie durable et fiable à faible émission de carbone, dont le fonctionnement en continu est garanti, et qui permet un développement économique mondial tout en réduisant les émissions de gaz à effets de serre. Même si l'énergie nucléaire est devenue l'un des trois piliers de l'énergie mondiale, son développement traverse actuellement une période critique. L'accident nucléaire de Fukushima au Japon a eu un énorme impact, et a soulevé des inquiétudes du public sur la sûreté du nucléaire. Certains pays, poussés par ces inquiétudes entre autres raisons, ont décidé d'abandonner l'énergie nucléaire et de mettre fin à l'exploitation de leurs centrales nucléaires existantes. Les retours d'expérience et les leçons tirées de l'accident de Fukushima ont conduit à la création de plans de renforcement approfondis de la sûreté des réacteurs nucléaires existants et à d'autres améliorations dans la conception des installations futures, si bien que le développement de l'énergie nucléaire se poursuit dans de nombreux pays.

Pour obtenir une réduction notable des émissions de gaz à effet de serre contribuant au changement climatique, diminuer les émissions polluantes d'oxydes nitriques, d'hydrocarbures imbrûlés et autres particules, améliorer la qualité de l'atmosphère sur le moyen et le long terme et permettre à l'humanité d'accéder à un développement durable, le monde a besoin d'un système de production d'électricité qui respecte mieux l'environnement et utilise une quantité minimum de combustibles fossiles. Dans la situation présente, où la plupart de la production d'énergie électrique repose sur la combustion d'énergies fossiles et plus spécifiquement sur le charbon, l'énergie nucléaire constitue l'une des options les plus réalistes d'approvisionnement en électricité de façon sûre, efficace et propre, tout en résolvant les problèmes environnementaux et climatiques.

Parce qu'il s'agit d'une source stable d'énergie, elle peut fonctionner en restant fiable soit en mode de base, soit en mode de complémentation aux sources d'énergies renouvelables (comme celles issues du vent ou du solaire photovoltaïque) qui sont principalement intermittentes et peu aisées à répartir pour répondre à la demande. À cet effet, il est considéré de façon générale, et il s'agit d'une observation confirmée par l'expérience récente, que la part totale d'énergies renouvelables intermittentes dans le mix énergétique de la plupart des pays ne peut pas excéder 30 à 40 % sans induire un coût de l'électricité inacceptable, sans mener à des augmentations des gaz à effets de serre, ou même sans

risquer de compromettre la sûreté de l’approvisionnement en énergie. La cause principale de cette limitation est l’impossibilité du stockage de l’énergie électrique, pour lequel aucun signe d’avancée significative n’est actuellement perceptible. Comme l’énergie nucléaire utilise des grandes centrales concentrées sur un nombre limité de sites en demandant donc l’occupation de moins de terrain que d’autres modes de génération d’énergies plus dilués, elle est capable de fournir l’énergie que demandent les mégapoles actuelles et de répondre aussi aux demandes de celles du futur.

Cependant, le développement de l’énergie nucléaire soulève toujours beaucoup de défis et de problèmes en regard de la sûreté, de la gestion des déchets radioactifs, du développement et déploiement des systèmes d’énergie nucléaires avancés, d’acceptation du public, etc. Faisant partie toutes deux des pays du monde possédant des centrales nucléaires en quantité (NPPs), la Chine et la France attachent beaucoup d’importance à l’usage pacifique de l’énergie nucléaire dans le monde, et ont la responsabilité et la volonté d’aider les nations émergentes dans leurs développements des NPPs et dans leur désir de résoudre les défis auxquels ils feront face.

En continuation des objectifs déterminés par la COP 21 et la COP 22 aux fins de réduction mondiale des émissions de gaz à effets de serre, les trois Académies (l’Académie d’Ingénierie Chinoise, l’Académie Française des Technologies et l’Académie Française des sciences) ont la ferme conviction que cette initiative qui est la leur, visant à mettre en relief certains des problèmes complexes liés à la génération d’énergie nucléaire, pourrait envoyer un message fort et précieux aux académies des autres pays, des preneurs de décision et de la société en général.

Le rapport présent reflète les positions des trois académies en tant que corps indépendants et ne saurait être interprété comme étant celles des acteurs industriels du domaine des centrales nucléaires ou des gouvernements, Chinois ou Français.

Dans ce rapport, les académies contributrices ont visé à esquisser les grandes lignes de l’histoire et des perspectives de l’énergie nucléaire, et à examiner les problèmes clés à prendre en compte pour faire de l’énergie nucléaire une énergie encore plus sûre et abordable au bénéfice des pays développés et émergents.

Même si ce rapport aborde beaucoup de sujets, il n’a pas vocation à être exhaustif. Il ne fait que synthétiser les réflexions et les discussions menées sur une période de six mois.

Le présent rapport comprend dix-sept sections ainsi qu’une synthèse. Les sections 2 et 3 rappellent brièvement l’histoire, les problèmes et les défis que pose le développement nucléaire et s’intéressent aux problèmes de déploiement des NPPs de Gen-III. Les sections 4,5 et 6 se concentrent sur des aspects scientifiques touchant notamment aux promesses et défis liés aux conceptions des futurs réacteurs, et examinent notamment plus spécifiquement la situation des réacteurs Gen-IV et les conceptions des nouveaux petits réacteurs modulaires (SMR). Les problèmes technologiques en particulier seront évoqués dans les sections 7, 8 et 9, ce qui inclut les problèmes de sûreté et l’importance du besoin en Organismes Techniques de Sûreté (TSO), les avancées et défis dans l’utilisation de la digitalisation et des outils de conception les plus novateurs. L’importance de la recherche nucléaire, des facilités et autres infrastructures sera soulignée dans la section 9.

La Section 10 se concentre sur la question des études et de la formation de la main-d'œuvre. Un des aspects importants étudié est celui de l'attraction des jeunes diplômés les plus formés au sein de l'industrie du nucléaire. L'autre concerne la formation des employés des électriciens afin de leur apporter l'expérience scientifique nécessaire et appropriée dont ils ont besoin ainsi que la culture de la gestion des risques. À cet effet, le rapport insiste sur l'importance des outils de simulation.

Les sections 11 et 12 se concentrent sur les problèmes liés à l'ingénierie, dont la gestion des projets nucléaires, celle des exigences en matière de sûreté tout en gardant la maîtrise des coûts et de la complexité. La section 13 s'intéresse à la pertinence d'un soutien international aux pays émergents pour leurs projets nucléaires.

Enfin, les sections 14, 15, 16 et 17 se focalisent sur les problèmes sociétaux. Une évaluation est faite de l'impact des activités nucléaires globales sur la santé humaine durant ces cinquante dernières années. Comme les questions de sûreté sont un problème central dans l'exploitation des centrales nucléaires, il est nécessaire de s'intéresser à la perception des risques et à sa relation aux véritables dangers, ce que ce rapport fait dans la section 15. La section 16 se concentre sur l'importance de réaliser une amélioration de la connaissance du public du domaine nucléaire et des véritables risques, et examine la gouvernance qu'il faudrait adopter pour atteindre ce but. Cette ligne de raisonnement est poursuivie dans la section 17 qui est consacrée à l'organisation et aux rôles des différents acteurs. On y discute aussi de l'importance d'améliorer la compréhension du public pour limiter les risques de création de nouvelles régulations dans le futur qui compliqueraient le développement et l'exploitation des installations nucléaires.

Section 2. Histoire, situation actuelle, problèmes et défis du développement nucléaire

Recommandations

On peut d'ores et déjà faire certaines recommandations majeures pour permettre à l'énergie nucléaire d'avoir un rôle effectif, comme source de production d'électricité à faible émission de gaz carbonique, dans le futur mix énergétique de différents pays :

- Tout d'abord, le secteur industriel devrait faire des efforts importants pour assurer le respect des délais et coûts prévus, afin de restaurer la confiance du public dans la capacité des acteurs nucléaires à maîtriser la complexité de cette activité. Pour atteindre cet objectif, il semble nécessaire de comprendre, et ce de façon explicite, les raisons pour lesquelles le processus de constructions de plusieurs centrales nucléaires Gen-III+ dans certains pays « occidentaux » fait l'objet d'une telle contre-performance, tandis qu'en parallèle une construction pourtant identique en Chine progresse selon les délais planifiés. L'analyse de ce phénomène devrait impliquer toutes les parties prenantes de ces projets : propriétaires, organismes de régulation, concepteurs, équipes d'ingénierie, contractants et sous-contractants.
- Des efforts devraient aussi être réalisés afin de porter sur le marché les dernières conceptions de SMR aussi vite que possible, dans le but de renforcer l'image d'une énergie nucléaire plus flexible, et pouvant fonctionner même dans des régions avec des capacités de réseau limitées ou dans des pays émergents.
- Les mécanismes de financement des projets nucléaires doivent également être réexaminés conjointement par les gouvernements des pays nucléaires et les acteurs des marchés financiers.

L'énergie nucléaire civile représente l'un des plus grands challenges technologiques que l'humanité ait jamais dû entreprendre, car elle prend en compte un nombre sans équivalent d'aspects requérant tous un haut niveau de connaissance ainsi que des approches exigeantes, comme la création de modes tolérant aux défaillances : en matière de sûreté, de conception, de construction, de mise en service, de gestion, de problèmes légaux et de réglementation, de gestion et déclasséement des déchets, de financement, de sécurité et problèmes de non-proliférations, de radioprotection, d'impact environnemental, d'acceptation par le public, etc.

L'ingénierie nucléaire n'a pas cessé de se complexifier depuis son apparition dans les années 1940 et 1950, au moment où la science et la technologie, et la capacité industrielle à construire les « objets » qu'elle avait conçus, étaient les seuls défis à relever.

Depuis cette époque, le progrès de l'énergie nucléaire civile s'est fait principalement au travers d'une évolution régulière des conceptions technologiques des réacteurs et autres installations de support nucléaires : réacteurs de recherche, laboratoires, usines de

fabrication de combustibles neuf et installations de retraitement. Trois générations de centrales nucléaires sont apparues successivement avec certains chevauchements, sans difficultés majeures dans les conceptions, et avec un facteur d'amélioration de la sûreté pour chacune d'au moins dix fois supérieur à celui de la précédente.

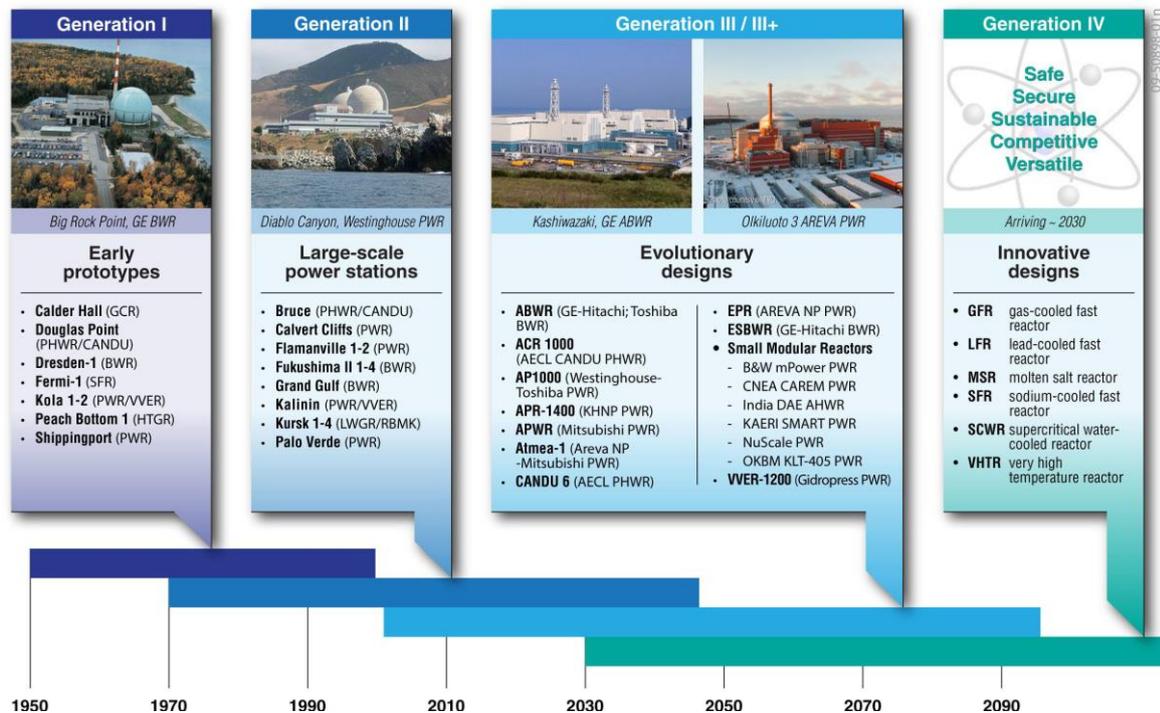


Figure 1. Les générations successives de centrales nucléaires. Reproduction du Forum International de Génération-IV (www.gen-4.org) – Les Réacteurs Chinois de Générations III/III+ suivants ne sont toutefois pas représentés sur le diagramme : HPR1000 CNNC PWR, CAP1400 SNPTC PWR, et ACP100 CNNC SMR PWR.

À la suite des trois accidents majeurs liés à l'industrie nucléaire (TMI, Tchernobyl, Fukushima) et des actes terroristes du 11 septembre, des leçons ont été tirées. La Génération III+ doit désormais satisfaire de hautes attentes et critères en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection. Ces améliorations ont toutefois mené à des augmentations de coût qui ont réduit la compétitivité de l'énergie nucléaire.

La quatrième génération est déjà en cours de préparation, son déploiement étant prévu pour après 2030. Celle-ci répondra spécifiquement aux questions concernant l'aspect économique des matériaux fissiles nucléaires et à la façon dont il est possible de fermer le cycle du carburant.

Dans les pays occidentaux, la période 2003-2016 a été précédée par une longue période de « gel » du courant de progression susmentionné à la suite de l'accident de Tchernobyl, où pratiquement aucune nouvelle construction n'a été lancée, et où les équipes techniques n'ont connu de renouvellements qu'assez limités. Ce « gel » n'a pas manqué d'avoir de sérieuses conséquences sur le développement des projets de génération -III et -III+, qui combinent des mesures de sûreté notablement accrues avec un renforcement de la sûreté dès la conception, et des processus complexes de licensing.

Heureusement, deux facteurs sont entrés en jeu permettant de soulager quelque peu cette conjonction difficile, à savoir :

- Des investissements réalisés par certains constructeurs pour favoriser la modularité dans les constructions et la réactivation de chaînes de fournisseurs fiables,
- L'arrivée de nouveaux clients/vendeurs tels que la Corée du Sud et la Chine, dotées d'un énorme potentiel en termes de main d'œuvre qualifiée, formée et compétente, avec un regard neuf et enthousiaste sur l'industrie du nucléaire.

À l'intérieur de ce courant de progression, décennie après décennie, les réacteurs à eau pressurisée ont dépassé en performance commerciale leurs compétiteurs, d'abord en marginalisant les réacteurs à eau lourde et ensuite, après l'accident de Fukushima, en marginalisant aussi les réacteurs à eau bouillante malgré les atouts spécifiques de ces deux types de conceptions.

Comme les réacteurs traditionnels, la conception et la construction des installations touchant au cycle du combustible de ces réacteurs n'a, à ce jour, connu ni difficulté majeure ni changements fondamentaux dans leur exploitation, à part l'introduction des technologies de centrifugation au sein de leurs usines d'enrichissement. Il est important de noter que les processus industriels et technologies permettant de séparer/transmuter les actinides majeurs mais aussi mineurs ont été préalablement validés au niveau de la R&D ; leur déploiement à un niveau industriel n'est considéré qu'en conjonction de celui des réacteurs dédiés de génération-IV ou de systèmes à accélérateur (ADS).

Les problèmes et défis actuellement rencontrés sont principalement liés à l'environnement spécifique des projets nucléaires. On peut les résumer en trois objets de litiges principaux, dont chacun exerce directement des conséquences assez sévères impactant le développement de l'industrie nucléaire et ayant des influences sur les autres, rendant la résolution d'un seul de ces problèmes sans celles des deux autres impossibles ! Ces problèmes concernent :

- La confiance réduite du public en la capacité de l'industrie à réaliser de grands projets, pratiquement partout autour du globe, mais surtout envers les projets nucléaires, entraînant en conséquence des demandes d'exigences en matière de sûreté plus dures,
- La tendance de certains pays à vouloir complexifier toujours plus et ce de façon perpétuelle leurs processus de licensing et de contrôle
- La difficulté croissante à trouver des financements publics et privés pour les investissements nucléaires initiaux, à cause des coûts en augmentation et à des règles prudentielles des banques de plus en plus contraignantes.

Pour résoudre ces trois problèmes, certains décideurs, surtout d'Europe, préfèrent considérer que seuls les vendeurs ou les électriciens détenus par le gouvernement sont en mesure de gérer les activités nucléaires. On peut se demander s'il s'agit véritablement de la meilleure configuration possible, quand il est question de trouver des solutions de transition vers un système d'énergie sans émission de gaz carbonique, ou si une concurrence entre les acteurs privés ne pourrait pas donner un résultat plus optimal en termes de sécurité et de coût.

L'un des problèmes technologiques cruciaux restant encore partiellement en attente concerne la gestion sur le long terme des déchets nucléaires de haute activité à vie longue.

Ce problème a fait l'objet d'une attention considérable dans différents pays. En se fondant sur les études que l'on a menées en France dans le cadre de deux lois (en 1991 et 2006), on estime que des solutions existent pour aider à réduire la quantité de déchets issus de l'industrie nucléaire. De telles solutions requièrent la construction et l'exploitation de réacteurs à neutrons rapides, qui pourront transmuter les actinides mineurs en produits de fissions dont la durée de vie sera d'à peu près 300 ans, soit bien moins que celle des actinides mineurs ordinaires. Il est ainsi possible de se montrer beaucoup plus optimiste sur la gestion des futurs déchets radioactifs, une fois qu'ils auront été retraités. Cependant, pour le moment, la solution la plus réaliste au jour d'aujourd'hui est de stocker les déchets existants ou le combustible usé à l'intérieur de centres de stockage situés en couches géologiques profondes. Les quelques exemples actuels de tels centres de stockage en cours de construction ne soulèvent que peu de problèmes technologiques pratiquement tous résolus ou en bonne voie de l'être ; ces centres soulèvent en revanche des questions au niveau de l'acceptation du public qui doivent faire l'objet d'une attention considérable.

Une clé de l'amélioration de la confiance du public en l'énergie nucléaire dans le futur sera de démontrer la faisabilité des opérations de déclasserement des centrales de génération-I et -II et autres installations nucléaires dans un nombre de pays toujours en augmentation. Il y aura certes toujours besoin d'augmenter les compétences en matière de technologie et de sûreté, cependant la confiance du public se rétablira grâce à des constructions de projets nucléaires réalisés en temps et en heure et dans les budgets prévus.

Conclusions

Il est d'une importance fondamentale d'expliquer à la fois aux décideurs et au public que l'énergie nucléaire contribue avec efficacité à limiter le réchauffement climatique, et qu'il s'agit de l'un des moyens les plus efficaces pour fournir une électricité abondante, sûre et fiable dans un fonctionnement dispatchable tout en réduisant les émissions de CO₂, tout cela ayant été démontré.

Il est également important de comparer les niveaux de sûreté atteints par les activités nucléaires aux facteurs de risques d'autres activités humaines qui en impliquent aussi et d'expliquer comment, dans le domaine nucléaire, ces risques ont été fortement réduits, à très grande échelle. Avec la génération III et les centrales nucléaires améliorées de génération II post-Fukushima, l'ingénierie de la sûreté a éliminé le besoin de contre-mesures en cas d'accidents graves. En d'autres termes, ces réacteurs ne peuvent entraîner aucune conséquence radiologique majeure sur l'environnement, même en cas d'accident sévère, puisque tout dégagement possible sera confiné à l'intérieur de l'enceinte du réacteur.

Il est important de rappeler que la plupart des réacteurs occidentaux de génération-II arriveront à la fin de leur vie peu avant le milieu du siècle et que cela demandera un renouvellement de la flotte des centrales nucléaires actuelles.

Section 3. La faisabilité et les défis représentés par le déploiement sur le court et moyen terme des centrales nucléaires GEN-III

Recommandations

Il faut renforcer encore plus la compétitivité économique des centrales de GEN-III/III+ au moyen de conceptions optimisées de réacteurs incluant digitalisation, constructions modulaires et standardisées, solutions financières novatrices et réglementations pour les soutenir. La stratégie française de standardisation des réacteurs de Gen-II+ contribue en effet à des améliorations de sûreté tout en réduisant les coûts de construction. La Chine a fait de grandes avancées dans l'usage de la digitalisation pour la conception, l'ingénierie et la gestion de projets nucléaires. Le partage des expériences de ces deux pays se révélerait sans aucun doute bénéfique au futur de l'industrie nucléaire mondiale.

Les réacteurs nucléaires actuels connectés au réseau dans le monde appartiennent principalement soit à la 2^{ème} génération de réacteurs (Gen-II) soit à la 2^{ème} génération améliorée (Gen-II+). Leur conception générale avait été terminée avant l'accident de TMI-2 ; néanmoins à la suite de celui-ci la plupart d'entre eux ont été ensuite renforcés par de nouvelles fonctions additionnelles de sûreté, prenant en compte les leçons apprises après cet accident, notamment (valves de sûreté du réacteur et l'interface homme-machine, etc.) ensuite, celles enseignées par l'accident de Tchernobyl, (recombineurs à hydrogène à l'intérieur du confinement et les Systèmes de Ventilation de Confinement Filtrés). Avant et après l'accident de Fukushima, les réacteurs de Gen-II avaient également été renforcés afin de pouvoir gérer une perte totale d'alimentation électrique (SBO) au moyen de systèmes additionnels passifs ou actifs, ainsi que la perte des Sources Froides ultimes. Il est important de noter que ces renforcements n'avaient pas pour l'essentiel été mis en place au Japon, car d'un autre côté, une fois renforcés, ces réacteurs de seconde génération peuvent être qualifiés de Gen-II+, et leur niveau de sûreté considéré comme proche de celui atteint par les conceptions les plus récentes d'installations nucléaires.

Dans le début des années 90, tout d'abord en Allemagne et en France, les autorités de sûreté ont exigé que les réacteurs nouvellement construits se conforment aux objectifs de sûreté suivants vis-à-vis des événements internes à l'installation :

- La possibilité d'accidents avec fusion du cœur pouvant soit mener à des fuites de façon rapide soit à de larges fuites de radioactivité doit être pratiquement éliminée
- En cas d'accidents graves pour lesquels il soit impossible d'éliminer totalement la probabilité de fusion du cœur, dispositions spéciales doivent être prises dès la conception pour que seules des mesures de protection limitées en termes de zones et de temps soient nécessaires envers le public (pas de relocalisation permanente, ni de nécessité de réalisation d'une évacuation urgente au-delà du voisinage immédiat de la centrale, mise sous abri limitée, pas de restrictions sur le long terme en termes de consommation de nourriture). Une disposition prévoyait également de laisser assez de

temps pour la mise en place de ces mesures.

- L'INSAG, groupe consultatif de haut niveau auprès du directeur général de l'AIEA, avait recommandé l'adoption d'objectifs de sûreté remarquablement similaires à ceux-ci dans son document de l'INSAG-12 (1999), ce qui était bien avant l'incident de Fukushima¹. Même si les Principes Fondamentaux de Sûreté de l'AIEA² n'incluaient pas de telles exigences, elles sont devenues toutefois partie intégrante du Standard de Sûreté de l'AIEA « Sûreté des Centrales Nucléaires : Conception »³, qui s'accorde avec les objectifs de sûreté de WENRA⁴.

Au regard des événements extérieurs, les régulateurs ont tendance dorénavant à exiger que les concepteurs prennent en considération la possibilité d'un crash aérien volontaire⁵, afin qu'un arrêt/mise en sûreté de ces derniers puisse être réalisé. Il faut également prendre en compte, des risques naturels externes hors conception (tels que des tremblements de terre, ou inondations) afin de s'assurer qu'aucun « effet de falaise » ne puisse compromettre sérieusement la sûreté de l'installation nucléaire.

En plus des améliorations de sûreté visant à renforcer les réacteurs de GEN-II+, les réacteurs Gen-III+ comprennent des dispositifs permettant la collecte du corium dans le bas du réacteur (récupérateur de corium), ou des systèmes de prévention de la fusion de la cuve sous pression du réacteur, une capacité de stockage d'eau à l'intérieur du Confinement (ou Dans-le-Réacteur) (IRWST) pour refroidir le cœur s'il venait à entrer en fusion ainsi que des sources d'énergie de secours. Réduire les conséquences d'une attaque aérienne semblable à celle du 11 septembre 2001 requiert un double confinement du bâtiment avec systèmes de refroidissement adéquats.

La combinaison de tous ces renforcements tend à réduire la possibilité d'une fusion du cœur sous haute pression par un facteur bien supérieur à dix dans le cas des réacteurs de Gen-II+, et à, au fond, garder le contrôle de toutes les fonctions de sûreté en cas d'accident. L'erreur humaine est quant à elle réduite par la mise en place d'intervention de l'exploitant sur le long terme. Le résultat est que les conséquences radiologiques d'un accident grave ont été drastiquement réduites, de sorte que les objectifs de « pas de relocalisation permanente, ni de nécessité d'évacuation urgente au-delà du voisinage immédiat de la centrale, mise sous abri limitée, pas de restrictions sur le long terme en termes de consommation de nourriture » soient remplis.

D'un point de vue opérationnel, le flux de neutrons atteignant la cuve du réacteur a été réduit, ce qui permet d'allonger substantiellement la durée de vie de l'installation. Enfin, la dose collective reçue par les travailleurs a été diminuée par un choix approprié de matériaux et d'équipements, simples à décontaminer et à maintenir. Les déchets radioactifs des réacteurs de Gen-III devraient être aussi considérablement réduits comparés aux taux atteints dans les Gen-II par TWh.

¹ INSAG - Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants – A 1999 revision to INSAG-3 Rev. 1 (1975)

² IAEA – Fundamental Safety Principles – Safety fundamentals – SF-1 - 2006

³ IAEA - Safety of Nuclear Power Plants: Design - Specific Safety Requirements - SSR-2/1 (Rev. 1) - 2016

⁴ WENRA – Western European Nuclear Regulators' Association - Report on Safety of new NPP designs (2013)

⁵ WENRA – id.

Les compagnies d'électricité américaines et européennes ont traduit ces exigences réglementaires en des spécifications plus pratiques (URD aux USA, et EUR en Europe). Plusieurs conceptions de réacteurs ont été développées remplissant toutes ces exigences, telles que celles des AP600/1000, EPR, VVER1000/1200, HPR1000, CAP1400, APR1400, APWR1500, ABWR, ESBWR, etc.

Les réacteurs répondant à ces exigences qui ont été qualifiés en tant que GEN-III+ sont prêts à être mis en place industriellement. Deux unités ABWR sont entrées en exploitation commerciale depuis 1996. Il y a huit unités AP1000 actuellement soit en cours de construction soit en train d'être mises en service en Chine et aux États-Unis dont le projet de tête de file se situe à Sanmen, en Chine ; quatre unités EPR en Finlande, en France, et en Chine ; la mise en service du premier de ces EPR à Taishan est prévue d'ici fin 2017. La Chine a aussi commencé la construction en 2015 de quatre unités HPR1000, dont le début d'exploitation est prévu en 2020. La GEN-III+ deviendrait alors la flotte principale de l'énergie nucléaire pour un 'un déploiement massif à court et moyen terme.

À cause toutefois de ces améliorations de sûreté et de la complexité des premières mises en place en matière d'ingénierie, pratiquement tous les projets de démonstration GEN-III ont dû être ou retardés ou reportés en raison de dépassements de budget et de pressions financières dues à ces augmentations, sauf, jusqu'ici, pour le HPR1000.

En raison des efforts significatifs réalisés pour la sûreté des installations, on doit accroître d'autant plus la compétitivité économique des centrales GEN-III/III+, par (1) l'optimisation de la conception des réacteurs, (2) par l'utilisation des technologies de l'informations modernes, (3) par des achats massifiés, (4) par une construction modulaire standardisée, (5) par des partenariats globaux dans les chaînes de fournisseurs, (6) par des solutions financières novatrices, (7) des réglementations permettant d'apporter à l'industrie plus de soutien, (8) par des supervisions accrues pour réduire les durées de construction, (9) par l'amélioration de l'efficacité thermique et de l'exploitation du réacteur, et en conséquence, (10) par le renforcement de la sécurité et de la compétitivité de l'énergie nucléaire.

La stratégie de standardisation française des réacteurs de Gen-II+ dessine quelques contributions importantes pour renforcer la sûreté des réacteurs, tout en réduisant les coûts de construction. Cette stratégie pourrait aussi être employée afin de réduire les coûts de la génération Gen-III et maintenir l'énergie électronucléaire comme la plus efficace de toutes les sources d'énergies capable d'œuvrer en mode de fonctionnement en base. Un plan de remplacement progressif d'une partie du parc français par des réacteurs Gen-III est en cours d'examen.

La Chine quant à elle a élaboré un grand plan de développement de l'énergie nucléaire, et tout au long de 30 années de construction en continu de centrales nucléaires, a installé une puissante infrastructure comprenant développement des compétences en R&D, conception et ingénierie, fabrication, construction, gestion de projet, mise en service et capacité d'exploitation. Sur ces bases, la Chine envisage une coopération stratégique avec les parties prenantes.

Conclusions

La plupart des réacteurs nucléaires connectés au réseau sont du type seconde génération (Gen-II) avec un pourcentage important améliorés au niveau Gen-II+, c'est-à-dire, renforcés pour répondre à des exigences de sûreté plus strictes. Les réacteurs de Gen-III+ comportent des récupérateurs de corium en cas de fusion du cœur ainsi que d'autres systèmes de sécurité, ce qui réduit la fréquence de fusion du cœur sous haute pression par un facteur supérieur à 10. Il y a ainsi plus de tolérance pour l'erreur humaine, grâce à une stratégie d'intervention de la part de l'exploitant qui laisse assez de temps d'action pour que la population dans un plus large voisinage de la centrale n'ait ni besoin d'être évacuée, ni de s'inquiéter de la consommation de nourriture. Des progrès similaires ont été faits sur la question des fluences neutroniques sur la cuve du réacteur et sur la réduction de l'exposition aux radiations. De tels réacteurs sont désormais prêts à être mis en place industriellement. Toutefois, de telles améliorations de sûreté ont un prix et ont mené à des délais substantiels, à des dépassements de budget et à des pertes de compétitivité.

Section 4. Promesses et défis des nouveaux concepts innovants des réacteurs futurs de 4^e génération

Recommandations

Afin que le lancement des Réacteurs Rapides au Sodium de Gen-IV (SFR) et des Réacteurs à Très Hautes Températures (VHTR) puisse se faire en temps et en heure, les Académies recommandent la construction et l'exploitation, durant les décennies à venir, de démonstrateurs technologiques de ce type de réacteurs, ainsi que d'usines dédiées au cycle du combustible associé. Le lancement et l'exploitation des SFR requièrent au préalable un retraitement des combustibles usés pour pouvoir effectuer un recyclage multiple du plutonium et de l'uranium. Ainsi, un accent tout particulier devrait être mis sur le cycle combustible des SFR. Si l'on se fie aux technologies actuelles, les SFR sont une source prometteuse de génération d'électricité sur une base de matériaux nucléaires fissiles/fertiles accumulés par l'humanité depuis le début de la production d'énergie nucléaire par fission. Les VHTR peuvent fournir de très hautes températures pour des usages multiples industriels. Selon les stratégies énergétiques nationales actuelles, le déploiement des SFR de Gen-IV et des VHTR est prévu pour après 2030.

L'une des questions centrales de l'énergie électronucléaire est l'extraction du maximum d'énergie du combustible nucléaire tout en maximisant dans le même temps la sûreté. Pour ce faire, on utilise des isotopes fissiles et fertiles d'uranium (U) et de plutonium (Pu). Un isotope fertile comme le ^{238}U donne un isotope fissile comme le ^{239}Pu via des réactions nucléaires induites par les neutrons thermiques ou rapides.

Situation actuelle

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire mondiale est produite (à l'exception de certaines unités) au travers de types de réacteurs à neutrons thermiques (TNR) alimentés par de l'oxyde d'uranium naturel enrichi en ^{235}U (combustible UOX). L'énergie relâchée par le combustible provient du ^{235}U (à hauteur de 70 %) et par la fission de ^{239}Pu , ce dernier isotope étant produit in situ dans le combustible à partir de ^{238}U .

Certains réacteurs TNR sont partiellement alimentés par un oxyde mixte U-Pu (combustible MOX). Le plutonium est récupéré à partir de combustible UOX usé par un procédé de retraitement, U est l'uranium appauvri qui subsiste après que l'uranium naturel ait été enrichi. L'énergie du combustible MOX trouve, elle, son origine dans la fission du Pu (90 %). Le recyclage du plutonium à partir du combustible usé UOX permet de ne pas trop consommer d'uranium naturel, et diminue la quantité des SWU (Unités de Travail de Séparation) nécessaires. Mais le Pu ne peut être aisément recyclé qu'une fois dans l'un des TNR appropriés.

Un TNR n'utilise pas toute l'énergie potentielle de l'uranium naturel car pratiquement tous les isotopes ^{238}U restent à l'intérieur du combustible usé. D'un autre côté, pour des raisons

de sûreté, la combustion du combustible dans les TNR se limite à typiquement 50 GWj/t (GigaWatt.jour par tonne), avec une température du liquide de refroidissement aux alentours de 300°C.

La seule façon d'effectuer la fission de ^{238}U et de le transmuter en ^{239}Pu , avec un bon rendement, est d'utiliser des neutrons rapides. Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) sont conçus pour tirer un maximum des propriétés de tels neutrons. L'énergie provient alors de la fission de tous les isotopes de U et de Pu. Dans les RNR, la combustion du combustible MOX peut attendre des valeurs jusqu'à 140 GWj/t (ou plus) et la température du liquide de refroidissement 500 °C.

À ce jour, seules quelques unités RNR ont été connectées au réseau en Russie.

Changement majeur attendu

Il y a quinze ans, le Forum International sur la Génération-IV (GIF) a initié un effort conjoint de recherche sur les systèmes nucléaires du futur. Cela a donné naissance à un partenariat actif entre la Chine, la France, la Corée, le Japon, la Russie, les États-Unis et l'Union Européenne. Les buts techniques et la grille d'évaluation associée ont été définis par le GIF selon six critères : la durabilité, les budgets, la sûreté et la fiabilité, la minimisation des déchets, la résistance à la prolifération et la protection physique. Six des systèmes nucléaires les plus prometteurs furent sélectionnés : deux Réacteurs Refroidis au Gaz (hélium), deux Réacteurs Refroidis par Métal Liquide (sodium et alliages de plomb), un Réacteur Refroidi A l'Eau Supercritique, et enfin un Réacteur à Sel Fondu.

Parmi cette sélection, le système avancé du Réacteur Rapide Refroidi au Sodium (SFR) alimenté au MOX fut considéré comme étant le système le plus à même d'être commercialisé durant ce siècle par pratiquement tous les partenaires du GIF. Le VHTR (Réacteur Nucléaire à Très Haute Température) est actuellement activement développé par la Chine, le Japon et la Corée à la suite des progrès effectués sur celui-ci aux États-Unis, en Allemagne et en Afrique du Sud. La France a, quant à elle, apporté une contribution limitée au développement des VHTR mais a initié des recherches sur le GFR (Réacteur Rapide Refroidi Au Gaz).

Les SFR sont principalement concentrés sur la production d'électricité et bénéficient de plus de 400 « années réacteurs » d'expérience d'exploitation depuis 1951. Le VHTR est quant à lui principalement dédié à la cogénération d'électricité et production d'hydrogène, un hydrogène notamment extrait de l'eau en usant de procédés thermo-chimiques, électro-chimiques ou hybrides. Sa température de sortie élevée le rend aussi attractif pour les industries chimique, pétrolière et sidérurgique. On accumule de l'expérience sur l'exploitation des VHTR depuis 1963.

Les SFR et VHTR disposent tous deux d'un potentiel inhérent de sûreté et sont conçus pour exclure toute fuite de produits de fission radioactifs dans l'environnement sous toutes les conditions d'exploitation, même en cas d'accident.

La France est en train de développer de façon active un SFR de Gen-IV de 600 MWe, en s'appuyant sur son expérience de l'opération des SFR, de retraitement du combustible MOX usé et de recyclage du Pu. La Chine prévoit de développer un SFR de démonstration de 600 MWe en s'aidant de l'expérience du CEFR. Le Japon a aussi une certaine expérience en ce qui

concerne l'exploitation des SFR. La Russie a, elle, des FNR connectés au réseau et a des plans sur le long terme de plus amples développements. Le programme nucléaire civil de l'Inde, s'appuyant jusqu'ici principalement sur le thorium, comprend la mise en service d'un SFR alimenté au MOX.

La Chine suit un plan détaillé de R&D sur le long terme lié aux VHTR.

Les promesses des SFR de Gen-IV et des VHTR

À l'heure actuelle, les réacteurs SFR de Gen-IV nous paraissent prometteurs de bien des façons. Un des aspects importants de cette impression est le fait que pratiquement tous les isotopes de l'uranium, du plutonium, et des noyaux plus lourds soumis à un flux de neutrons rapides peuvent subir la fission. Cela signifie que l'uranium appauvri, ainsi que l'uranium et le plutonium présents dans les combustibles usés, peut faire l'objet d'un multi-recyclage dans un FNR. Ainsi, un FNR peut générer son propre combustible MOX à condition que le combustible usé soit retraité peu de temps après avoir été déchargé du réacteur. Dans le combustible MOX des SFR, 15 % de l' ^{238}U (obtenu de U appauvri (DU) après enrichissement ou de U obtenu après retraitement) est converti en plutonium. L'énergie extraite de l'uranium naturel par un FNR est seulement limitée par les possibilités industrielles de recyclage du combustible usé. Nos ressources en matériaux fissibles sont donc pour ainsi dire pratiquement illimitées avec une technologie à neutrons rapides.

Un fort taux de combustion permet de laisser le combustible dans un SFR deux fois plus longtemps que dans un TNR et d'avoir un contenu en actinides mineurs plus faible. Cela permet une exploitation plus économique des SFR que des TNR et ouvre une nouvelle perspective vers une gestion des déchets meilleure. En effet, les déchets de haute activité des SFR contiennent moins de nucléides à vie longue que ceux venant des TNR. Ce point sera examiné plus en profondeur plus loin, dans la section dédiée à la gestion des déchets nucléaires.

Différentes configurations de SFR sont envisageables car elles sont conçues pour produire une quantité moindre, égale, ou supérieure à la quantité de Pu qu'elles utilisent. Dans la configuration à isogénération, la quantité de Plutonium dans un parc SFR reste stable, mais dans la configuration « brûleur » le stock de Pu peut être fortement réduit. Cela réduit le risque de prolifération et permet de prévoir en sécurité la fin de la production d'énergie nucléaire si jamais une telle décision devait être prise dans le futur. Un SFR peut aussi être configuré afin de transmuter des éléments de trans-plutonium, comme l'américium.

Avant le lancement d'une nouvelle génération de SFR toutefois, on doit résoudre divers problèmes scientifiques et technologiques dans le dessin de tels réacteurs et dans la maîtrise du cycle de combustible usé correspondant.

Selon le Feuille de Route des GEN-IV mis à jour en 2014, le VHTR peut fournir chaleur et électricité avec une gamme de température en sortie du cœur comprise entre 700 °C et 950 °C, et potentiellement de plus de 1000 °C à l'avenir. La température en sortie du cœur renvoie en fait à la température de l'hélium, c'est-à-dire, de la température du fluide de refroidissement primaire, tandis que la température de la vapeur d'eau dépend, elle, des caractéristiques qui auront été prévues lors de la conception. Il faut savoir que la R&D des VHTR se concentre à la fois sur le combustible, sur le cycle du combustible, sur les matériaux,

la production d'hydrogène, sur les méthodes de simulation numérique, sur la validation et le benchmarking, sur les composants et les turbo machines de hautes performances, l'intégration du système, et l'évaluation du système.

Les réacteurs commerciaux de Gen-IV devraient atteindre impérativement au moins le même niveau de sûreté que ceux des TNR de Gen-III. Cela requiert beaucoup d'innovations vis-à-vis des composants des réacteurs FNR classiques. Les conceptions de réacteurs de démonstration de ce type sont en cours en France et en Chine, en accord avec les plans du GIF. Les SFR devraient être considérés comme partie essentielle de tous les développements futurs de l'énergie nucléaire. Cette technologie a un potentiel de génération pratiquement infini d'une énergie redistribuable, via la transmutation/fission de tous les isotopes d'uranium, et pas seulement de l'utilisation des seuls 0,7 % de ^{235}U dans l'uranium naturel. Les SFR fournissent aussi un outil de contrôle des inventaires du plutonium et de transmutation des actinides à longue vie, ce qui pourrait faciliter la gestion des déchets nucléaires à vie longue. La France était l'une des pionnières de cette technologie et est en train de développer un démonstrateur technologique (Astrid – 600 MWe) à échelle $\frac{1}{2}$ d'un réacteur commercial ; elle y incorpore les retours d'expérience acquis lors de l'exploitation des réacteurs passés et des innovations importantes. La Chine, quant à elle, exploite avec succès un prototype de réacteur (20 MWe) de ce type depuis 2011 et prévoit de commencer la construction de son CFR600, un réacteur de démonstration également à échelle $\frac{1}{2}$, à très court terme. La construction du premier SFR Chinois commercial devrait commencer dès 2035. La France prévoit le déploiement de ses réacteurs SFR commerciaux pour un peu plus tard au cours de ce siècle.

Conclusions

Pour résumer, les SFR de la Gen-IV et les VHTR sont les réacteurs les plus prometteurs pour l'avenir de l'énergie nucléaire, produisant respectivement pour les SFR de l'électricité, et pour les VHTR des fluides/gaz de haute température en plus de l'électricité. Au stade actuel de développement, où l'énergie électronucléaire est générée principalement à partir de l'exploitation des TNR, la production en augmentation de l'électricité augmente les stocks de ^{239}Pu autour du monde, à un taux d'environ 75 t/an, ainsi que ceux d'autres matériaux nucléaires. Cette augmentation de quantités importantes du stock de Pu induit de nombreux problèmes : non-prolifération, stockage en tant que combustible usé si on considère le combustible usé comme un déchet, ou utilisation dans les TNRs de matériaux fissiles artificiellement créés si on les considère comme des ressources. La quantité de Pu toujours produite dans beaucoup de pays et dans les années à venir, offre une bonne perspective pour le lancement dans quelques décennies de SFR de Gen-IV à sécurité renforcée, qui pourraient fournir de l'énergie pendant des centaines d'années. Toutefois cela implique de changer drastiquement nos systèmes actuels de réacteur, d'installer un tout nouveau cycle de combustible nucléaire et de concentrer notre R&D sur l'usage à long terme de l'énergie nucléaire.

Annexe A

Les initiatives de Génération-IV en France

Depuis 2010, le CEA a la responsabilité du projet Astrid (Réacteur Technologique Avancé à Sodium pour Démonstration Industrielle), un projet consistant en deux parties, soit (i) la conception du réacteur, et (ii) la conception de l'installation pour produire son premier combustible MOX spécifique, puis pour recycler le Pu et tester la transmutation de l'américium. Astrid doit aussi prouver que la combustion du Pu est possible. Le projet réunit beaucoup de partenaires industriels des domaines nucléaire et non-nucléaire et bénéficie de près de 40 années d'exploitation des RNR Phenix et Superphénix.

Le réacteur Astrid est un réacteur de type SFR à piscine, chargé de combustible MOX, avec un niveau de puissance qui correspond à un système de démonstration industriel. Il est conçu pour avoir quatre boucles dans le circuit primaire, avec un générateur de vapeur ou un générateur d'azote, selon la version de sa conception, pour chaque boucle à sodium du circuit secondaire. Le circuit tertiaire est un système à une seule ligne de vapeur d'eau ou un système à deux lignes d'azote. Les paramètres de vapeur ou d'azote sont d'environ 15 MPa et de 500°C. Deux systèmes d'arrêt ainsi qu'un système d'arrêt indépendant supplémentaire ont été conçus afin de pouvoir contrôler la réactivité. Plusieurs systèmes d'évacuation de la chaleur sont connectés à la piscine chaude ou à la cuve.

Les innovations dans le domaine de la sécurité se concentrent sur le contrôle de la réactivité du cœur en cas de perte de sodium, et sur le refroidissement et le confinement de la radioactivité en toutes circonstances. Le CEA a breveté un nouveau cœur hétérogène avec un coefficient de vide proche du zéro négatif, une avancée majeure dans la technologie du FNR. Cela nécessite des sous-ensembles de MOX spécifiques. Aucun des SFR en service ne comporte une telle stabilité intrinsèque du cœur. Le risque chimique principal des réactions eau-sodium est sous contrôle grâce à une version de conception améliorée des générateurs de vapeur. En guise d'alternative potentielle toutefois, un échangeur sodium-azote, éliminant tout contact entre le sodium et l'eau, est en cours de test. Cet échangeur associé à une turbine à azote devrait représenter une seconde innovation majeure.

De nouvelles méthodes de détection de fuite de sodium ont été brevetées par le CEA. En cas de fusion complète du cœur, le corium est récupéré. L'évacuation de l'énergie résiduelle est gérée par plusieurs systèmes passifs. Enfin, les enceintes de double confinement et les systèmes d'étanchéité à l'air devraient prévenir toute fuite de radioactivité dans l'environnement en cas d'accident.

Les innovations dans le domaine de l'exploitabilité sont liées à de nouveaux systèmes d'inspection en service et de réparation des composants des réacteurs. Des systèmes spéciaux de manipulation de sous-ensembles pour le réapprovisionnement en combustible sont en cours de conception afin de gagner du temps.

Le processus de fabrication du combustible MOX neuf pour le réacteur Astrid est quant à lui industriellement opérationnel. Le problème principal à résoudre réside dans le retraitement industriel du combustible usé MOX des SFR, hautement concentré en Pu, avec une rotation

courte de quelques années. Des milliers de tonnes de combustible de la sorte ont fait l'objet de retraitement en France.

Malgré des avancées majeures dans la conception des SFR pendant les vingt dernières années, il reste toujours des améliorations à faire sur Astrid, par exemple, pour développer des matériaux pour les composants des réacteurs et le gainage du combustible. Il est notamment très important de développer des aciers pour le gainage permettant une augmentation de la combustion jusqu'à un degré de 200 GWj/t.

La décision de lancement de la construction d'Astrid ne sera pas prise avant 2024. La stratégie française concernant le futur de l'énergie nucléaire consiste en la création d'une réserve stratégique de Pu en stockant le combustible usé MOX non retraité issu des TNR ainsi que d'autres matériaux nucléaires, comme l'uranium appauvri. Cela devrait permettre le lancement progressif, au-delà de 2050 dans le meilleur des cas, d'un parc auto-suffisant de SFR avec, potentiellement, la transmutation de l'américium qu'ils généreront.

Il est aussi possible de lancer l'exploitation de TNR en se servant du mono-isotope fertile ^{232}Th , avec du ^{235}U ou Pu en tant qu'isotopes fissiles. Le fissile ^{233}U est produit dans le combustible par des procédés nucléaires à l'intérieur du ^{232}Th . Le ^{233}U a des propriétés fissiles attractives et peut être, ou pourrait être, produit à l'intérieur du TNR par l'irradiation du ^{232}Th . Certains prototypes des réacteurs Th opèrent avec ou plus ou moins de succès. L'Inde est en train de tester un « cycle Thorium ». L'une des versions modernes de Réacteur à Neutrons rapides à Sels Fondus (FRMSR) en cours d'examen en France comprend une température élevée (de 600 à 700 °C), où les sels fondus (Th, Li et fluorides Be) agissent simultanément en tant que carburant et liquide de refroidissement. Ce système produit des petites quantités d'actinides lourds, mais il faut toutefois alors extraire périodiquement les produits de la fission du combustible, par des procédés pyro-chimiques en batch ou en ligne. L'extraction du ^{233}U est aussi nécessaire au maintien d'un flux stable de neutrons rapides. De tels réacteurs peuvent transmuter des actinides en ligne

Plusieurs problèmes ont toutefois toujours besoin d'être résolus pour de tels systèmes. Même si la perspective de pouvoir utiliser un combustible liquide reste très attirante, elle soulève aussi des questions sur le refroidissement de l'énergie résiduelle, la corrosion, le confinement de la radioactivité, la radioprotection contre les rayons gamma à haute énergie, et la gestion de nouveaux types de déchets. Les MSR sont équilibrés entre avantages et désavantages, mais leur développement n'est pas prévu en France à des fins de production commerciale d'électricité, sauf si un besoin massif de nucléides fertiles se fait sentir.

La contribution de la France au développement des VHTR s'est limitée aux matériaux et à la production d'hydrogène. Le CEA a réalisé des efforts significatifs entre 2000 et 2008 afin de parvenir à concevoir un prototype de GFR dans le cadre des études du GIF. Ce projet Allegro était prévu pour être un système de génération d'énergie de 75 MWth, refroidi à l'hélium à 75 bars et à 850 °C, avec cœur de démarrage à combustible MOX (30% Pu dans des aiguilles de combustible gainées d'acier inoxydable) et sur le long terme un cœur en carbure d'UPuC avec le même contenu de plutonium dans des aiguilles gainées de carbure de silicium. En 2005, le CEA a donné priorité à la R&D pour le projet Astrid tandis que le projet Allegro continue à être poursuivi, faisant partie intégrale d'un programme Européen mais toutefois avec une capacité d'énergie réduite à 40 MWth puisque le combustible de carbure

initialement prévu n'est pas encore disponible et qu'une R&D plus approfondie doit être réalisée pour la conception de matériaux.

Les initiatives de Génération IV en Chine

SFR

La seconde étape de la stratégie nucléaire chinoise « TNR- FNR-réacteurs à fusion » a pour objectif principal le développement des FNR afin de répondre à la demande en énergie et remédier à la possible pénurie future de ressources naturelles en uranium. Un autre objectif serait de permettre la transmutation de nuclides à longue vie.

Le démonstrateur SFR, c'est-à-dire le CFR600, sera construit en Chine avant 2025. Le but du CFR600 est de faire une démonstration du cycle fermé du combustible et d'établir de standards et règles pour les grands SFR.

Les choix techniques réalisés pour le CFR600 répondaient aux objectifs suivants :

- Respecter les critères de conception en termes de sûreté de la réglementation nationale révisée après l'incident de Fukushima.
- Utiliser les critères de sûreté intrinsèque et le principe de défense en profondeur. Essayer d'ajuster les exigences de fiabilité et de sûreté du système GEN-IV.
- Adopter des composants matures et techniquement prouvés. Toutes les conceptions innovantes doivent être totalement certifiées par différentes méthodes.
- Accroître si possible la cible économique en comparaison du CEFR et aux autres projets de SFR.

Le CFR600 est un réacteur rapide type piscine chargé de combustible MOX. Sa puissance thermique est de 1500 MWth, pour une puissance électrique de 600MWe. Il y a deux boucles dans le circuit primaire et 8 générateurs de vapeur modulaires pour chacune des boucles du circuit secondaire. Le circuit tertiaire est un système typique à vapeur d'eau installé avec une turbine. Les paramètres de vapeur sont de 14 MPa et 480°C. Deux systèmes d'arrêt indépendants et un système supplémentaire d'arrêt hydraulique ont été conçus et installés pour permettre un meilleur contrôle de la réactivité, ainsi qu'un système passif d'évacuation de la chaleur résiduelle lié à la piscine chaude. Les enceintes de confinements primaire et secondaire ont été conçues spécifiquement pour le réacteur. La conception préliminaire du CFR600 a été achevée en 2016. La première pierre du projet est prévue pour la fin de l'année 2017.

VHTR

Le programme chinois de R&D concernant le réacteur à haute température refroidi au gaz (HTGR) a commencé au milieu des années 1970, et la construction du réacteur d'essais HTR-10 réalisée dans les années 1990. La Chine avance désormais vers le développement du projet de démonstrateur du module réacteur à boulet à haute température refroidi au gaz - HTR-PM – en tant que leader technique de l'industrie. En février 2008, la centrale de démonstration de 200 MWe HTR-PM fut approuvée dans le cadre des Projets Nationaux Majeurs Scientifiques et Technologiques. Selon le rapport de la feuille de route du projet, les perspectives du développement du HTR-PM en Chine concernent son potentiel pour une

technologie nucléaire à haute efficacité comme supplément à la technologie des réacteurs à eau pressurisée, en particulier dans le domaine des procédés utilisant la chaleur nucléaire. Le développement du HTR-PM contribuera aussi plus généralement à des innovations plus profondes dans les technologies nucléaires avancées. Le HTR-PM consiste en deux modules de réacteurs à boulets couplés à une turbine à vapeur de 210 MWe. Les températures de l'hélium au cœur du réacteur en entrée/sortie sont respectivement de 250/750 °C, et de la vapeur à 13.25 MPa/567 °C est produite en sortie du générateur de vapeur. La première pierre de la centrale de démonstration du HTR-PM fut posée le 9 décembre 2012 à Rongcheng, dans la province de Shandong. La construction du bâtiment du réacteur fut achevée en 2015 et deux cuves de réacteur installées en 2016. Les autres composants principaux sont en cours d'installation. Selon le planning initialement prévu, la centrale devrait commencer à générer de l'électricité en 2018. En 2005, une usine de production de combustible prototype fut construite à l'INET avec une capacité de 100 000 éléments de combustible par an. Par la suite, une usine de production de combustible avec une capacité de 300 000 éléments fut construite à Baotou, en Chine du Nord. La production de combustible pour la centrale de démonstration du HTR-PM a commencé en 2016. Il est prévu qu'à la suite de cette démonstration opérationnelle, le déploiement commercial des HTR-PMs sur une construction en lot soit effectué, tandis que des unités avec encore plus de modules (exemple six) sont en cours de conception. On envisage également de développer des groupes de à modules de réacteurs standardisés couplés à une seule turbine de vapeur

Section 5. Promesses et défis des nouveaux concepts novateurs de réacteur et de technologies : les Petits Réacteurs Modulaires ; des technologies perfectionnées

Recommandations

Les Réacteurs à Eau Légère appartiennent à une technologie encore jeune qui recèle toujours un potentiel énorme de progression.

- Le développement des Petits Réacteurs Modulaires devrait être encouragé et financièrement soutenu, car ils constituent une réponse flexible aux exigences d'une économie bas carbone. Il faudrait renforcer la coopération internationale à leur sujet dans le cadre de l'AIEA, afin de développer de nouveaux régimes réglementaires adaptés à leur transportabilité de pays en pays.
- On attend des résultats prometteurs de la Recherche et Développement, qui seront applicables à tous les Réacteurs à Eau Légère. Le financement de la R&D des technologies spécifiquement nucléaires, devrait rester toujours significativement élevé. De la même façon, il faudrait encourager systématiquement les transferts de technologies entre secteurs. Au vu des initiatives entreprises par l'AIEA et la NRC des États-Unis, les régulateurs devraient réviser les nouvelles caractéristiques et technologies introduites en prenant en compte l'expérience obtenue par de telles technologies dans d'autres secteurs.

Dans le contexte de la transition énergétique, les exigences du marché ont généré un regain d'intérêt pour les petits réacteurs modulaires (SMR). Ils pourraient facilement trouver leur place dans une économie à bas carbone. Les SMR pourraient ainsi devenir sources d'énergies propres, stables et distribuées.

Comme le développement des SMR l'a démontré, la technologie des réacteurs à eau légère ne peut être considérée comme stagnante. La Recherche et Développement est en cours, et ses résultats seront employés afin de simplifier l'exploitation et la conception de tous les réacteurs nucléaires – peu importe leur taille – tout en renforçant leur sûreté.

1. *Petits réacteurs modulaires*

➤ Passé de la Recherche et Développement

Depuis les années 1970, le développement industriel des Centrales Nucléaires centré principalement sur des réacteurs conventionnels à boucles s'est accompagné d'une augmentation continue des capacités de génération des réacteurs, jusqu'à atteindre plus de 1500MWe pour les derniers modèles, principalement pour des raisons économiques.

De plus, la recherche et le développement concernant les réacteurs innovants de petites ou moyennes tailles (50 – 300MWe) a été aussi fortement encouragée afin de développer de

multiples applications : pour son utilisation dans des lieux isolés, dans des réseaux de petites tailles ou de tailles moyennes non connectés aux voisins, en remplacement de vieilles unités à charbon, en cogénération pour l'utilisation de la chaleur perdue à l'intérieur des réseaux de chauffage (pour chauffage urbain et autres procédés de fourniture de chauffage), dessalinisation de l'eau de mer, pour le développement des îles, ou encore pour l'introduction progressive d'un programme de production d'énergie nucléaire dans un pays encore débutant dans le domaine.

Il est évident que malgré un marché souvent prometteur et des études de conception tout aussi prometteuses, ces SMR n'ont pas encore été capables de démontrer tout leur côté pratique pour des applications générales, principalement à cause d'une progression des développements plutôt lente, et pour des raisons économiques (installation, décentralisation et coût de formation), mais aussi à cause de raisons liées aux sites et aux délais de mise en place.

➤ Intérêt renouvelé

Depuis plusieurs années, principalement suite à l'initiative du DOE aux États-Unis, il s'est créé un intérêt renouvelé pour les SMR pour des raisons d'abord de leadership de l'énergie nucléaire avancée mais aussi en raison de développements majeurs en cours de réalisation dans le paysage de l'énergie et de la technologie nucléaire. Le SMR change la donne, et pourrait fournir une solution différente de celles plus classiques de cogénération nucléaire avec un haut niveau de sûreté.

Du côté purement énergétique, on peut trouver quatre raisons à ce regain d'intérêt : (1) Nécessité de réduction des énergies fossiles ; (2) Décentralisation de la génération d'électricité (énergies renouvelables, réseaux intelligents, stockage d'énergie) ; (3) Nécessité de rendre les exploitants agiles et flexibles et (4) Financement des investissements sur le long terme.

Sur un aspect purement technologique, les SMR incluent une grande variété de conceptions de réacteurs et de technologies, comme : des PWR intégrés pouvant être employés sur le court terme ; des réacteurs de petite taille Gen-IV avec liquide de refroidissement/modérateur sans eau pouvant être employés sur le moyen terme, SMR type boucle à impact converti ou modifié, comprenant des NPP flottants montés sur barge et des réacteurs immergés. Trois développements majeurs ont pu servir à recentrer la compétitivité et l'attractivité des SMR :

- (1) L'utilisation potentielle du concept de sécurité passive pour des réacteurs plus petits, ce qui répond non seulement aux exigences de sécurité mais en même temps permet de simplifier les plans des réacteurs ;
- (2) L'émergence d'une construction modulaire faisable à l'intérieur d'une usine ce qui devrait réduire les coûts globaux et temps de construction sur place.
- (3) Telle un « plug and play », des centrales peuvent être construites entièrement en usine, transportée et connectées au réseau ; la seule opération significative à effectuer localement est de connecter la station au réseau d'électricité.

Parmi les nombreux concepts de SMR présentement étudiés aux États-Unis, en Chine, en Corée du Sud, au Japon, au Royaume-Uni, en Argentine et aussi en France, deux modèles génériques émergent : les SMR terrestres et les SMR transportables.

- Les SMR terrestres recherchent une modularité de l'îlot nucléaire et recherchent une installation dans un lieu spécifique avec du génie civil et des installations auxiliaires additionnelles, des unités turbine-générateur, des connexions au réseau.
- Des SMR transportables, complètement découplés du site d'opération, fournissant de l'agilité, de la flexibilité et de la réversibilité tout en réduisant en même temps le temps d'appropriation globale au minimum pour les pays nouveaux-venus .



En tant que SMR typique terrestre, le ACP100 est un petit réacteur modulaire de 125MWe développé par la Chinese National Nuclear Corporation (CNNC). L'ACP100 adopte les technologies pratiques et éprouvées des réacteurs à eau légère dotés de cinq caractéristiques techniques significatives : réacteur intégré, caractéristiques inhérentes de sûreté, système de sûreté entièrement passif, aménagement souterrain, et unités jumelles partageant un turbogénérateur de 250MWe.

Plusieurs SMR transportables sont en cours de construction ou de développement, dont :

- Un concept de SMR sur barge proposé par la Russie et la Chine, avec une première unité Russe en cours de finalisation tandis que la Chine est en train de développer rapidement les ACP100S (125MWe) et ACPR 50S (50MWe) .



Fig. 2-NPP flottant ACP100S développé par CNNC Fig. 3 – Seanergie : un SMR immergé

- Le concept d'immersion de Seanergie étudié en France, capable de fournir plus d'énergie (160MWe). Une option alternative sur côte est également à l'étude.
- *Défis SMR et solution SMR*

L'industrialisation de ces modèles requiert la preuve de la compétitivité, l'acceptation du public, et d'un cadre réglementaire pour les réacteurs transportables sur lesquelles travaille l'AIEA.

Pour se plier aux actuelles exigences du marché, les SMR doivent être développés avec des concepts vraiment novateurs, absolument pas comme de la même façon que les projets de réacteurs Gen-III actuels avec des restrictions de taille.

La compétitivité économique des SMR peut être évidemment renforcée par des conceptions novatrices. Les SMR peuvent être économiquement compétitifs au regard des systèmes de production d'électricité à base d'énergie solaire, éolienne, ou de gaz au gaz ou de diesel dans le cadre d'applications particulières.

Si des solutions similaires à des « plug and play » devaient être certifiées dans le futur avec des modalités de conception qui les rendraient totalement indépendantes du site d'installation, ces SMR deviendraient de facto les mieux placées pour répondre entièrement aux exigences du marché et ainsi contribuer à une transition énergétique réaliste.

2. *Technologies novatrices devant être mises en place dans les grands réacteurs*

Les technologies nucléaires commerciales ne datent seulement que d'il y a quelques décennies. En raison de strictes exigences de sûreté, les innovations ne se font que lentement dans les conceptions de réacteurs. De fait, un énorme potentiel d'amélioration gît pourtant sous-jacent de ces développements, soit par la mise en place de technologies déjà appliquées à d'autres secteurs, soit de technologies spécifiquement développées pour des applications nucléaires. SMR et grands réacteurs commerciaux à eau légère bénéficieraient de telles technologies. Voici des exemples de technologies ainsi développées spécifiques au nucléaire, ou s'étant transférées au secteur nucléaire depuis d'autres secteurs :

Développements spécifiques au nucléaire

- Combustible à haute performance
 - Taux de combustion augmentés avec gonflement limité et relâche limitée de gaz de fission
 - Combustibles tolérants pouvant supporter de plus hautes températures sans fondre, et capables de prévenir ou de limiter la génération d'hydrogène en cas d'accident
- Instrumentation améliorée à l'intérieur du cœur avec une meilleure précision, permettant moins de conservatismes dans l'analyse et l'exploitation des conceptions
- Compréhension améliorée du comportement du corium, pour optimiser la rétention du combustible à l'intérieur de la cuve en cas d'accident
- Mise en place de méthodes de simulations, couplant les calculs thermo hydrauliques et neutroniques en temps réel, qui améliorent considérablement la conception et l'exploitation.

Technologies transférées depuis d'autres secteurs

- Digitalisation des conceptions d'installations, approvisionnement, construction et de

gestion de projet des installations nucléaires (voir la section 8 de ce rapport)

- Nouveaux matériaux composites visant à remplacer l'acier pour les circuits à basse pression
- Béton de qualité supérieure avec des excellentes propriétés mécaniques, et étanchéité

Il faut accorder la priorité à la R&D dans ces domaines, et encourager une coopération internationale quand il n'y a pas d'enjeu de propriété intellectuelle.

Conclusions

L'énergie nucléaire est une technologie relativement jeune, avec un énorme potentiel de progression, ce qui inclut non seulement les réacteurs de Gen.IV, mais aussi les petits réacteurs modulaires. Des briques technologiques telles que des combustibles tolérants aux accidents permettraient à la fois d'améliorer la sécurité et de simplifier le système pour accroître la compétitivité de tous les Réacteurs à Eau Légère. Les SMR hautement innovants pourraient offrir de nouvelles solutions pour développer encore plus la flexibilité et la production décentralisée. Ils permettent aussi une progressivité dans les financements et dans le développement des compétences locales nucléaires dans les pays débutants, et un accès rapide à l'électricité d'origine nucléaire

Section 6. La gestion actuelle des déchets radioactifs et les perspectives pour l'avenir

Recommandations

La gestion des déchets radioactifs (RW) en toute sûreté est un problème clé pour l'expansion future de l'énergie nucléaire. Tous les pays employant l'énergie nucléaire se retrouvent confrontés un jour ou l'autre à ce problème et doivent développer les outils technologiques et administratifs nécessaires afin de pouvoir les gérer. Des obstacles importants sont à dépasser afin de pouvoir stocker des déchets radioactifs finaux, à longue vie. Il y a un accord général pour situer les centres de stockage destinés à de tels déchets au cœur de couches géologiques profondes. Les Académies recommandent d'intensifier la recherche et le développement scientifiques et technologiques pour la gestion de tous types de RW avec une attention toute particulière pour la qualification des roches-hôtes pour le stockage de déchets de haute activité à durée de vie longue. Les Académies considèrent également qu'il faut fortement encourager la coopération internationale sur ce sujet.

Parvenir à gérer en sûreté les déchets radioactifs (RW) produits à chaque étape du cycle du combustible nucléaire, est une contribution importante afin de prouver que l'énergie nucléaire peut être gérée de manière saine et sûre. Ce sujet a un fort impact sur l'idée d'un développement paisible, durable et progressivement extensible de l'énergie nucléaire et le renforcement de la confiance du public. Les déchets radioactifs sont catégorisés selon l'activité et la demi-vie des radionucléides principaux contenus en eux. On les catégorise également selon leur production thermique, la catégorisation des RW dépendant aussi du système de classification des pays individuellement selon leur politique nationale de gestion de déchets radioactifs. La gestion des RW à moyenne et forte activité et à longue vie est une tâche compliquée requérant une attention permanente, à cause des mesures nécessaires de lourdes protections contre la radioactivité et de la production thermique des déchets les plus actifs.

1. Stratégie du cycle du combustible et caractéristiques des RW

Les cycles de combustible nucléaire se séparent en deux catégories, un cycle de combustible sans retraitement (aussi qualifié de cycle ouvert) et un cycle de combustible fermé, dans lequel le combustible usé est retraité afin d'en recycler l'uranium (U) et le plutonium (Pu). Ces cycles reflètent des décisions politiques du pays sur le stockage du Pu en tant que déchet ou sur son utilisation en tant que futur matériau de combustible nucléaire. Dans un cycle sans retraitement, on stockera le combustible usé, en tant que RW ultime de haute activité, à la suite d'un entreposage temporaire de long terme permettant une perte d'énergie des assemblages. Les centres de stockage finaux consistent en effet en des installations nucléaires construites dans des couches géologiques profondes. Selon les analyses de sûreté, la roche hôte devra isoler et à confiner la radioactivité pendant des centaines de milliers d'années.

Dans un cycle de combustible fermé, le combustible usé est retraité, produisant des RW ultimes de « traitement » ou « technologiques » à courte et longue durée de vie. Les RW de traitement à longue durée de vie, contenant tous les radionucléides présents dans le combustible usé, à part l'U et le Pu, sont hautement radioactifs. Toutes les RW à longue vie, initialement entreposées à l'intérieur d'installations particulières, seront envoyées dans un centre final de stockage en couche géologique profonde comme c'est le cas dans le cadre de l'option cycle ouvert. La plupart des pays utilisant l'énergie nucléaire, y compris la France et la Chine, ont adopté une option de cycle fermé. En effet, le cycle du combustible fermé forme la pierre angulaire vers un système d'énergie nucléaire durable, où le U et le Pu seraient multi-recyclés en FNR comme ont l'intention de le faire la France et la Chine. Le cycle fermé du combustible améliore l'efficacité de la consommation de ressources naturelles fissiles et réduit la toxicité des déchets ultimes puisqu'ils ne contiennent pas de Pu. Toutefois il est vrai que le Pu doit être géré dans le cycle du combustible jusqu'à la fin du processus de recyclage. Le volume total de déchet ultimes est légèrement réduit.

2. Les progrès sur la gestion des RW

La gestion des RW inclut le contrôle, la collecte, le tri et le traitement des déchets. Ces actions sont ensuite suivies par le conditionnement de divers RW en colis appropriés afin d'éviter la dispersion des radionucléides. Les colis sont ensuite transportés aux entreposages et sont enfin stockés. Cette étape de stockage est l'objectif central et l'ultime cible de la gestion de déchets. Les prochaines sections se concentrent sur la situation actuelle de la gestion des RW (en excluant les RW à très courte durée de vie ou les RW irradiant des doses insignifiantes qui sont sujettes à des pratiques d'exemption et/ou de déclassification, là où elles existent).

Les déchets à très bas niveau de radioactivité (VLLW)

Peu importent les radionucléides que contiennent les VLLW, leur activité est si faible que ces déchets peuvent être stockés dans des installations de surface comme des centres d'enfouissement des déchets en faible profondeur. Cela inclut la grande majorité des RW nucléaires. En effet, le démantèlement des installations nucléaires peut donner naissance à de grandes quantités de VLLW, sur une proportion de 50 à 75% de tous les RW de déclasserment. On peut donc prédire que le gros de la production des VLLW se produira dans le futur. Au-delà du développement positif des technologies de réduction des volumes, la construction de grandes installations de stockage des VLLW est impérative.

Déchet à Faible Activité ou à Activité Intermédiaire (LILW)

Quand il ne s'agit que de radionucléides à courte durée de vie, le problème de la gestion des LILW peut être résolu par la construction et l'exploitation d'installations de stockage en surface ou subsurface, comme des fosses peu profondes, des structures de bétons près de la surface, des grottes ou tunnels de roches souterraines, des puits de forage verticaux de large diamètre. Toute l'expérience et la pratique du conditionnement des colis de déchets LILW, le transport, la réception sur site, le stockage des colis et les évaluations de sûreté liées à ces tâches sont disponibles.

Les RW de faible activité mais à longue vie, produits en grandes quantités, sont une catégorie spéciale de déchets qui est plus compliquée à gérer. Si on choisit un stockage en subsurface, il faut alors prouver que les radionucléides resteront isolés de la biosphère pendant un long moment à cause de leur longue demi-vie et radio toxicité.

Déchets de Haute Activité (HLW)

Les HLW sont un mélange de matériaux toxiques et de produits dangereux contenant de grandes quantités de radionucléides à longue vie. Ils comprennent par exemple les assemblages de combustible usé ou les colis de produits de fission vitrifiés et des actinides mineurs. Les HLW doivent être entreposés durant des décennies pour se refroidir avant d'être transférés vers un centre de stockage centralisé enfoui profondément dans les couches géologiques. Des pays autour du monde ont réalisé des efforts considérables et extensifs afin de sélectionner de bons sites et concevoir des centres de stockage profond pour les HLW. Quand la Belgique et la France ont choisi des sites se trouvant dans des couches d'argiles, la Finlande et la Suède ont situé quant à elles leurs installations de disposition de HLW dans des couches de granit relativement homogène. L'Allemagne, les États-Unis, la Grande-Bretagne et beaucoup d'autres pays sont toujours en cours de sélection de bons sites au cœur d'une roche-hôte appropriée, les couches de sel et les roches volcaniques ayant jusque-là été abandonnées. La Chine étudie en ce moment à la fois l'argile et le granite afin de déterminer un lieu convenable pour son centre de stockage de HLW. Le choix d'un site prend plusieurs décennies et nécessite des expérimentations dans des Laboratoires de Recherche Souterrains (URL), qui apparaissent comme incontournables. Jusqu'à aujourd'hui, seule la Finlande a obtenu l'autorisation de se lancer dans la construction d'un centre de stockage de HLW dès 2015. Si on en juge par le travail extensif de recherche effectué par chaque pays afin de sélectionner correctement la roche hôte et la bonne conception préliminaire du centre de stockage (comprenant la fermeture étanche), on peut s'attendre à ce que leurs HLW soient isolés de façon sûre.

Conclusions

La gestion internationale des déchets radioactifs se fait sur des objectifs clairs. Elle exige un déploiement sûr de solutions en continue progression pour la gestion des différents types de déchets (VLLW, LILW, et HLW). Cette progression requiert de l'expérience dans la résolution de conflits liés, au travers de transparence de l'information, de compréhension par le public des difficultés rencontrées et de participation. Pour le futur développement de la gestion des RW, les points suivants devront être considérés :

Tout d'abord, les politiques nationales devraient accorder une attention permanente aux sujets de gestion des déchets radioactifs.

Les décisions prises au niveau national sont les forces primaires décisives pour porter un programme de gestion en sûreté reposant sur un système légal bien ancré, des études scientifiques et des solutions techniques bien financées, un planning détaillé et coordonné et un fonds d'investissement adéquat.

La recherche et le développement de la science et des technologies entourant la gestion des RW devraient être intensifiées.

La gestion des RW demande un niveau de science et de technologie élevé en ce qui concerne le traitement et le stockage des déchets pour garantir la sûreté. La construction d'un centre de stockage en couche géologique profonde constitue un problème central de cette gestion, ainsi qu'un défi technique considérable. Chaque composant et système de contrôle doit pouvoir

rester opérationnel pendant plus d'un siècle, et son enceinte doit assurer que les déchets sont totalement isolés. Il est important d'intensifier la recherche et le développement dans les disciplines scientifiques sous-jacentes et d'encourager les innovations technologiques afin d'atteindre effectivement des percées dans les domaines clés de la gestion de déchets.

La coopération internationale et des larges perspectives pour le futur devraient être encouragées

La gestion des RW est un sujet important qui nécessite une attention permanente de tous les acteurs de l'industrie nucléaire. Il est important de développer une coopération internationale et de partager les savoirs, informations et technologies de ce domaine.

Annexe B

Dans chaque pays utilisateur de l'énergie nucléaire, les traits caractéristiques et tendances de la gestion de RW dépendent de plusieurs facteurs. Le facteur de décision principal concerne le choix national fait pour le cycle de combustible, ouvert ou fermé. La gestion des déchets radioactifs en France est typique d'un pays visant un cycle de combustible fermé.

La gestion des RW français

Aujourd'hui 90 % des RW sont produits par l'industrie électronucléaire dans l'exploitation des installations dédiées à la fabrication, à l'utilisation, au recyclage et au stockage du combustible nucléaire. Ce cas de figure n'est pas supposé changer, selon la politique française en matière d'énergie sur le sujet du combustible utilisé. Tous les assemblages déchargés de combustible utilisé UOX de la flotte actuelle (58 systèmes de PWR- et un EPR-, 62 GWe, 420 TWh/an) seront retraités pour ne recycler qu'une fois le Pu et l'U des combustibles MOX et URE. Les assemblages de combustible utilisé MOX seront entreposés en tant que réserves stratégiques de Pu à l'avenir. Les chiffres correspondent à une durée de vie d'un réacteur de 50 ans. Tous les autres combustibles utilisés non-électronucléaires seront également retraités.

Le système français identifie cinq familles de RW selon le critère des niveaux de radioactivité et du temps de décroissance de tels déchets, ce qui correspond à une vue pratique de la gestion des RW, s'accordant aux « procédures de gestion des déchets radioactifs ». Le tableau 1 présente les volumes de RW existants en 2013 ainsi que les volumes totaux attendus pour 50 années de vie des réacteurs. La figure 1 est une illustration du cycle pratiquement clos de l'électronucléaire français. À chaque étape, la taille de la surface du cercle est proportionnelle au montant de RW produits en 2013.

Tableau 1. Volume de déchets radioactifs.

Déchet radioactif (m3)	Abréviation	Volume Jusqu'en 2013 (m3)	Activité en pourcent du total (%)	Volume total pour 50 ans de vie (m3)
HA haute activité, longue durée de vie	HL-LLW	3200	~98	10000
De moyenne activité, longue durée de vie	IL-LLW	44000	~2	72000
À faible activité et longue durée de vie	LL-LLW	91000	0.01	180000
À faible activité et durée de vie moyenne	LIL-SL	880000	0.02	1900000
À très faible activité	VLLW	440000	<0.000004	2200000
Total		1460000	100%	4300000

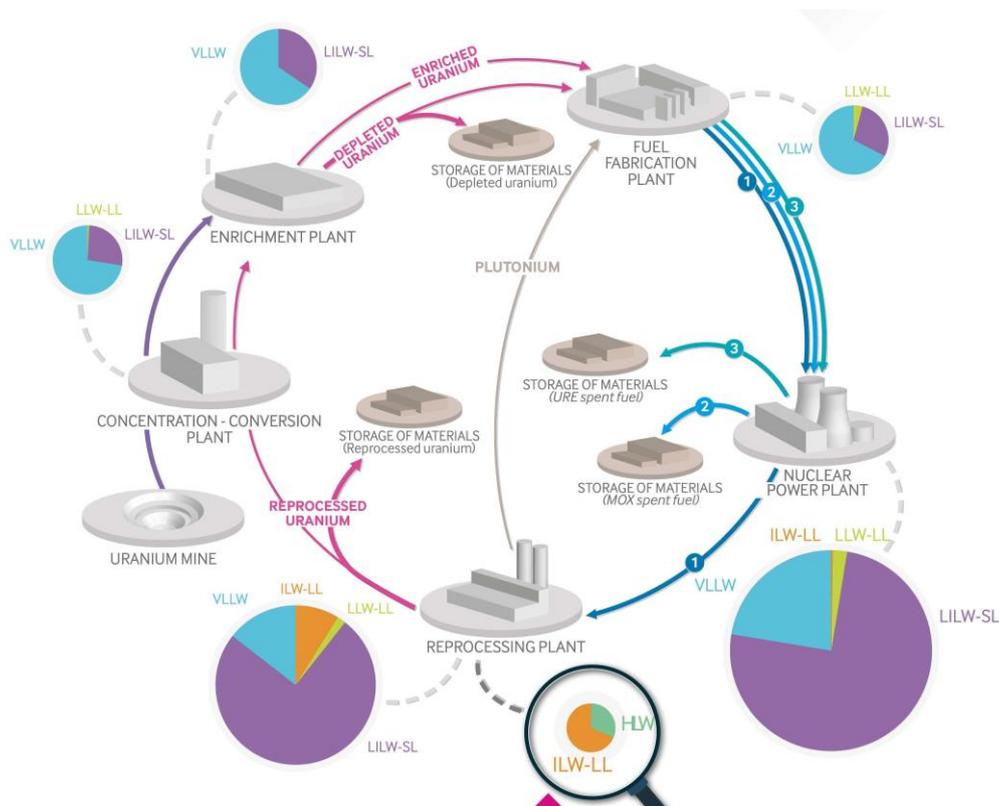


Figure 1. Représentation du cycle pratiquement clos électronucléaire français (Origine : Andra). 1 : Combustible UOx ; 2 : Combustible MOx ; 3 : Uranium recyclé. Ligne pointillée : course des déchets et démantèlement.

Les RW historiques et ceux issus du démantèlement des installations nucléaires sont inclus dans les volumes totaux. Les RW les plus actifs obtenus à partir de processus de retraitement (5000 colis de HL-LLW et 170 000 de IL-LLW), à éliminer, ne contiennent pas de Pu ou de U (à l'exception de possibles pertes du procédé Purex). De plus, il devrait être noté que, en comparaison de l'activité d'un cycle de combustible ouvert, un cycle de combustible fermé avec recyclage de Pu mène à la réduction de la production de colis par un facteur dix (0.8 contre 8 m³/TWh) mais aussi à une augmentation des IL-LLW (0.6 contre 0,08 m³/TWh).

Les prochaines sections se concentrent seulement sur la gestion de déchets à longue durée de vie et des VLLW, qui sont au cœur des problèmes principaux. Certaines indications seront aussi données sur la gestion des autres déchets, comme : les LL-LLW, IL-SLW, résidus d'uranium et matériaux naturellement radioactifs dont la radioactivité a été artificiellement augmentée (TENORM), qui sont des questions résolues ou en cours de l'être.

Cadre institutionnel Français.

Andra est l'opérateur nucléaire en charge des RW. L'ASN en plus de son rôle de contrôle fournit des guides de sûreté non seulement à l'Andra mais aussi aux producteurs de déchets radioactifs comme le CEA, EDF et Areva. La loi n° 2006-739 du 28 Juin 2006 définit la politique française en matière de gestion des divers types de matières radioactives et RW et (1) établit les domaines de recherches, étapes et cibles à atteindre, en prenant en compte les exigences sociétales, (2) établit un Plan de Gestion (élaboré par l'ASN et le Ministère de l'Industrie)

incluant l'entreposage intermédiaire/stockage des RW et la séparation/transmutation des radionucléides à longue durée de vie. Cela fournit un cadre cohérent au système de gestion d'ensemble et prend des dispositions pour accroître en continu la gestion en sûreté des RW, (3) établit un nouveau Comité d'Analyse Nationale (CNE2) en charge de l'évaluation du progrès des recherches et des études relatives à la gestion des RW.

La loi de 2006 s'inscrit à la suite de la loi n° 91-1381 du 31 décembre 1991 qui était consacrée aux recherches à effectuer sur la séparation poussée, la transmutation, le stockage en couches géologiques profondes, et entreposage de long terme.

Progrès et défis

Les progrès de la gestion des RW se sont fait continuellement sur tous les sujets, du conditionnement jusqu'au stockage final. Les problèmes associés à ces traitements sont étudiés selon un plan de R&D sur le long terme. Un des succès majeurs s'est fait par la sélection, par l'Andra, d'un site d'argile pour l'entreposage des HL-LLW et des IL-LLW et sur la conception des installations du centre de stockage en couche géologique profonde, nommé Cigéo.

Centre de stockage Cigéo pour les HL & IL-LLW

La loi de 2006 stipule que les installations de stockage des HL et IL-LLW doivent rester réversibles pendant au moins un siècle. On considère que cette réversibilité offrira la capacité, aux prochaines générations, de soit continuer la construction et exploiter de nouvelles étapes successives de stockage, soit réévaluer les choix faits précédemment et de changer les plans de gestion. Cela inclut une possibilité de récupération des colis de déchets déjà stockés d'une manière et pour une durée de temps compatibles avec la stratégie d'exploitation et la fermeture du centre.

L'argile Callovo-Oxfordienne a été choisie pour servir de roche-hôte. Cigéo sera démarré bientôt à Bure, en un lieu proche du laboratoire souterrain LMHM (Laboratoire de Meuse Haute-Marne) exploité par Andra pendant quinze ans. Cette couche d'argile, épaisse de 130 mètres et profonde de 500, située dans l'Est du Bassin Parisien, montre une continuité latérale remarquable et une bonne homogénéité de la composition et de la structure. Les enquêtes géologiques, hydrogéologiques et géochimiques locales et régionales n'ont révélé aucune faille ni de connexion avec un quelconque écoulement convectif entre les aquifères supérieurs et inférieurs au travers de l'argile. Les eaux interstitielles de l'argile ont un temps de résidence très long. La composition de l'eau et les coefficients de diffusion des radionucléides à diffusion les plus rapides ont été mesurés in situ au sein du LMHM. Les données montrent que l'argile constitue une barrière ultime très efficace afin d'arrêter la migration des radionucléides jusqu'à un million d'années. Des propriétés mécaniques particulières permettent la construction d'installations conçues pour traiter séparément les HL-LLW et les IL-LLW au sein de cellules spécifiques et conçues pour durer plus d'un siècle durant l'exploitation du centre. Les études sur le site et celles de conception de Cigéo ont commencé en 1991.

LL-LLW

Les LL-LLW sont formés par des matériaux contenant du Radium et des composés-fille de ce dernier, de petits ou grands morceaux de graphite contenant du ^{36}Cl et du ^{14}C , des colis de scories dans le bitume contenant des traces infimes d'actinides. Ils sont entreposés en divers

endroits en attendant leur stockage définitif. Andra est à la recherche d'un site en subsurface qu'on pourrait dédier à cette utilisation dans l'argile. Le traitement de tels déchets dans un tel endroit constitue un défi à cause de ces radionucléides à longue vie à confiner si près de la biosphère. De la R&D est en cours afin de voir si le traitement de certains LL-LLW pourraient aider à stocker cette catégorie de déchets. Les LL-LLW représenteraient au global environ 200 000 m³.

LIL-SLW

Les IL-SLW, qui viennent principalement de la production d'électricité (1,9 10⁶ m³), sont et resteront sous forme de colis déposés dans le CSA (Centre de stockage de l'Aube, Soulaines-Dhuys), ouvert depuis 1992 et prévu pour exploitation jusqu'en 2100 (avec une capacité de 10⁶ m³). Le centre précédent, le CSM (Centre de Stockage de la Manche, Digulleville) qui avait été ouvert en 1969 (0.5 10⁶ m³) a été fermé et est sous surveillance depuis 1993.

VL-LLW

Les VL-LLW sont actuellement disposés au sein d'un centre spécial : le Cires (Centre Industriel de Regroupement et de Stockage, Morvilliers). Sa capacité autorisée est de 650,000 m³. Elle pourrait être étendue jusqu'à 900,000 m³ et être remplie d'ici 2030. En plus de cette extension de capacité du Cires, un autre centre à haute capacité devra être ouvert afin de gérer le reste de l'élimination des VL-LLW, qui proviennent à l'origine des activités de démantèlement.

Les VL-LLW soulèvent beaucoup de problèmes à cause de leur gros volume (une estimation aux alentours de 2.2 10⁶ m³), car le système français de gestion des RW ne définit pas de niveau d'élimination. Depuis quelques années, les organisations liées à la recherche, à l'industrie et les autorités ont développé des méthodes innovantes de gestion des matériaux dérivés du démantèlement également classifiés comme déchets, même s'ils ne contiennent pas ou très peu de radioactivité ajoutée. À cette fin, on doit développer des méthodes pour mesurer de très bas niveaux de radioactivité sur de grands paquets de matériaux qui pourraient être utilisés pour soutenir une stratégie innovante de gestion des VLLW. Andra et les producteurs de déchets cherchent en premier lieu toutes les possibilités permettant de réduire drastiquement la production de VLLW, par exemple en recyclant de grands flux de composants métalliques. Les inquiétudes concernant le recyclage sont nombreuses et requièrent au moins la définition de paliers à atteindre de décontamination avant réutilisation.

Matériaux naturellement radioactifs dont la radioactivité a été artificiellement augmentée (TENORM)

Jusqu'à présent les déchets TENORM, provenant d'industries non nucléaires, étaient gérés dans des centres techniques consacrés aux déchets industriels, équipés pour la détection de radioactivité au-delà de seuils fixes. Cette gestion est en cours de reconsidération, particulièrement au regard de leur quantité et de leur quantité. Cela soulève des inquiétudes similaires à celles des LLW.

Autres déchets

De l'uranium a été extrait dans des mines en France. Environ 50 Mt de déchets radioactifs U (résiduels) sont disposés **in situ**, sur 17 sites, près du lieu de leur production dans de vieilles mines à ciel ouvert, des bassins ou dans des fonds de vallée fermées par des barrages. Ces sites de stockage sont surveillés et soumis à des réglementations spécifiques pour éviter les

migrations de radon et de sous-produits. Une grande masse de déchets radioactifs issus du traitement des concentrés d'uranium (yellowcake), plus ou moins similaires aux déchets de mines, est stockée à Malvési.

En conclusion, la France a construit sous le contrôle de l'ASN un système sûr de gestion des déchets radioactifs pour soutenir ses activités nucléaires selon sa stratégie de retraitement/recyclage de tout combustible usé. Le projet Cigéo d'un centre de stockage en grande profondeur sera démarré dans quelques années. La gestion des VLLW vise à réduire les grands volumes résultant du démantèlement des réacteurs et des installations nucléaires et à définir un nouveau site de stockage de déchets à haute capacité. À la suite de plusieurs débats entre tous les acteurs, en incluant le public, il est devenu évident que la population préfère être « en sécurité » que « rassurés ». La grande question qui se pose alors est : comment donner confiance dans la gestion de déchets à si longue vie ? La réversibilité du stockage des déchets radioactifs, comme la loi le stipule, réconcilie l'éthique et les transmissions des devoirs envers la génération suivante. Cela aide à faire de la confiance du public une réalité. La prochaine étape sera d'installer la gouvernance de la réversibilité des centres de stockage, ce qui au regard de la loi doit inclure le public

Section 7. Organismes Techniques de Soutien (TSO) reliées à la sûreté

Recommandations

- L'expertise technique des régulateurs, qu'elle soit obtenue en interne ou fournie par l'Organisme Technique de Soutien, est essentielle à la sécurisation d'un haut niveau de sûreté nucléaire.
- L'indépendance et la transparence des TSO doivent être maintenues au plus haut degré possible, sans risquer d'être compromises par quoi que ce soit.
- Les compétences des Organisations Techniques de Sûreté devraient toujours être en augmentation et ce de façon continue, pour qu'elles soient capables d'évaluer les nouvelles et multiples technologies toujours plus innovantes, comme les réacteurs de Gen IV.
- La coopération internationale entre les TSO devrait être renforcée pour mieux harmoniser les exigences, et les méthodes d'évaluation et critères.
- Les TSO des pays développés au plan nucléaire devraient assister et soutenir les pays émergents dans la construction de leur propre expertise nationale en termes de sûreté.

Toutes les activités liées au nucléaire sont énormément régulées (Réf. AIEA Obligation Générale de Sûreté – Cadre Gouvernemental, Légal et Réglementaire de Sûreté – Séries No. GSR Partie 1 (Rev. 1))

Le propriétaire/exploitant d'une installation nucléaire est le premier responsable de sa sûreté durant toute sa durée de vie ; toutefois le régulateur doit avoir les pleins pouvoirs pour contrôler le propriétaire/exploitant.

Au-delà des tâches administratives et légales de la délivrance de permis de construction, de premier chargement de combustible, d'exploitation ou de démantèlement pour n'importe quelle installation spécifique, le régulateur doit pouvoir s'appuyer sur une forte expertise technique et organisationnelle. Une telle expertise/organisation sera utilisée pour développer des règles de sûreté, des réglementations, et des exigences de façon cohérente, afin de pouvoir évaluer et faire des estimations de la conformité ou non-conformité des licenciés.

Plusieurs schémas organisationnels existent permettant à un régulateur d'accéder à un certain niveau d'expertise nucléaire. Ce niveau peut être obtenu en interne par le régulateur, ou contractée à des parties externes. Et quand l'expertise de sûreté est soustraite, on donne souvent la préférence à une agence spécialisée, à laquelle on se réfère en tant qu'Organisme Technique de Sûreté (TSO – aussi Organisme de Soutien Technique et Scientifique).

Aux États-Unis, la NRC détient l'expertise du développement des réglementations de sûreté nucléaire et des Guides Réglementaires, et de vérifier la conformité à ses exigences très prescriptives. En France, le Régulateur (Autorité de Sûreté Nucléaire - ASN) développe les grandes lignes générales, et possède une forte expertise dans le domaine de l'intégrité des circuits primaires et secondaires, qu'il complète par des contrats passés aux universités et aux instituts de recherche dans ce domaine spécifique, mais se repose sur l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) pour ses expertises spécialisées en ingénierie nucléaire. L'IRSN est une branche dérivée de l'ancienne division de sûreté du Commissariat de l'Énergie Atomique français, plus tard fusionnée avec le bureau de radioprotection du Ministère de la Santé. Toutes les évaluations techniques de sûreté, grosso modo, ainsi que certaines autres tâches, sont désormais assignées par l'ASN à l'IRSN, le TSO français.

En Chine, le Régulateur (L'Administration Nationale de Sûreté Nucléaire – NNSA) émet des règles et guides de sûreté nucléaire, prépare et promulgue la réglementation en matière de sûreté nucléaire en Chine, contrôle la mise en place de ces règles, et établit des principes et politiques de sécurité nucléaire. Toutes les installations nucléaires civiles sont ainsi réglementées par la NNSA. L'Agence de l'Énergie Atomique Chinoise (CAEA) est en charge des urgences nationales nucléaires.

La plupart de l'expertise nucléaire est accessible à la NNSA à partir de plusieurs TSO : 1) Centre de Sûreté Nucléaire et Radioprotection (NSC) du Ministère de la Protection Environnementale qui fournit la plupart des travaux de support nécessités par la NNSA ; 2) Centre Technique de Surveillance des Rayonnements du Ministère de la Protection Environnementale, dont la principale mission est de fournir un support pour le système national de surveillance des radiations ; 3) Centre de Sûreté Nucléaire de Suzhou (SZNSC) qui fournit un support technique dans le domaine de l'Assurance Qualité, des Équipements Mécaniques et des Réacteurs de Recherche ; 4) Centre de Sûreté et de Fiabilité des Équipements Nucléaires (NESRC), qui participe à la revue des composants nucléaires sous pression ; et 5) Centre de Revue de Beijing en Sûreté Nucléaire (BRCNS), le premier TSO fondé à l'intérieur de l'Institut de Beijing de l'Ingénierie Nucléaire (BINE), dont le devoir principal est de fournir un support technique dans le domaine de l'ingénierie nucléaire non conçue par BINE. Toutes les vérifications en matière de sûreté sont sous-traitées à ces TSO, avec en addition des contrats passés aux universités et aux instituts de recherches dans des domaines spécifiques, tels que l'Université de Tsinghua, l'Institut Chinois de l'Énergie Atomique (CIAE), l'Institut Chinois de Radioprotection (CIRP), etc.

Quand on fait la revue de l'expérience internationale dans ce domaine, on se rend compte qu'il n'y a guère d'évidence permettant de décréter qu'un de ces modèles organisationnels est supérieur aux autres : bien des modèles fonctionnent, à condition qu'ils (1) soient adaptés à l'histoire technique et à l'organisation administrative de chaque pays, (2) concentrent la meilleure expertise à disposition du Régulateur nucléaire et (3) encouragent le développement d'une telle expertise.

Cependant, quelques principes fondamentaux généralement applicables à l'expertise en matière de sûreté nucléaire peuvent être tirés, entre autres :

1. Indépendance : un corps d'expertise (TSO) ne doit pas entreprendre de travaux susceptibles de compromettre sa neutralité ou de le mener à évaluer son propre travail.

Si ce corps d'expertise devait œuvrer pour plusieurs clients, en incluant l'autorité de sûreté, les potentiels conflits d'intérêts devraient être identifiés à l'avance et évités.

2. **Transparence** : un TSO devrait être organisé pour accroître le caractère indépendant et la transparence de ses opérations, ce qui comporte une divulgation totale de ses rapports (sauf quand de sérieux problèmes de confidentialité entrent en jeu).
3. **Assurance qualité** : la structure d'expertise devrait se conformer à un Programme d'Assurance Qualité exigeant, pour s'assurer de l'évaluation de la compétence de ses experts, de la traçabilité de son expertise, de l'acceptation de la tâche à la fourniture des livrables

Le corps d'expertise peut fournir des services de formation, et gérer ses propres programmes de R&D, afin de rendre ses propres équipes encore plus compétentes. Les TSO ne devraient pas agir de manière isolée. Même si la sûreté nucléaire est une affaire souveraine au sein de chaque État, l'expérience et les meilleures pratiques la concernant devraient être partagées. Les propriétaires/exploitants partagent ensemble leurs savoirs quotidiennement dans le cadre de l'Association Mondiale des Exploitants Nucléaires (WANO) et font examiner leurs situations régulièrement par leurs pairs. L'AIEA et l'OCDE quant à elles fournissent des forums aux autorités de sûreté pour qu'elles puissent se rencontrer et coopérer, dans le cadre de groupes de travail ou d'examen entre pairs comme le demande la Convention sur la Sûreté Nucléaire. Aucun forum semblable n'existe pour les TSO ; cependant, la plupart des TSO du monde ont pris l'initiative sous l'aile de l'AIEA de tenir régulièrement des meetings entre elles, le dernier ayant eu lieu à Beijing en 2014. Il est important d'encourager de tels échanges et pratiques. En effet, même si les exigences de sûreté sont propres à chaque État, le partage d'expérience et d'expertise entre les TSO ne peut que bénéficier à tous.

Le développement de l'énergie nucléaire dans les pays émergents soulève des problèmes spécifiques pour ce qui concerne leur accès à l'expertise de sûreté. Quand des technologies nucléaires sont importées dans un pays, les autorités prennent généralement en compte une « centrale de référence ». Les clients devraient avoir accès à l'expertise en matière de sûreté du pays d'origine de la technologie qu'ils décident d'employer, ainsi qu'au dossier de sûreté de la centrale de référence, pourvu que les exigences d'indépendance et de transparence soient respectées. De plus, les TSO de pays plus avancés devraient aider et assister celles des nouveaux venus à installer et développer leur propre expertise en matière de sûreté, autant que possible.

Quand on fait le point sur plus de cinquante années de développement nucléaire commercial le rôle inestimable des TSO ne peut pas être surévalué. L'analyse des incidents nucléaires et accidents démontre que l'absence d'une TSO indépendante et transparente, appliquant un programme strict d'Assurance Qualité, a eu de sérieuses conséquences. Dans le futur, les TSO devront continuer à servir la communauté globale nucléaire. Certains des défis les plus importants à relever concernent :

- La conservation et l'amélioration des compétences des acteurs afin d'être capable de mieux évaluer les nouvelles et multiples technologies innovantes telles que les réacteurs de Gen IV,

- Le renforcement de la coopération internationale afin de mieux harmoniser les exigences et les méthodologies et critères d'évaluation,
- Le soutien aux autorités de sûreté et aux TSO des pays émergents, afin de les aider à construire leur propre expertise nationale de sûreté.

Conclusions

Les régulateurs nucléaires ont besoin de s'appuyer sur une forte expertise technique, qu'ils peuvent soit obtenir en interne, soit contracter auprès d'une Organisation de Soutien Technique ; il n'y a pas d'évidence que l'un des modèles d'organisation actuelle soit supérieur aux autres.

Les TSO devraient se conformer à de strictes exigences d'indépendance, de neutralité, de transparence et de qualité. Bien qu'ils bénéficieraient grandement d'une coopération internationale et d'un échange d'expériences entre pays, il n'y a, à l'heure actuelle, aucun forum dédié à la coopération et à la revue par des pairs. Malgré cela, les TSO des pays avancés en termes de technologies nucléaires ont la capacité et le devoir d'assister les nouveaux utilisateurs de ces technologies dans le développement de leur propre expertise en matière de sûreté.

Section 8. Défis pour l'avenir, plus spécifiquement la digitalisation et les méthodologies nouvelles de conception.

Recommandations

L'industrie nucléaire doit retirer un plein bénéfice de son passage à la digitalisation, à tous les stades de son développement.

- Des codes de conception plus précis visant à simuler l'exploitation des réacteurs en conditions normales et accidentelles peuvent bénéficier des grands progrès réalisés dans l'IT, notamment en ce qui concerne les capacités de vitesse de calcul et de stockage des ordinateurs, en augmentation constante. Ils ouvrent la voie vers la mise en place de nouvelles méthodologies qui auraient besoin d'être formellement autorisées au travers d'interactions positives avec les régulateurs de sûreté.
- La digitalisation des systèmes d'instrumentation et de contrôle est une réalité ; toutefois les exigences de sûreté n'étant pas harmonisées entre tous les régulateurs, cela conduit à la conception de plusieurs solutions différentes pour remplir la même fonctionnalité, et cela en fonction du pays. De la même façon, les réglementations et règles ciblant les nouvelles menaces telles que la cyber sécurité ne sont pas harmonisées non plus et les progrès sur ces domaines doivent se faire au niveau international.
- Beaucoup d'industries bénéficient entièrement des nouvelles technologies digitales pour la gestion de projet et ses outils de conception (outils CAD, Gestion de la Vie du Projet). L'industrie nucléaire devrait tirer un grand bénéfice de ces outils. Le partage d'expérience dans ce domaine est fortement encouragé.

L'énergie nucléaire doit de délivrer de l'électricité peu carbonée et compétitive, en réduisant les coûts et le temps de construction des nouvelles centrales, sans pour autant affecter la sûreté, et en contrôlant mieux les temps d'interruption des centrales déjà existantes.

Afin de gérer de tels défis, l'énergie nucléaire se doit d'exploiter au mieux les outils disponibles appartenant aux technologies digitales, et par-dessus tout ceux tels que les "Industry 4.0", la PLM (Gestion du Cycle de vie des Produits), les scans 3D afin d'aider à la création de copies numériques d'installations déjà existantes, le Big Data et « L'Internet des Objets », la réalité virtuelle et augmentée, les imprimantes 3D, etc.

De plus, l'énergie nucléaire se développe au sein d'une économie ouverte et mondiale, avec une concentration toute spéciale actuelle sur l' « Initiative Route et Ceinture » en Chine (« One belt and one Road ») et la compétition ouverte en Europe.

La transformation digitale de l'ingénierie nucléaire saura l'aider à atteindre un meilleur niveau de compétitivité et fournira des gains économiques, tout en améliorant la sûreté. Elle

devrait aussi significativement renforcer, améliorer l'efficacité des organisations humaines et leur bénéficier, organisations qui doivent s'adapter à la digitalisation.

En somme, cette digitalisation a pour enjeu :

- Le contrôle amélioré des plannings de construction des nouvelles centrales nucléaires,
- L'amélioration des taux de disponibilité des centrales existantes, grâce à une meilleure planification, gestion du temps et contrôle des interruptions,
- L'extension de la durée de vie des installations déjà en cours d'exploitation,
- L'amélioration de la compétitivité des centrales nucléaires de IIIème génération.

- **1** – Pour la base **déjà** installée, qui n'a pas bénéficié d'un modèle numérique lors de sa conception ni de mises à jour durant l'exploitation, la création d'un « jumeau numérique » grâce à un scan 3D, ainsi que son partage avec les sous-traitants, ferait gagner beaucoup de temps sur les opérations de maintenance, sur les tests d'accessibilité pour la maintenance, et faciliterait la formation des exploitants sur toutes les phases d'exploitation, jusqu'à la phase de démantèlement. Le modèle numérique fournit aussi des outils permettant de minimiser l'exposition des travailleurs aux rayonnements.

- **2** – Pour les **nouveaux projets**, en prenant en considération la longue durée de vie d'un projet nucléaire (typiquement 60 ans) et le très haut niveau des exigences de sûreté, il se révèle fondamental d'utiliser les outils de Gestion de Données pour gérer en temps réel les configurations du réacteur, et couvrir les spécifications, la conception, la construction, l'exploitation et le démantèlement.

De tels outils, comme le PLM (Gestion de Cycle de Vie du Produit) – existent et sont employés quotidiennement dans le secteur aérospatial.

Le manque de contrôle total des données des réacteurs se révèle être une source majeure de retards durant les phases de construction et occasionner de gros dépassements de coûts à cause des reprises de travail.

Il est toutefois obligatoire de réaliser au préalable un changement dans l'organisation industrielle afin de mettre en place avec succès une plate-forme numérique de PLM. Une telle démarche exige :

- Une ingénierie système gérée par des « architectes » (ingénieurs en chef) entièrement responsables de la totalité du système (Îlot Nucléaire, Îlot Conventionnel, Station de Pompage, etc.) et ce depuis sa conception jusqu'à sa construction et la mise en service.
- Une gouvernance stricte des données, avec un processus d'autorisation de changements de configuration quand le besoin se fait sentir ; les données ne seraient plus dispersées sur des documents papiers mais entrées à l'intérieur d'une plate-forme numérique de PLM à gestion unique, rendues ainsi accessibles à chaque acteur du projet.

L'implémentation de ces technologies permettrait aussi de vérifier que les conceptions soient arrivées entièrement à terme avant de commencer la construction, de vérifier les

simulations numériques interactives des séquences de construction ou de maintenance, d'évaluer l'accessibilité et d'optimiser les méthodes de construction.

Les acteurs majeurs des projets devraient être connectés à la plate-forme numérique du PLM (pour les travaux de génie civil, l'îlot conventionnel, l'îlot nucléaire, et sous-traitants) ce qui permettrait un système de gestion de données unifié, offrant une méthodologie novatrice de conception et une réduction significative de la durée du projet.

La digitalisation de la chaîne de fabrication, en particulier via un remplacement digital des documents papiers, améliorera aussi la traçabilité des données, les spécifications requises des composants ainsi que le processus d'archivage des feuilles de données et leur recherche, et renforcera dans sa globalité l'assurance qualité, au moyen d'une seule source de données.

Des méthodologies de conception intelligentes sont d'une importance primordiale pour les futurs progrès de l'ingénierie nucléaire, tout au long de la vie des projets nucléaires, du berceau jusqu'à la tombe.

Il faut, très précocement dans le processus, c'est-à-dire au stade de la préconception industrielle, prendre des décisions clé de structuration de projet (puissance de l'installation, arrangement des sources froides, plan général du site, caractéristiques principales des bâtiments, structure, grandes ouvertures, etc.). Tous ces aspects doivent faire l'objet d'une optimisation conjointe, ce qu'on réalise en général par le biais de plusieurs étapes successives. Les outils de CAD 3D devraient être utilisés dès les premiers stades de ces processus de conception, afin d'accélérer l'optimisation et l'évaluation de solutions alternatives. La réalisation de cette optimisation étape par étape requiert un haut degré de digitalisation, comprenant des calculs statiques et dynamiques. Une des leçons apprises, est que simplicité et limpidité de conception, peu importe le point de vue, est l'objectif principal de cette phase de préconception. Des progrès restent à faire dans ce domaine, mais les fournisseurs de programmes pourraient commencer par considérer les fonctionnalités spécifiques requises à ces stades précoces de la conception des installations.

Lors de la phase de conception générale, on pourrait mieux optimiser et donc rendre plus compétitive cette conception par le biais de simulations numériques innovantes. Des modèles qualifiés et fiables de simulation, dont la pertinence aura été validée par des expérimentations, pourraient être employés à la fois pour guider le processus d'optimisation de conception, et pour servir de retour d'expérience à l'ingénieur chargé de la conception. Cependant, ces modèles nécessitent pour l'instant une approbation préalable des Autorités de Sûreté, ce qui se révèle parfois extrêmement exigeant et peut devenir un facteur de limitation à l'innovation.

La technologie de réalité Virtuelle/Augmentée cherche à intégrer des modèles de conception tridimensionnels au sein d'un environnement logiciel unifié, et à capturer toutes les caractéristiques géométriques des différents composants dans un modèle digital à taille réelle en 3D. Cela permet une meilleure optimisation du plan du réacteur et des systèmes auxiliaires, ainsi que de leur interface avec le génie civil. L'amélioration de la performance industrielle tout le long de la durée de vie d'un projet, de la conception à la mise hors service d'une centrale, pourra ainsi être obtenue grâce à la valorisation des données, comme elles le sont déjà dans d'autres secteurs industriels : la maintenance prédictive pourra être

renforcée, en usant des technologies Big Data pour analyser et classer les grands volumes de données collectées par les centrales nucléaires.

Les projets nucléaires impliquent donc la gestion d'un montant considérable de données, bien plus grand que celui qu'on retrouve actuellement dans les industries de l'automobile ou aéronautique. Cependant, des méthodologies de PLM similaires à celles de ces industries, couplées à des outils de CAO, se révèlent être d'une grande efficacité dans l'accroissement de la qualité des données et de la fluidité de la gestion de projet. Ces processus fourniront une meilleure traçabilité aux projets et marqueront un réel bénéfice pour l'Assurance Qualité et aussi en termes de sûreté. Des gains importants sont encore accessibles mais leur obtention requiert la coopération de toutes les parties prenantes, en incluant les autorités de sûreté.

De plus, des simulations digitales devraient être utilisées pour créer des animations dans les simulateurs à échelle réelle pour la formation, afin d'améliorer la préparation aux situations de crise et les capacités de réponses aux incidents graves.

Certes, depuis plus de vingt-cinq ans, les systèmes d'Instrumentation et de Contrôle des centrales nucléaires se servent en masse des technologies digitales. Cependant, plusieurs défis restent à relever dans l'application de ces technologies pour l'industrie nucléaire, en incluant la qualification à la fois du hardware et du software pour répondre aux exigences de sûreté. Transformer la science et la technologie en un élément de marché reste très important pour la compétitivité du nucléaire, toutefois cela demande l'implication de l'Industrie et des Régulateurs. Des travaux restent à faire pour développer des codes et des standards applicables aux logiciels clés, quand ils sont importants en matière de sûreté. De plus, il n'y a aucune régulation internationale ni loi dans le domaine de la prévention et de la détection d'incidents tels que des cyber-attaques hostiles sur les NPP. Ainsi, il faudrait faire un effort dans l'établissement de certaines législations particulières pour le digital, tout en simultanément accordant de l'attention aux techniques de sûreté et à celles de protection se fondant sur une séparation physique, des pare-feu, et des mesures efficaces de gestion.

Conclusions

L'industrie nucléaire bénéficierait grandement d'une digitalisation totale à tous les stades de la conception, de la construction, de l'exploitation et maintenance et enfin du démantèlement des réacteurs. La Gestion de Cycle de Vie du Produit, qui est un outil permettant de gérer précisément toutes ces phases, est utilisé à échelle globale avec succès par l'industrie aéronautique. Il existe d'autres outils pertinents tels que les simulations numériques, la CAO en 3D, et la Réalité Virtuelle/Augmentée. Le résultat de l'utilisation de tels outils se traduirait en une hausse de performance substantielle, les augmentations de délais de construction et les dérives des coûts seraient évitées, augmentant ainsi la compétitivité du secteur.

L'utilisation d'outils de simulation (neutroniques, thermo-hydrauliques, etc.) lors de la phase de conception se révèle être une perspective très prometteuse. Depuis des années, on utilise en effet des Systèmes et des Équipements digitaux au sein des centrales nucléaires. Et dans ces deux domaines, on a besoin d'une approche coordonnée des autorités de sûreté dans le monde.

Dans tous les cas, une attention toute particulière doit être donnée à la cyber sécurité pour détecter et prévenir les cyber-attaques à temps.

Section 9. L'importance des installations de recherche nucléaire et des infrastructures

Recommandations

On peut d'ores et déjà formuler deux recommandations au sujet des missions des organismes de recherche nucléaire au sein des pays utilisant l'énergie nucléaire, soit depuis longue date, soit encore émergents dans ce domaine :

- Avec la forte mondialisation autour du globe, en prenant en compte l'augmentation des coûts des installations de recherche nucléaire et leur taux d'utilisation relativement bas (au moins pour certaines d'entre elles), on recommande d'explorer l'idée de la mutualisation des installations nucléaires soit de grandes tailles, soit lourdes ou spécifiques – comme, par exemple, des réacteurs de recherche, laboratoires chauds, laboratoires de recherche sur les matériaux irradiés, ou centres de simulation et de calculs. Cette idée est importante déjà pour les installations existantes, et encore plus pour les nouvelles.
- Afin de permettre aux pays émergents dans le domaine du nucléaire un accès aux installations de R&D à un coût acceptable, il est recommandé que les organisations de R&D et créateurs d'équipements appartenant à des pays où l'énergie nucléaire est déjà bien établie fassent en sorte de mettre des installations laboratoires à disposition des pays émergents à des prix bas afin de répondre à leurs besoins spécifiques et généraux de recherche et d'expérimentations dans le domaine du nucléaire, y compris pour les activités d'amont et d'aval du combustible.

L'infrastructure nucléaire de pratiquement tous les pays industrialisés vient à l'origine des Commissions à l'Énergie Atomiques nationales, qui ont-elles été fortement marquées initialement par une culture académique et de la recherche. En plus de leurs propres centres nucléaires de recherche et de formation, ces institutions sont la source originelle dont proviennent la plupart des autorités nationales de sûreté nucléaires, ainsi que des organismes techniques de soutien (TSO) dans le domaine de la sûreté, des agences de gestion de déchets, et d'une partie de l'industrie nucléaire.

Très tôt, on a séparé les applications militaires, si elles existaient, des applications civiles. Ceci à la fois en termes de programmes, d'infrastructure et de ressources humaines, afin d'assurer une meilleure confidentialité et non-prolifération. Grâce à cela, la recherche civile nucléaire reste – en grande partie – non soumise à la confidentialité, obéissant aux règles de transparence de l'AIEA, et fonctionnant dans un environnement mondialisé.

Très rapidement aussi, il y a eu séparation entre l'industrie des réacteurs nucléaires et celle du cycle du combustible. La première de ces industries, celle des réacteurs, s'est très vite engagée au sein d'un marché compétitif, certains de ses acteurs principaux venant à l'origine des commissions d'énergie de leur pays, tandis que d'autres comme Westinghouse, issues

indépendamment des commissions de leurs pays d'origine, se sont mises à concevoir, proposer et construire des centrales, soutenues par les flux massifs de financements en provenance de l'exploitation des réacteurs. Westinghouse, un exemple de réussite en ce domaine, a fortement influencé l'industrie de l'énergie nucléaire en France, au Japon, en Corée et en Chine. Dans les segments de marché des réacteurs de Génération II et III, le rôle des centres de recherche nucléaire s'est souvent, mais pas toujours, limité à un soutien des projets au cas par cas, surtout pour les problèmes de haut niveau restant sans solution qui auraient pu être rencontrés durant l'exploitation par les vendeurs ou les électriciens.

La performance du combustible des réacteurs nucléaires continue d'être analysée dans certains de ces centres tandis que des recherches sur l'extension de la durée de vie des réacteurs sont aussi menées par les Laboratoires Nationaux. Dans pratiquement tous les cas il y a besoin d'installations spécifiques au sein des organisations nucléaires de recherche (comme des réacteurs de recherche, des installations de test, etc.) En France, les installations de recherche se partagent entre EDF et le CEA.

Comme on peut le conclure des informations ci-dessus, l'industrie du cycle du combustible reste fortement liée aux organismes de recherche nucléaire. Les compagnies agissant en aval de ce domaine se sont souvent créées initialement comme des « dérivés » de telles organisations de recherche. Elles sont ensuite devenues autonomes, même quand dans certains cas les organisations de recherche à l'origine de leur création gardaient une part significative du capital, développant des programmes de recherche en étroite coopération, et utilisant des capacités d'innovation communes (retraitement ou gestion des déchets, etc.). Dans ce domaine, une connexion forte était requise pour répondre aux exigences du contrôle des matériaux nucléaires. De l'autre côté du cycle combustible, le marché de l'enrichissement reste principalement dans les mains de compagnies privées développant leurs propres recherches.

Durant les quinze dernières années, de sérieux problèmes ont eu un fort impact sur les organismes de recherche nucléaire et, dans le contexte suivant, il a fallu redéfinir leur rôle ou en tout cas leur mode de fonctionnement :

- L'extension de durée de vie des réacteurs de génération-II les plus avancés,
- L'arrivée des concepts de réacteurs Génération-III,
- La préparation des concepts des réacteurs de Génération-IV,
- L'accès des pays émergents à l'énergie nucléaire ou leur désir d'y accéder,
- Les accidents graves
- L'augmentation globale des coûts nucléaires, largement en conséquence des exigences de sûreté croissantes
- La « Sortie du nucléaire » de certains pays industrialisés
- L'importance de former une main-d'œuvre spécifique au domaine du nucléaire afin de remplacer les « équipes de génération-II » sous une relative désaffection des jeunes pour les travaux scientifiques et techniques, en tout cas dans les pays occidentaux (cf. Section 10)
- La forte augmentation des programmes de démantèlement et les retours d'expérience associés
- Enfin, et ce n'est pas la moindre des choses, l'émergence du paradigme nouveau que

représentent les SMR

En l'absence de financements privés évidents et déclarés, une bonne solution pour héberger et gérer un projet nucléaire innovant (ou un programme) pourrait être de le confier à un organisme de recherche nucléaire, là où ils existent encore. Leurs équipes expérimentées sont capables de mener des études sur le court terme – tout en laissant le temps de la sélection ou de la construction des acteurs industriels – ainsi que de mener des études à moyen et long terme comme celles liées au cycle du combustible (Exemples : SMR de Génération-IV).

Cependant, dans beaucoup de pays émergents, les organisations de R&D sont gérées par des universités, des professeurs et du personnel académique. Cela fournit une base acceptable pour un début d'activité mais que l'on devrait rapidement suppléer par des profils plus industriels ou en tout cas plus technologiques afin d'apporter une expertise technique et une valeur ajoutée aux acteurs industriels du programme nucléaire lors du lancement.

Ceci ne doit toutefois pas empêcher la prise en compte des innovations, qui viennent à l'origine plus fréquemment des recherches universitaires et académiques. La construction de partenariats efficaces entre équipes académiques et compagnies industrielles a toujours été très utile.

Conclusions

Un pays émergent dans l'énergie nucléaire, même s'il a choisi de lancer un appel d'engorgement à des organismes compétents externes (ce qui est le cas quand les installations sont l'objet d'un contrat de Construction-Exploitation-Transfert (BOT), ou un modèle de Construction-Propriété-Exploitation (BOO)), doit avoir un minimum de compétences techniques pour gérer ses relations avec l'électricien et remplir ses responsabilités pour assurer la sûreté de l'exploitation vis-à-vis de sa population, et de la communauté nucléaire mondiale. Ce rôle d'« assistant à maître d'ouvrage national », surtout vis-à-vis des problèmes de sûreté, ne devrait, dans l'idéal, pas être rempli par un sous-traitant. Cependant le soutien des TSO étrangers peut être utile et l'expérience acquise par les TSO d'autres pays pourrait être partagée.

Dans ce cadre, le rôle d'un NEPIO (Organisation de Mise en Œuvre de Programme d'Énergie Nucléaire) comme il a été défini par l'AIEA pourrait être complété par des missions de R&D, en soutien au programme de construction mis en place par le NEPIO ou par une autre organisation nationale.

Section 10. Défis en matière d'éducation et de formation

Recommandations

Les Académies considèrent qu'il est obligatoire de renforcer le système actuel d'éducation afin de satisfaire les demandes d'ingénieurs et techniciens correctement formés, et de renforcer l'attractivité de l'industrie nucléaire au travers d'interactions plus poussées entre la science et la technologie, l'industrie et les universités, et la perspective de carrières intéressantes. Les Académies recommandent :

- D'améliorer les méthodes d'enseignement actuelles et d'y intégrer les technologies de l'information modernes, comme : les simulations, le multimédia, l'e-learning, et la réalité virtuelle pour les cours à destination des ingénieurs et techniciens, mais aussi de diversifier les cours afin d'y inclure une plus large diversité de compétences comme celles ayant trait aux PLM ainsi qu'à l'héritage culturel,
- Afin d'améliorer le rapport coût-efficacité et la sûreté des centrales nucléaires, d'intégrer l'utilisation de la digitalisation pour la construction, l'exploitation et la maintenance dans les cours des étudiants,
- De profiter entièrement de l'expérience déjà disponible et aider à fournir de meilleurs services de formation aux pays du tiers-monde, puis de commencer la coopération sur ce terrain-ci entre la France et la Chine.

Le contexte de l'éducation et de la formation dans le nucléaire a beaucoup changé durant ces dix dernières années.

1. Les ingénieurs, scientifiques et techniciens qui obtiendront leur diplôme entre 2020 et 2030 travailleront jusqu'à entre 2065 et 2075 respectivement. Ceux qui œuvreront pour l'industrie nucléaire auront ainsi à :

- Exploiter, maintenir et moderniser la flotte nucléaire installée, mais aussi à en démanteler une partie,
- Construire de nouvelles centrales de "Génération-II, -II+, -III", puis les exploiter,
- Concevoir de nouvelles centrales, de "Génération-IV", des SMR,
- Développer des cycles du combustible avancés, incluant la gestion de déchets.

En France, même si le pourcentage d'ingénieurs nucléaires est désormais supérieur à ce qu'il était il y a vingt ans, l'industrie nucléaire est toujours en quête de techniciens (avec un Bac pro, avec une formation professionnelle Bac+2, ou Bac+3), qui constituent environ la moitié des employés du nucléaire.

La Chine continue la construction de centrales nucléaires depuis près de 30 ans. Surtout depuis 2005, date à laquelle la construction d'une nouvelle cohorte de NPP a été commencée, de plus en plus d'universités chinoises ont créé des cours dédiés aux technologies nucléaires, et formé du personnel qualifié avec des compétences de haute valeur pour l'industrie. Cependant, pour l'instant, leurs compétences professionnelles

restent encore insuffisantes – les employeurs doivent en effet systématiquement former leur personnel durant de longues périodes et leur fournir une formation sur-poste pour les amener aux stades où ils seront autorisés dans les faits à prendre des responsabilités.

2. L'environnement de développement de l'industrie nucléaire est aujourd'hui très différent de ce qu'il était dans les années 80 ; l'industrie de l'énergie nucléaire est désormais à un tournant de son évolution. D'abord, la nécessité de la prise en charge du changement climatique est devenue un consensus global. L'énergie verte et les politiques de transition vers un système de production d'énergie à faible émission de carbone fournissent des opportunités de développement de l'énergie nucléaire en Chine et à la coopération Sino-Française, afin de développer un marché de l'énergie nucléaire dans les pays tiers.

Deuxièmement, comme les technologies de génération d'électricité par éoliennes ou l'énergie solaire s'améliorent rapidement, leur coût d'exploitation baisse rapidement, mais avec des exigences plus drastiques de sûreté pour l'énergie nucléaire après l'incident de Fukushima – les besoins de financements initiaux des nouveaux projets de NPP ou pour renforcer les NPP déjà existantes sont en croissance significative. Le résultat se traduit en un affaiblissement de la compétitivité de l'énergie nucléaire pourtant relativement forte.

Troisièmement, au fur et à mesure de la croissance des inquiétudes du public envers la sûreté nucléaire, le développement fort et continu de ce secteur rencontre des défis de taille, comme la communication avec les parties-prenantes et l'obtention de leur soutien.

Quatrièmement, à cause d'une capacité de génération d'énergie plus instable et de la dérégulation du marché de l'électricité, les recettes durables en provenance des NPP deviennent plus incertaines.

3. Les questions de sûreté sont devenues encore plus importantes pour l'industrie nucléaire ; on y encourage un certain conservatisme au lieu de favoriser l'innovation. Par exemple, on constate un retard du développement de la « digitalisation » de l'industrie nucléaire par rapport à celui d'autres industries comme l'industrie aéronautique. Toutefois, grâce aux développements technologiques d'Internet, des big datas, intelligences artificielles et autres, plus de technologies digitales et intelligentes seront appliquées dans des domaines tels que la gestion de données, la gestion du cycle de vie du produit (PLM) et les simulateurs digitaux (DCS). Le savoir requis à leur utilisation devra être enseigné à la plupart des employés de l'industrie nucléaire et aux régulateurs gouvernementaux, dès maintenant et surtout à l'avenir. Cet enseignement constitue une précondition sine qua non à la durabilité de l'énergie nucléaire.

4. À cause de la complexité des problèmes liés à la sûreté nucléaire, tous les employés de l'industrie nucléaire devraient avoir une grande étendue de connaissance professionnelle, compétences, expériences, héritages culturels. Il nous faut donc établir une gestion des savoirs adéquate ainsi que des systèmes de formation de personnel pour les nouveaux employés afin de fournir des formations plus complètes, des enseignants compétents, et d'encourager une coopération intergénérationnelle institutionnalisée plus efficace. Ceci doit s'appliquer à tous les employés, peu important leurs niveaux.

La responsabilité de la gestion de ces trois facteurs se partage entre l'Industrie Nucléaire et les « Écosystèmes Éducationnels » (Universités, Écoles d'Ingénieurs, Instituts de Recherche et Instituts Technologiques) de nos pays respectifs.

- En ce qui concerne l'écosystème de l'éducation, il a la responsabilité de recentrer le cursus des étudiants afin d'y inclure les PLM, les questions environnementales, d'interdisciplinarité et systémiques, et l'instrumentation moderne (etc.), afin que leurs cursus ne comportent pas exclusivement, comme dans le passé, les sciences fondamentales (neutronique, thermo-hydraulique, résistance des matériaux, mécanique des structures, etc.) et/ou l'ingénierie de base et la gestion de projet classique.
- En ce qui concerne l'industrie nucléaire, il est de sa responsabilité de recruter des employés avec des profils plus divers, pour pouvoir ainsi prendre en compte de nouvelles idées et des idées de « l'extérieur », afin de nourrir de façon active et sûre l'originalité de l'ingénierie.
- Pour aider à la promotion de la culture de la sûreté nucléaire et de la qualité totale, la coopération dans la formation devrait être renforcée, les ressources de formation partagées, et les standards de formation également unifiés.
- De façon intermédiaire, il serait aussi bon que les scientifiques et les ingénieurs de l'industrie travaillent soit à mi-temps soit pendant quelques années dans l'éducation et, de façon semblable, que les enseignants/chercheurs travaillent quelques années dans l'industrie.

Il faut mentionner que, sur ce sujet, la France et la Chine ont créé un certain nombre d'initiatives internationales communes pour la formation du personnel de l'industrie nucléaire, telle l'expérience encourageante du jeune IFCEN, l'Institut Sino-Français de l'Énergie Nucléaire, faisant partie de l'Université Sun Yat Sen à Guangzhou. En juin 2016, l'IFCEN a délivrés les 80 premiers titres d'ingénieur, dotés d'un cursus novateur mis en place par une équipe Sino-Française.

Avec le soutien de l'AIEA, le gouvernement chinois continue de former des étudiants en mastères et doctorats professionnels nucléaires, notamment des jeunes venant des pays émergents, dans l'Institut de Technologie de Harbin. Afin de soutenir le programme de formation à l'industrie nucléaire de l'université de Tsinghua à destination des étudiants venant des pays émergents, le Ministère Chinois de l'Éducation fournit des bourses d'études à 30 étudiants internationaux chaque année. Une formation personnalisée à l'industrie nucléaire s'est popularisée dans les universités chinoises : la formation de talents pour les applications de l'énergie nucléaire s'accélère. Du reste, en se fondant sur cette coopération de formation gagnant-gagnant entre université et entreprise, on octroie non seulement aux diplômés des opportunités d'emploi, mais aussi aux entreprises un personnel qualifié. La coopération pour la formation augmente ainsi les compétences des diplômés acquises durant leurs études, accélère leur formation en veillant à respecter des standards responsables, et améliore le niveau du personnel qui donne les cours.

De plus, l'industrie nucléaire doit actuellement évaluer ses futurs besoins, et prendre en compte la pyramide d'âge de ses équipes actuelles. Cette tâche difficile s'est déjà présentée une fois en France, il y a quinze ans, quand on a eu à anticiper le départ à la retraite des « baby-boomers » d'après la Seconde Guerre Mondiale vers l'an 2000. De nos jours en France, nous sommes confrontés à une future vague de départs à la retraite liés au large

nombre de recrutements effectué durant la courte période où la France a mené une construction accélérée de la majorité de sa flotte nucléaire.

Quand on forme les employés actuels aux différents niveaux de l'entreprise et ce pour différents types d'emploi, il faut prendre en compte non seulement l'évolution et parfois le remplacement des anciens systèmes, ou l'arrivée de nouveaux logiciels – ce qui était déjà certes le cas – mais aussi le fait que la formation de la main d'œuvre se fait différemment. Par exemple, l'état d'esprit, les valeurs, et les habitudes d'apprentissage de cette nouvelle génération d'employés de l'industrie nucléaire sont en train de changer. Les performances croissantes du monde des technologies de l'information permettent l'usage de multimédias, de vidéos, du e-learning, d'applications interactives sérieuses à tous les niveaux d'employés – pas seulement l'encadrement et les ingénieurs ! C'est pourquoi, les régulateurs de l'industrie nucléaire devraient adapter, promouvoir et soutenir ces nouvelles techniques de formation pour le secteur industriel.

Par exemple, on utilise les simulateurs depuis longtemps pour la formation des opérateurs de centrales. Grâce aux progrès de la modélisation, des simulations et de la puissance des calculs des ordinateurs, les simulateurs deviennent, à leur tour, plus puissants, en particulier pour la simulation des situations post-accidentelles, ce qui crée de meilleures possibilités d'entraînement du personnel d'exploitation des centrales. De surcroît, les progrès dans ces domaines de simulation, réalité virtuelle, etc., ouvrent des possibilités de formations différentes et plus efficaces à la maintenance pour les exploitants qui travaillent sur site, surtout pour ceux qui peuvent avoir à intervenir dans les endroits où les rayonnements imposent des temps d'intervention très brefs. Là encore, ce qui est fait dans d'autres industries pourrait être appliqué et se révéler très utile aux exploitants divers travaillant dans l'industrie nucléaire. Le centre d'entraînement de CGN a innové dans une grande variété de cours avec simulation et autres outils, l'apprentissage intégré, l'enseignement, dans le progrès en matière de formation et de recherche, ou de systèmes et installations à plusieurs niveaux d'entraînement. Ils ont développé des versions autonomes et portables de leurs simulateurs, la « formation porte-à-porte » ou encore « l'apprentissage en pratiquant » deviennent désormais réalité ; ces innovations améliorent la qualité de la formation.

Pour réussir, l'industrie nucléaire doit aussi conserver ses talents actuels et en attirer de nouveaux. En effet, l'industrie nucléaire n'est plus vue comme étant l'industrie la plus high-tech qui soit, ni comme la plus désirée. Renouveler ses interactions avec les sciences et les technologies, au travers de formations à jour des employés actuels et l'éducation des employés futurs, voilà qui sera la clé de l'avenir.

Ces pays qui désirent développer et utiliser la technologie des NPP devraient encourager la coopération dans la formation des personnels de l'industrie nucléaire, surtout pour l'identification et la formation des talents destinés aux futurs projets internationaux nécessaires à la promotion des développements des programmes d'énergie nucléaire au niveau international. De plus, le développement et la mise en place de standards nucléaires internationaux, de réglementations et standards locaux, ainsi que les savoirs et compétences techniques pour les conceptions de, construction et exploitation de centrales devraient être accélérés. La France et la Chine ont construit un bon système d'enseignement professionnel nucléaire, disposent toutes deux d'une bonne base de formations professionnelles internationales ; elles devraient coopérer ensemble sur ce terrain et fournir de meilleurs services de formation aux pays tiers.

Conclusions

À la fois en France et en Chine, on a besoin de mieux éduquer et former plus d'ingénieurs et de techniciens nucléaires. De plus, dans environ 20 à 25 ans, il se fera une nouvelle vague de départs à la retraite dans l'industrie nucléaire en France, qui occasionnera du même coup un fort besoin de recrutements accélérés. Cette situation doit être anticipée. Attirer de nouveaux talents se ferait plus simplement par le biais d'une interaction renouvelée avec la science et la technologie. Les enseignants/chercheurs bénéficieraient d'opportunités de travail dans l'industrie tandis que des scientifiques industriels et ingénieurs travaillant à mi-temps dans l'éducation constitueraient un véritable enrichissement des programmes de formation. Les programmes de formation bénéficieraient également d'une meilleure utilisation de technologies de l'information modernes, permettant une formation meilleure en termes de coût-efficacité au travers de simulations et d'autres méthodes d'enseignement. De plus, les programmes de formation devraient englober une gamme plus grande et plus diverse de compétences et de capacités. Tandis que les technologies solaires et éoliennes évoluent rapidement, en réduisant leurs coûts, l'industrie nucléaire souffre, elle, d'augmentation de coûts dues aux exigences plus strictes de sûreté. Afin de contrer de telles hausses, il faut familiariser les étudiants d'aujourd'hui à la digitalisation de toutes les phases et éléments du cycle de vie des centrales nucléaires, de la construction à l'exploitation en passant par la maintenance.

Section 11. Réaliser l'ingénierie et la gestion des projets nucléaires

Recommandations

- Les projets nucléaires sont complexes. Les académies recommandent l'utilisation des outils les plus modernes qui permettraient d'alléger cette complexité.
- L'évaluation des risques devrait se faire tout au long de la réalisation des projets.
- Comme les changements des réglementations de sûreté durant la réalisation de projets occasionnent des incertitudes majeures en matière d'ingénierie, ces réglementations devraient être totalement validées puis gelées avant le début des projets.
- Une utilisation correcte d'outils de gestion à jour permettrait de prendre en compte les défis en matière d'ingénierie de si grands projets.

La taille et la complexité des centrales nucléaires sont exceptionnelles : sans inclure les sous-composants, il faut concevoir, fabriquer, dresser, tester et mettre en service plusieurs centaines de milliers d'objets, ce qui est un ou deux ordres de plus que pour des projets développés par l'industrie aérospatiale ou l'industrie automobile. De plus, il faut se conformer à des exigences complexes en matière de sûreté et de classification en qualité. Pour ces raisons principales, les plannings des projets se font souvent sur près de cinq ans ou plus, ce qui n'inclut pas la préparation du site, l'achat des composants à long délai d'approvisionnement, ni le développement de toute la conception générale et de la majeure partie la conception détaillée. Ainsi, le maintien sous contrôle des projets nucléaires reste un défi, et un contrôle insuffisant de la situation peut potentiellement mener à des conséquences dramatiques. Prenons un exemple : après l'incident de TMI (1979) des nouvelles exigences de sûreté furent développées ; les constructions sur-site furent suspendues en attendant la mise en place officielle de ces exigences. En conséquence, les délais de plusieurs projets furent doublés, et beaucoup ont donc été annulés. Plus récemment, des projets occidentaux ont connu des difficultés à cause d'un niveau insuffisant d'avancement de leur conception avant le début de la construction, et d'un manque d'expérience dans la chaîne d'approvisionnement. D'un autre côté, beaucoup de projets chinois et asiatiques fournissent des preuves indiquant que la complexité inhérente aux projets nucléaires n'est pas quelque chose d'insurmontable, et que si on met en place des méthodologies appropriées de conception et de gestion de projets, il en résulte des réalisations de projets bien contrôlées.

Les risques sont encore plus grands pour les FOAK (premiers réacteurs d'un type particulier). Pour ce genre de projets, la R&D et les vérifications techniques lors de la phase de conception sont les clés permettant le contrôle de risques. En général, des mesures actives et effectives visant à s'assurer que les résultats des R&D soient disponibles au stade de la conception sont de première importance. Ainsi la R&D des nouvelles technologies doit être

prise en compte dans la planification du projet. On sait que les processus de licensing des FOAK prennent en général du temps, puisque les régulateurs demandent la démonstration de l'efficacité des éléments nouveaux. De la sorte, Les projets FOAK demandent une attention bien plus grande, et la construction ne devrait pas commencer avant que tous les nouveaux concepts ne soient validés correctement et autorisés.

Quand un projet nucléaire se fait sur la base d'une centrale de référence, les difficultés principales et risques rencontrés durant sa réalisation sont liés à la qualité et à la stabilité de la conception, à la performance de la chaîne d'approvisionnement, à la livraison de tous les composants sur le site en temps et en heure en accord avec le planning ainsi qu'à une bonne coordination de toutes les activités du site.

L'expérience acquise lors des récents projets prouve qu'au moins 70 % de la conception détaillée de la future installation nucléaire doivent être achevées avant le début de la construction, ce qui requiert d'avoir au préalable bien avancé les processus d'approvisionnements afin de posséder toutes les données d'entrées requises pour les analyses statiques et dynamiques, pour définir les points d'ancrages, ainsi que les plaques de construction et les ouvertures, etc. Seule la définition de petits composants n'ayant pas d'influence sur les travaux de génie civil, de tuyauterie ou de réseau électrique peut être laissée de côté, à ce stade. Le travail de conception doit être dans sa totalité, sans perturbation, intégré entre l'ingénieur architecte, les contractants et les fournisseurs, via les mêmes outils de CAO et les mêmes bases de données (se référer à la section 8). La stabilité des exigences de licensing est un prérequis, les régulateurs devant comprendre que les licences « construction et exploitation combinées » (COL) fournissent un cadre permettant une meilleure qualité et sûreté.

Les activités ayant trait à la chaîne d'approvisionnement ainsi que la solidité de cette chaîne constituent un autre facteur clé de succès des projets nucléaires. La Chine et la France sont habituées à un modèle où toute cette chaîne repose sur le propriétaire : dans ce modèle, le propriétaire dispose en interne de capacités propres de conception et de gestion de projet – ce modèle fonctionne avec succès, tant que les compétences des acteurs, méthodes et outils sont gardés à jour, en faisant usage des meilleurs outils et de la meilleure expérience disponible sur le marché.

La coordination de toutes les activités durant les phases de conception, d'achat, de construction et de mise en service requiert l'usage d'outils de gestion de projet sophistiqués, combinant une énorme base de données de composants, un outil de planning, un système de gestion de documentation, etc. De tels outils coordonnés (la Gestion du Cycle de Vie de Projet) existent ; des procédures strictes doivent être définies et mises en place pour profiter pleinement de leur puissance (section 8).

Enfin, des contrôles poussés doivent être mis en place, englobant qualité, sûreté, planification, et coûts. Ils doivent être indépendants le plus possible vis-à-vis du management du projet lui-même, et avoir leur propre rattachement hiérarchique au plus haut niveau de l'organisation.

Afin de garantir la qualité et le planning des projets d'énergie nucléaire, des mesures nécessaires doivent être prises pour réduire les coûts de construction, tout en renforçant leur contrôle. De telles adoptions permettraient de réduire le coût et d'améliorer le rapport

coût-efficacité du projet nucléaire. La gestion par le coût peut bénéficier d'une évaluation à valeur acquise. Gérer la valeur acquise permet d'anticiper les progrès et les dérives de coûts et de proposer des mesures pour s'assurer que les objectifs soient atteints.

L'Annexe C fournit une présentation plus détaillée de ce que l'on entend par « risques de projet » ; une conception et une gestion de projets saines ont pour résultat commun un meilleur contrôle et une réduction des risques.

Conclusions

La complexité des projets nucléaires nécessite de porter un maximum d'attention à la qualité de leur conception, à la robustesse de leur chaîne d'approvisionnement, au contrôle de la cohérence et de la planification du projet grâce à l'utilisation des outils modernes de CAO et de PLM.

Les récentes expériences démontrent que les projets nucléaires, s'ils sont correctement contrôlés, peuvent être achevés en temps et en heure et en respectant le budget initial, tout en se conformant aux exigences strictes de qualité et de sûreté.

Il y a des méthodologies, souvent mises en place dans d'autres industries, à disposition qui devraient grandement bénéficier à l'industrie nucléaire.

Annexe C – Risques principaux liés à la construction de projets nucléaires

1) Risques de financement

Les projets d'énergie nucléaire appartiennent à la catégorie des investissements à actifs fixes, où l'objectif principal du projet est de sécuriser une rentrée d'argent stable. La proportion dans le capital de l'endettement par rapport à l'« equity » dépend de l'équilibre entre coûts de l'investissement et risques acceptables. En général, le risque de financement du projet couvre tous les risques du projet. Plus spécifiquement, les risques de financement les plus significatifs sont la capacité du projet à payer ses dettes, la capacité d'investissement, de refinancement, et les risques purement financiers (comme les risques sur les taux d'intérêt, les risques de taux d'échange, etc.)

Le risque de financement projet peut être sérieusement influencé par la durée du projet de centrales nucléaires. Un délai supplémentaire ne fait pas que coûter plus cher, mais occasionne aussi tout une série de problèmes légaux si la centrale n'est pas prête à être commercialement exploitée quand les premières traites sont dues.

2) Risques de conception

De façon générale, les risques liés à la conception quand il s'agit de technologies ayant fait leurs preuves sont généralement faibles, mais les possibles changements dans ces conceptions, changement de documentation ou retard dans les plans représentent un encore plus gros défi si le travail de conception n'a pas été bien organisé. Pour les FOAK, la R&D et la vérification technique en phase de conception sont les éléments clés permettant de contrôler les risques. La clé pour contrôler les risques dans le cas de nouvelles technologies passe par la prise de mesures actives et efficaces afin d'assurer cohérence rationnelle entre la R&D, par l'amélioration de la conception et la construction. Dans le même temps, la R&D des nouvelles technologies doit être ajustée avec le plan de progression de la construction.

3) Risques liés aux achats

Le développement d'un planning d'achat doit prendre en compte le cycle de fabrication, et le temps requis de collecte d'informations d'interface pour la conception. Quand il s'agit d'équipements à construction longue, il est capital d'employer des fabricants expérimentés. Pour les équipements à hauts risques, on recommande l'emploi d'achats redondants (les équipements additionnels pouvant être utilisés plus tard pour de prochains projets où une augmentation du coût ne dérangera pas autant). Obtenir des équipements de la part de nouveaux fournisseurs, utiliser de nouvelles techniques et technologies, est une source de risque concernant les possibles délais d'interface-conception, de gestion des achats et/ou de livraison des équipements. Il se révèle souvent efficace de réaliser des simulations de négociations reproduisant les processus normaux d'exécution afin d'identifier les risques concernant la technologie, les plans, les coûts, les qualités, etc. Ainsi, à la suite de cela, des mesures ciblées pourront être prises. Des demandes de localisation sont effectuées durant la phase de développement de l'énergie nucléaire dans beaucoup de pays. Les risques associés à la localisation des différents équipements devraient être bien évalués au préalable.

4) Risques de construction

Les grands projets de NPP comportent de multiples risques liés à la construction, tels qu'un possible changement dans la conception au dernier moment, des plans ou des instructions tardifs, un manque de ressources (surtout dans la main-d'œuvre qualifiée), la survenue d'accidents, la mise en service des équipements, etc. Tous ces risques doivent être évalués avec précision, et les impacts des exigences de qualité et de sûreté sur les plannings de construction ne doivent pas être sous-évalués.

Section 12. Assurer la sûreté tout en gardant le coût et la complexité sous contrôle

Recommandations

- Les Principes de Sûreté Fondamentaux mis en avant par l'AIEA sont d'une importance primordiale pour le bon développement de l'industrie nucléaire. Selon ces principes, les exigences de sûreté nucléaire doivent toujours prendre en considération les dernières avancées de la science et de la technologie. Cependant, l'AIEA reste assez générale quant à la définition desdits niveaux « adéquats » de sécurité nucléaire, la question principale continuant à se poser sur le « bon » degré de sûreté. Les Académies recommandent à l'AIEA d'opter pour un point de vue plus clair sur ce sujet complexe.
- La sûreté nucléaire, pendant encore longtemps, va rester l'affaire de réglementations au niveau national. Cependant, les Académies Françaises et Chinoises recommandent que ces exigences de sûreté fassent l'objet d'une harmonisation au niveau mondial. Une telle harmonisation, qui s'est déjà produite il y a plus de quatre-vingts ans dans l'industrie aérospatiale, reste un prérequis de la standardisation industrielle. Le premier pas dans cette voie serait d'atteindre un consensus sur les objectifs de sécurité.
- Les Académies recommandent une approche « fondée sur une appréciation des risques », comme celles qu'ont déjà adoptées de grands pays nucléaires, où les exigences de sûreté sont équilibrées par rapport à leurs bénéfices. Les Académies remettent en cause toute approche exigeant que « la meilleure technologie actuellement disponible » soit systématiquement mise en place, indépendamment de ses mérites.
- Bien que les Académies reconnaissent que les réacteurs en exploitation devraient être régulièrement mis à niveau pour être toujours « au meilleur état de l'art », elles recommandent que les exigences de sûreté s'appliquant à elle restent figées durant la construction d'une centrale, et ce jusqu'à l'exploitation commerciale. La sûreté nucléaire doit être considérée d'un point de vue global, car tout changement même en appliquant des technologies plus avancées n'aura pas nécessairement un impact positif global.

Dès le début du développement de l'énergie nucléaire, la question de la sûreté a été d'une importance capitale. Les concepts principaux sûreté nucléaire (soit la responsabilité ultime des exploitants, l'indépendance des autorités de sûreté, l'importance de justification pour chaque installation utilisée et celle d'optimiser leur protection, la prévention des accidents par des moyens de défense en profondeur, la réduction maximum des risques au moyen de barrières multiples et indépendantes les uns des autres, la gestion des crises et les

interventions d'urgence) ont été établis dès les premiers jours de cette industrie. Ils sont inscrits dans les principes fondamentaux de sûreté décrétés par l'AIEA, qui ont été révisés pour la dernière fois en 2006.

Ainsi, il y a un large consensus selon lequel des exigences correctes de sûreté nucléaire sont la condition préliminaire au développement de l'énergie nucléaire. Il est aussi reconnu que ces exigences doivent évoluer à travers le temps comme résultat des retours sur expériences des exploitations, des progrès de la science, de la technologie et de la demande sociale d'augmentation de la protection. Ainsi, la sûreté est un concept en voie de développement, et en réalité seulement un problème relatif. Cependant, la poursuite systématique d'objectifs de sûreté toujours plus élevés peu importe les complexités additionnelles à mettre en place est pose question.

Le risque nucléaire ou les niveaux de sûreté devraient être considérés en comparaison avec les autres risques sociétaux et être maintenus à l'intérieur de limites raisonnables. Il n'est pas approprié de chercher à atteindre des niveaux de sûreté toujours plus élevés aveuglément. Tandis qu'autrefois il y a eu, en grande partie, un point de vue mondial commun sur les exigences de sûreté à appliquer aux réacteurs de Génération II, inspirées des objectifs prescriptifs de l'US-NRC, ce nouveau développement des réacteurs de Gen-III rouvre deux questions phares : (1) « Quel niveau de sûreté est réellement considéré comme assez sûr ? » soit « Existe-t-il un niveau de sûreté approprié, sur lequel tous les pays pourraient s'accorder ? » (2), « Est-il possible de développer un seul ensemble d'exigences en matière de sûreté qui soit acceptable par tous les pays ? » Il est aisé de deviner qu'une réponse positive à la question (1) servirait en réalité de prérequis à la (2). Quand on compare les évolutions récentes des exigences de sûreté dans différents pays, il apparaît que les régulateurs ne parviennent pourtant pas à converger sur ces sujets majeurs.

Reconnaître que le « risque 0 » ne peut exister, et qu'un « risque résiduel » restera toujours au sein de l'industrie nucléaire comme dans n'importe quelle industrie mène à la conclusion qu'il est nécessaire d'avoir une méthodologie claire afin de pouvoir décider d'un niveau de sûreté « acceptable ».

Cette question trouve sa réponse au sein même des Objectifs et Principes de l'AIEA, sous le principe d'optimisation indiquant que « *Les mesures de sûreté qui sont appliquées aux installations et activités à risques radioactifs sont considérées comme optimisées, si elles fournissent le plus haut niveau de sûreté pouvant être raisonnablement atteint au long de la durée de vie de cette installation ou activité, sans limiter excessivement son utilisation.* ». Cependant si on fait l'hypothèse qu'on devrait chercher à atteindre le risque zéro, ou qu'il n'y a jamais assez de sûreté, alors optimisation signifie maximisation, ce qui peut mener à un processus sans fin.

Pour sûr, l'industrie nucléaire doit prendre en considération le meilleur état de l'art scientifique et technologique, mais elle doit aussi assurer une meilleure optimisation de la conception, sans systématiquement ajouter toujours plus de caractéristiques pour augmenter sa complexité. Afin d'introduire plus de rationalité à l'intérieur de ce processus, il faut suivre une approche « fondée sur une appréciation des risques », comme celle qu'avait développée initialement le US-NRC, et formalisée par l'AIEA. Sous cette approche, les

nouvelles exigences sont systématiquement analysées entre autres par le biais d'évaluations de probabilités, afin de s'assurer qu'elles contribuent à l'accroissement de la sûreté.

Une analyse de type « meilleure estimation » quand on considère les événements potentiels hors conception est plus réaliste que les autres approches et évite de se montrer trop conservatif. Des méthodologies de conceptions plus réalistes reposant sur bonne compréhension des phénomènes physiques devraient être acceptées, car la sur-conception non seulement implique des coûts directs mais peut aussi engendrer des retards et des difficultés de réalisation.

Conclusions

L'énergie nucléaire ne devrait pas être considérée sous une approche exclusivement d'analyse du risque, mais plutôt dans une approche d'analyse de l'équilibre entre le risque et les bénéfices.

La sûreté nucléaire est un processus sans cesse en voie d'amélioration ; ses progrès ont été impressionnants. Après plusieurs années de développement et d'intégration des retours sur expérience, l'industrie nucléaire a atteint un haut niveau de sûreté, en plus d'être un mode de production d'électricité pauvre en émissions de gaz carbonique.

Afin d'améliorer la compétitivité de l'industrie nucléaire il est nécessaire de mettre en place des méthodologies reposant sur une compréhension physique des phénomènes et sur des modèles de simulation certifiés et validés expérimentalement, afin d'éviter que ne soient employées des solutions ultra-conservatrices. Des interactions sur ces sujets techniques avec les régulateurs de sûreté sont nécessaires afin d'obtenir l'agrément de ces méthodologies.

Il serait également important, et également l'heure de chercher à atteindre une harmonisation plus profonde des régulations de sûreté sur une base mondiale.

Section 13. La pertinence des approches internationales de soutien à la préparation de projets dans les pays émergents

Recommandations

Afin de mieux soutenir les programmes d'énergie nucléaire des pays émergents par les pays vendeurs, les progrès devraient s'orienter vers deux directions :

- Vers la standardisation et la stabilisation des processus de licensing (et de réglementation),
- Vers la généralisation de contrats à longs termes d'approvisionnement en électricité garantis par les gouvernements concernés.

La plupart des pays émergents ont un besoin urgent d'un apport stable et fiable d'électricité, afin de développer leurs infrastructures, leurs industries, et répondre aux demandes résultant de l'accélération de la croissance des métropoles. L'option de l'énergie nucléaire offre une réponse potentielle à ces exigences, suppléée par des sources d'énergie renouvelables, qui pourront de façon appropriée couvrir une partie des besoins de la population à échelle locale.

En ce moment, il y a plus de 50 pays qui envisagent positivement de développer de l'énergie nucléaire, dont la plupart sont des pays émergents, qui manquent d'expérience dans la construction de centrales nucléaires et présentent une infrastructure pour le nucléaire sous-développée. À leur effet, l'AIEA a établi un guide pour la construction de l'énergie nucléaire dans les pays émergents (document « Étapes du Développement d'une Infrastructure Nationale pour l'Énergie Nucléaire », NG -G.3.1). Ce guide indique trois phases selon lesquelles passent généralement les pays émergents quand ils introduisent sur leur territoire leur première centrale nucléaire, ainsi que dix-neuf sujets liés à l'infrastructure qui doivent être examinés plus spécifiquement. En combinant avec l'expérience internationale, chaque nation émergente peut utiliser ce guide pour choisir un schéma de développement de l'énergie nucléaire qui serve au mieux ses spécificités domestiques.

De plus, la philosophie de la communauté internationale nucléaire, au travers de l'AIEA, est que chaque pays puisse avoir accès à l'énergie nucléaire tout en respectant son propre planning ainsi que sa propre situation afin de ne pas dériver, avant toute chose, du haut niveau de sûreté nucléaire atteint par la communauté internationale du nucléaire. L'interdépendance de tous les pays du nucléaire au regard de la prévention des accidents est sans nul doute une contrainte. Elle se révélera aussi être un avantage clé au moment où les « anciens » pays du nucléaire se chargeront d'aider les « nouveaux » à dépasser leurs difficultés et développer leurs projets. Les cas de la Chine et des EAU illustrent deux voies différentes mais pertinentes.

La Chine a choisi un schéma de développement de son énergie nucléaire à base d'introduction sur son territoire, d'absorption, d'innovation et de planification à large échelle correspondant à son très large marché interne. Durant la conception et la construction autonomes de la Centrale Nucléaire de Qinshan dans les années 1980, la Chine a importé sur son territoire la technologie d'îlot nucléaire de France ainsi que la technologie d'îlot conventionnel de la Grande-Bretagne, pour au final arriver à la construction de la Centrale Nucléaire de Daya Bay. Durant les 20 années qui ont suivi, la Chine a graduellement formé son propre système technologique au moyen d'introductions, d'absorptions, d'innovations et a atteint une construction de masse standardisée. Sur cette base, la Chine a importé également la technologie relative aux centrales de troisième génération des États-Unis, de la France et de la Russie, pays où ont été adoptées ces idées de conceptions avancées de centrales. En combinant tout cela à son expérience prouvée dans la construction et l'exploitation des centrales nucléaires, la Chine n'a pas tardé à bientôt former sa propre troisième génération de centrale avec la technologie du HPR1000, et des droits de propriété intellectuelle entièrement indépendants. Dans ce processus, la Chine a effectué de gros progrès dans son infrastructure d'énergie nucléaire, et a atteint la capacité d'un exportateur d'une industrie nucléaire complète.

Les Émirats Arabes Unis ont choisi un schéma de développement de l'énergie nucléaire à partir d'une introduction complète. Les EAU ont des réserves financières et un planning concret de développement nucléaire. Afin de rapidement construire son système d'énergie nucléaire, les EAU ont choisi un schéma d'introduction correspondant à leur manque d'expérience dans la recherche nucléaire et de ressources technologiques pertinentes. La première centrale nucléaire des EAU repose sur la technologie nucléaire Coréenne. La conception et la construction de cette centrale ont été en effet confiées clés en mains à la Corée du Sud, et son approvisionnement en combustible fourni par la France et la Russie. En ce qui concerne les ressources humaines, l'agence nucléaire des EAU a engagé des talents expérimentés directement à l'étranger afin de prendre la responsabilité de la supervision du nucléaire aux EAU. De plus, les EAU ont établi un Conseil Consultatif International (IAB) en le formant par des experts du nucléaire renommés de pays différents, pour promouvoir le développement de son infrastructure nucléaire.

Plus généralement, un pays « nouveau venu nucléaire » rencontre des difficultés sur trois niveaux :

- Gestion
- Industriel
- Financier

La première *difficulté de gestion* résulte du manque de compétences nucléaires dans le pays émergent, même s'il ne s'agit que de jouer un rôle de propriétaire, rôle demandant des compétences très souvent sous-estimées. Ces compétences de propriétaire doivent soit se construire principalement sur une base nationale, ce qui a été le cas pour la Chine, ou faire l'objet d'une sous-traitance via un appel aux compétences externes ou étrangères, comme l'ont fait les Émirats Arabes Unis (UAE).

La seconde *difficulté de gestion* provient du manque de familiarité de ces pays avec les spécificités des projets nucléaires ; toutefois ce problème peut facilement être dépassé avec l'aide de l'AIEA ou de sociétés de conseils en nucléaire.

La troisième *difficulté de gestion* est due au fait qu'un projet nucléaire est un programme qui concerne le pays tout entier, ce qui n'est généralement pas le cas pour un projet d'ingénierie classique. Ce point-ci est parfaitement décrit dans le Guide NG de l'AIEA.

Cependant, parmi les 19 objectifs de ce « processus par étapes », et avec les retours des programmes les plus récents, trois sujets apparaissent comme étant de la plus grande importance :

- Un système de sûreté et réglementaire national
- Un plan de financement robuste
- Une stratégie fiable sur le long terme pour gérer le combustible usé et les autres déchets nucléaires

On peut facilement comprendre à partir de ces considérations que la compétence et une implication sur le long terme du gouvernement du pays émergent sont obligatoires pour le développement du nucléaire.

Les *difficultés industrielles* sont principalement liées au fait qu'un pays émergent dispose en général d'une capacité industrielle relativement faible ou en tout cas peu familière des spécificités nucléaires et de très hauts niveaux d'exigence en termes de qualité, de traçabilité, d'audit et de process de contrôles. D'un autre côté, le gouvernement souhaite généralement atteindre aussi vite que possible un stade où une part importante du travail puisse être assumée localement.

Les *difficultés financières* surgissent de plus en plus souvent au moment où le travail préparatoire du projet de centrale arrive au stade crucial de la formation de la société propriétaire avec ses actionnaires, sa gouvernance, ses moyens de financement et ses possibilités de retour d'investissement aux actionnaires. Ces difficultés sont reliées à au moins un voire plusieurs des problèmes suivants :

- À un haut niveau d'investissement requis (plusieurs G€),
- À des capacités limitées de la part du pays hôte
- À des contraintes pouvant gêner les prêteurs potentiels en conséquence des Accords de Bale I, II and III, accords régulant l'industrie bancaire
- À la possible résistance des gouvernements des pays hôtes quand il s'agit de garantir un prix d'achat de l'électricité, afin d'établir des conditions de prix qui se révéleraient gratifiantes sur le long terme pour la société de l'exploitant.

Seules des approches internationales semblent avoir assez de pertinence quand il s'agit d'aider les décisionnaires des pays émergents à dépasser toutes ces difficultés.

Au sujet des *difficultés de gestion*, les accords et solutions de « jumelage » bilatéraux gouvernementaux apparaissent comme étant les solutions les plus adaptées à la mise en place appropriée d'autorités de sûreté et de cadres de réglementation, pour l'organisation de la formation et de l'éducation en vue de la construction d'une ressource humaine adaptée, et pour la mobilisation – sur le long terme – de capacités humaines de soutien

technique comme des réacteurs de recherche, des laboratoires à haute activité ou laboratoires de recherche sur les déchets. Les études de sélection de sites pourraient aussi s'ajouter à cette liste, même si en réalité le consortium vendeur s'occupe de plus en plus fréquemment de la caractérisation du site.

La constitution d'une première étape de sociétés nationales industrielles capables de prendre en charge – avec le niveau de qualité suffisant – des lots de travaux spécifiques, fait souvent l'objet d'une mission conjointe entre les ministères et les associations industrielles ou les chambres de commerce et d'industrie. L'approche la plus efficace pour organiser cette étape semble être la création d'entreprises communes entre les compagnies nationales présélectionnées et les compagnies étrangères qui sont déjà expérimentées dans leurs relations avec les contractants nucléaires, ou au moins la mise en place de consortiums de jumelage entre ces deux sociétés.

Les *difficultés financières* ont jusqu'ici été dépassées principalement grâce à un engagement important du ou des pays du vendeur et de leurs compagnies industrielles :

- En equity par l'électricien leader de la future exploitation, et parfois par le vendeur du réacteur
- Au travers de dettes envers des prêteurs ou envers des agences de crédit export

L'emploi de schémas contractuels tels que les Construction-Possession-Exploitation (BOO) et Construction-Exploitation-Transfert (BOT), comme ceux utilisés en Turquie, est une véritable nouveauté dans le domaine nucléaire, même si ces types de contrats sont actuellement utilisés par d'autres types de production d'électricité.

La contrepartie est qu'il est obligatoire de mettre en place des contrats sur le long terme d'achat d'électricité pour assurer un retour d'investissement. Mais ce système a aussi ses limites. Même la Russie, qui était pourtant l'acteur le plus important dans ces montages, fait face désormais à certaines contraintes financières. De plus, dans la plupart des pays, une confiance exagérée placée en la fixation libre des prix de l'électricité réduit la capacité du gouvernement à établir des contrats sur le long terme, malgré l'exemple remarquable pourtant donné par le Royaume-Uni avec ses tarifs de rachat.

La standardisation et la stabilisation des processus de licensing tout autour du monde donnerait confiance aux investisseurs en ce qui concerne les plannings des projets de centrales.

La généralisation de contrats sur le long terme d'achats d'électricité garantis par le gouvernement accroîtrait aussi la confiance des investisseurs en la fiabilité des retours sur investissements annoncés. Ces deux améliorations de confiance reposeraient sur une coopération internationale, au sein de laquelle il n'existe pas encore de forum pour établir les deux sujets évoqués ci-dessus.

Enfin, les Petits Réacteurs Modulaires, développés par tous les pays « vendeurs » de nucléaire, pourraient représenter une solution complémentaire et intéressante dans un futur proche, puisqu'ils peuvent baisser de façon significative le coût des investissements initiaux, et simplifier et accélérer leur mise en place. Ils exigeraient probablement une meilleure coopération entre le pays vendeur et le pays émergent surtout en termes de réglementations, de déchets et d'assurances.

Conclusions

Au moment de se développer dans le nucléaire civil, les différents pays devraient choisir le schéma de développement qui serait le plus à leurs conditions domestiques, et améliorer graduellement leurs capacités dans ce domaine au travers d'une coopération internationale. En effet, des approches internationales et coopérations bilatérales se révèlent inévitables quand il s'agit de soutenir des pays émergents dans leur introduction de l'énergie nucléaire civile dans leur mix énergétique. Il n'y a qu'elles qui puissent aider à résoudre les difficultés de gestion, d'industrie et de financement que ces pays ne manqueront pas de rencontrer.

Par considération pour la sécurité de l'industrie nucléaire mondiale dans son ensemble, les pays qui ont acquis la capacité de créer une chaîne d'approvisionnement nucléaire industrielle, comme la Chine et la France, devraient prendre l'initiative de servir la communauté mondiale en partageant leurs ressources en énergie nucléaire et en aidant les pays émergents à développer leur énergie nucléaire de façon sûre et effective

Section 14. L'évaluation des impacts sur la santé humaine au bout de cinquante ans d'activités dans le nucléaire

Recommandations

- Cinquante ans d'exploitation normale de réacteurs nucléaires commerciaux ont démontré que leur impact radiologique sur la santé humaine est extrêmement faible, et bien en dessous du taux de radioactivité naturelle. Ce fait devrait être mieux communiqué au public. Il serait aussi important de lui rapporter les effets sur la santé provoqués par la production d'électricité venant d'énergies fossiles comme celle de la combustion au charbon afin de leur offrir une meilleure perspective.
 - Les conséquences létales en termes de radioactivité des accidents graves tels que ceux de Tchernobyl et de Fukushima ont été limitées ; toutefois de grands territoires ont dû être évacués pendant de longues périodes de temps. Il est ainsi important de moderniser les réacteurs de Gen-II pour améliorer la prévention de tels accidents, et ainsi diminuer les conséquences de leurs survenues pour qu'aucune contre-mesure ne soit nécessaire, sinon dans le voisinage immédiat des centrales et ce pendant une durée limitée. À cet effet, le niveau de sûreté des réacteurs de Gen-II devrait être accru pour se rapprocher autant que possible de celui atteint par les réacteurs de Gen-III, comme il a été fait en France et en Chine.
-

Depuis les années 50, l'impact de la production d'électricité nucléaire sur la santé des exploitants et du public vivant autour des centrales nucléaires a fait l'objet de nombreuses études. Les impacts radioactifs des expositions liées à une exploitation normale du cycle du combustible, ainsi que ces mêmes impacts en cas d'accidents, ont fait l'objet d'une minutieuse estimation. Les rapports scientifiques émis par le Comité Scientifique des Nations Unies pour l'étude des Effets des Rayonnements Ionisants (UNSCEAR), entre autres, ont résumé les résultats de ces enquêtes. Les inquiétudes sur les expositions aux rayonnements sont expliquées ci-dessous. Il y aura, également, une explication succincte des niveaux de doses de radioactivité émises artificiellement et des effets sur la santé dans l'Annexe 1.

1. L'exposition aux rayonnements en conditions d'exploitation normales

La dose annuelle reçue par un individu à cause de la radioactivité naturelle est d'environ quelques mSv (millisievert). L'impact des centrales sur les individus vivant dans leur voisinage immédiat est extrêmement faible, constituant une dose comprise entre 1‰ et 1 % de la radioactivité naturelle, et est bien en dessous des standards émis par la CIPR qui limitent cette exposition additionnelle à 1 mSv/an. La dose moyenne reçue par les travailleurs du cycle du combustible dans le monde (et ce en comptant des mines d'uranium à la fabrication du combustible, à l'exploitation du réacteur et au retraitement), sur la période 2000 à 2002, selon l'UNSCEAR est d'environ de 1.2 mSv – alors que la limite maximale d'exposition admise pour les travailleurs du nucléaire, comme l'a définie la CIPR, est de 20 mSv/an.

Par exemple en ce qui concerne les mines d'uranium au Canada, second plus gros producteur d'uranium au monde, aucune augmentation du radon au-delà des niveaux normaux n'a été observée dans le voisinage des mines et la dose moyenne reçue par les travailleurs dans les mines et usines de concentration est d'environ 1 mSv/an, ce qui est significativement en dessous de la limite réglementaire des 50 mSv/an au Canada.

En effet, n'importe quel type de production d'électricité peut augmenter l'exposition du public et des travailleurs aux rayonnements issus des activités tout au long du cycle de vie allant de la mine, à la fabrication et exploitation, et au démantèlement. Une importante source d'exposition toutefois réside en la décharge de radionucléides naturels (radon et progénitures du radon) en provenance du sol ou autres formations géologiques. Par exemple, afin d'obtenir les matériaux nécessaires à la construction d'une usine de production d'électricité peu importe son type, des activités de mine sont requises surtout pour la collecte de minerais métalliques. Le rapport de l'UNSCEAR 2016 contient une comparaison des radiations émises par les différents types de production d'électricité, ainsi que par leurs activités en amont et en aval.

On estime que le cycle de charbon contribue pour plus de la moitié de la dose totale collective reçue par la population (c'est-à-dire, dose individuelle multipliée par la population exposée). La dose collective est la somme de toutes les décharges dues à une seule année de génération d'électricité globale. De plus, cette estimation a été faite en faisant l'hypothèse que ces décharges sont dues à des usines à charbon modernes. Le cycle du combustible nucléaire incluant la production d'électricité de son côté, ne contribue qu'à moins d'un cinquième de cette dose collective. Il est contre-intuitif de noter que, sous des conditions normales d'exploitation, le cycle du charbon donne naissance à une dose de rayonnements plus grande reçue collectivement par unité d'électricité générée que ne le ferait une production d'électricité par énergie nucléaire, et une dose significativement plus élevée par unité d'électricité produite que les autres technologies évaluées, à l'exception de la production géothermique.

2. Victimes et évaluation des effets sur la santé dus aux accidents de centrales et autres installations nucléaires

Depuis que l'énergie nucléaire a commencé à fournir de l'électricité, le monde a connu quelques accidents significatifs, incluant des centrales dont le cœur est entré en fusion avec pour conséquences de larges fuites de radioactivité.

L'accident de *Three Mile Island* (TMI) en mars 1979 a vu une fusion partielle du cœur, ce qui a résulté en une fuite de gaz et d'iodes radioactifs (0.55 PBq) dans l'environnement. Selon la Société Nucléaire Américaine, qui se fonde sur les chiffres d'émissions radioactives officiels, « La dose moyenne de radioactivité infligée à la population résidant dans les seize kilomètres autour de la centrale était de 0.08 mSv, et aucun individu n'a alors reçu plus de 1 mSv. » Plusieurs études épidémiologiques ont conclu que cet accident n'avait pas eu d'effet sur la santé sur le long terme.

L'incident de la centrale de *Tchernobyl* en avril 86 a mené à une fusion totale du réacteur et a résulté en la fuite de gaz radioactifs (1760 PBq d'iode radioactif, 85 PBq de césium radioactif) et d'autres matériaux dans l'environnement.

134 secouristes ont souffert d'un syndrome d'irradiation aiguë, dont 28 sont décédés directement des suites de la radiation. Parmi les travailleurs chargés de la récupération, exposés à des doses modérées, on a relevé en effet des preuves d'une augmentation détectable du risque de leucémie et de cataracte. De surcroît, l'occurrence des cancers de la thyroïde chez ceux qui ont été exposés durant l'enfance et l'adolescence a significativement augmenté à cause du lait contaminé par l'iode radioactif durant les stades les plus précoces de l'accident. Le cancer de la thyroïde est une maladie rare et nos facultés de diagnostic de ce dernier ont bien augmenté. Durant la période s'étendant de 1991 à 2005, on a relevé plus de 6000 cas autour de Tchernobyl, dans les zones contaminées, et parmi ceux-ci, 15 se sont révélés fatals.

À part ce cancer de la thyroïde occasionné par une exposition à ces radiations durant l'enfance, il n'a été observé aucune survenue en excès de tout autre cas avéré de cancer et de leucémie chez les habitants des zones contaminées. Le comité de l'UNSCEAR a indiqué que « la plupart des résidents avaient été seulement exposés à de faibles niveaux de radiations semblables à ceux qu'on trouve annuellement dans le rayonnement ambiant naturel ou à peine supérieurs de quelques fois », niveaux « non susceptibles de créer des effets substantiels sur la santé de la population moyenne », même si toutefois « la sévère perturbation causée par l'accident a résulté en un impact majeur social et économique, et en une grande source de détresse pour les populations affectées ».

L'accident de la centrale de *Fukushima* en mars 2011 a été le résultat d'un tremblement de terre suivi par un tsunami. Ceci a conduit à la fonte de trois des cœurs des 6 réacteurs installés sur la côte du site de Fukushima Daichi et à des fuites de gaz radioactifs (moins de 500 PBq d'iode radioactif, et moins de 20 PBq de césium radioactifs) ainsi que de matériaux dans l'environnement.

Aucun effet grave sur la santé (incluant les décès) n'a été observé suite à l'exposition directe aux radiations. Durant la première année suivant l'accident, les doses moyennes des travailleurs impliqués dans l'atténuation de l'accident et des adultes vivants autour de ces zones étaient de 12 mSv et de 1-10 mSv, respectivement, et d'à peu près deux fois cette dose pour les enfants. Les doses émises durant les 10 premières années ont été estimées comme le double de celles émises durant la première année. Le rapport de l'UNSCEAR (2013) et son livre blanc (2015, 2016) ont examiné les études pertinentes à ce sujet depuis l'accident. Le comité a considéré une « possibilité théorique d'une augmentation du risque de cancer de la thyroïde dans le groupe des enfants les plus exposés aux radiations. Toutefois, le cancer de la thyroïde restant une maladie rare chez les jeunes enfants, on ne s'attend pas à pouvoir observer statistiquement aucun effet survenant dans ce groupe ».

Le comité de l'UNSCEAR a aussi « noté que les plus importants impacts sur la santé observés par le public en général et parmi les travailleurs sont considérés comme étant ceux qui portent sur la santé mentale et le bien-être social. »

Cette déclaration devrait se révéler valide chaque fois que de grosses fuites de radioactivité se produisent à la suite d'un accident. Ainsi, la priorité a été donnée au renforcement des réacteurs de Gen-II afin de non seulement réduire encore plus la possibilité de fusion du cœur, mais aussi de permettre de contrôler les fuites de produits de fission en cas de surpression dans les enceintes de confinement, au moyen de systèmes d'aération du

confinement filtrés et autres dispositifs d'ingénierie. Le niveau de sûreté de ces réacteurs, après renforcement, est désormais aussi proche que faire se peut des niveaux de sûreté atteints par les réacteurs de Gen-III. Si de tels systèmes avaient été pris en considération par le Japon, aucune évacuation sur le long terme dans et autour des centrales de Fukushima n'aurait été requise. De tels systèmes sont mis en place en Chine et en France.

Conclusions

Au cours des 50 dernières années d'exploitation des centrales nucléaires, les retours d'expérience obtenus à la suite des accidents graves montrent qu'ils n'ont pas eu d'impacts dus aux rayonnements sur les humains, ou alors très limités, pour peu que les produits de fission soient restés confinés. D'un autre côté, en cas de dissémination, des territoires étendus doivent être évacués. Les conséquences sur la santé du public aux alentours des centrales restent aussi fortement limitées : les effets sur la santé des radiations ionisantes dépendent des doses reçues et, comme il l'a été démontré au-dessus, de telles doses ont été faibles. En revanche, les conséquences sociales en termes de santé mentale et de bien-être au niveau local autour des sites des accidents ont été importantes. Cela explique pourquoi des efforts considérables sont faits afin d'améliorer la sûreté dans tous les réacteurs actuels et futurs avec l'objectif de prévenir les fuites de radioactivité sous toutes circonstances. Sous des conditions normales d'exploitation des activités nucléaires, les niveaux d'exposition aux rayonnements du public sont très faibles et encore plus faibles que ceux engendrés par exemple par la production d'électricité par combustion de charbon (le charbon contient naturellement des traces d'éléments radioactifs tels que U, Th, Rd, etc., qui se dégagent dans l'atmosphère lorsque le charbon est brûlé dans des centrales électriques à charbon).

Annexe 1. Les niveaux de doses et les effets sur la santé de l'exposition aux rayonnements

Les populations utilisent des sources de rayonnements non ionisants et sont exposées à eux tous les jours. Ces formes de rayonnements ne sont pas suffisamment énergétiques pour parvenir à ioniser des atomes ou des molécules. On trouve par exemple de tels rayonnements non ionisants dans les fours à micro-ondes, les récepteurs radio ou les téléphones cellulaires. Certains types de rayonnements, conçus génériquement pour être des radiations ionisantes, ont assez d'énergie pour éjecter les électrons des atomes, déstabilisant l'équilibre de matière entre électron et proton et créant des ions positifs.

Les humains sont continuellement exposés également à des rayonnements ionisants provenant de sources naturelles présentes dans l'environnement et de sources artificielles dues aux applications civiles des rayonnements. La dose globale moyenne que reçoit un individu est estimée à environ 3 mSv (Tableau n° 1). Environ 20 % de cette exposition provient de sources artificielles, principalement d'applications médicales ; par exemple, la dose reçue lors d'une tomodensitométrie de l'abdomen est d'environ de 10 mSv.

Tableau 1. Doses annuelles globales de l'exposition moyenne du public aux sources de radiations (*Effets et Sources des Radiations*, UNEP, 2016)

Total des sources naturelles	2.42 mSv	Total des sources artificielles	0.65 mSv
Nourriture	0.29 mSv	Centrales nucléaires	0.0002 mSv
Rayons cosmiques	0.39 mSv	Accident Tchernobyl	0.002 mSv
Sol	0.48 mSv	Retombées radioactives dues aux armes	0.005 mSv
Radon	1.26 mSv	Médecine nucléaire & radiologie	0.65mSv

L'énergie des rayonnements ionisants peut endommager les tissus vivants en tuant ou en modifiant les cellules. Ces effets sur la santé dépendent de la dose d'exposition aux radiations. Dans les rapports de l'UNSCEAR, une dose est décrite comme élevée quand elle excède 1000 mSv, et définie comme modérée quand elle est entre 100 mSv et 1000 mSv et faible quand elle est de moins de 100 mSv.

Si le nombre de cellules tuées par l'exposition aux rayonnements est assez élevé, cela peut résulter en une réaction des tissus et même se terminer par la mort, par exemple des pertes de cheveux, des brûlures et des symptômes de radiations aiguës. La gravité de ces effets augmente avec la dose quand un certain seuil est dépassé. Par exemple, une dose de plus de 1000 mSv pourrait causer un syndrome de radiation aigu. La dose seuil des possibles

réactions nuisibles sur les tissus humains est de plus de 100 mSv. On observe de tels effets lors d'accidents d'irradiation ou dans la radiothérapie.

Si les modifications de ces cellules irradiées ne sont pas réparées, cela peut en effet résulter en un cancer ou en une maladie congénitale affectant la descendance de l'irradié. Ces effets sont aléatoires, et la probabilité de leur survenue dépend de la dose de radiation reçue. Le Rapport de l'UNSCEAR 2010 indique qu'« il y a de fortes preuves épidémiologiques prouvant que l'exposition des humains aux radiations sur des niveaux modérés à élevés peut mener à une survenue en excès de tumeurs avérées au sein de plusieurs organes, ou de leucémie ». Par exemple, 10,423 des personnes ayant survécu aux bombes atomiques d'Hiroshima et Nagasaki ont péri de cancers (tumeurs avérées en plus de leucémie) à la date de décembre 2000, parmi lesquelles 571 décès (environ 5 %) ont pu être attribués à l'exposition aux rayonnements due aux bombardements. Cependant il n'y a aucune preuve évidente d'un possible caractère congénital excessif de l'exposition aux radiations chez les humains

Section 15. Perception des risques relative à des dangers réels

Recommandations

- Plus d'efforts devraient être faits afin de promouvoir et mettre en place la culture de la sûreté nucléaire, et améliorer une communication interactive dans les deux sens auprès du public pour l'aider à voir les risques liés au nucléaire de façon rationnelle et objective.
- Des efforts devraient être faits pour expliquer en termes simples les mesures adoptées à la suite de Fukushima afin de renforcer la sécurité des centrales déjà existantes de Génération II et pour améliorer la conception des centrales de Génération-III et -III+. En se référant aux accidents nucléaires graves ayant eu lieu par le passé, on devrait surtout mettre l'accent sur les éléments suivants : d'abord sur la mise en place de moyens de préventions qui réduisent significativement la probabilité de tels accidents, puis en second lieu, sur l'accentuation de la limitation des conséquences radiologiques de tels accidents dans l'entourage proche de la centrale, et des efforts pour limiter un maximum la période de « danger ».

Chaque fois qu'une nouvelle technologie émerge, deux logiques se confrontent, de façon pratiquement métaphysique. Une de ces logiques se réduit à l'évaluation de l'équilibre entre coûts et bénéfices, logique de l'exploitation et des acteurs industriels, qui doivent innover pour rester compétitifs. L'autre logique prête attention aux conséquences négatives potentielles des innovations technologiques et essaie de construire une approche où la « rationalité » imposerait des limites aux conclusions tirées des estimations en termes de coûts/bénéfices, en prenant en compte d'autres considérations plus éthiques, qualitatives ou indirectes.

Suivre un tel raisonnement a pour conséquence que les ingénieurs et les scientifiques sont priés de concentrer tous leurs efforts sur l'évitement – à tout prix – de non seulement la catastrophe, mais aussi de la moindre ombre de potentiels incidents ! En se fondant sur les preuves récoltées dans les pays du monde entier, on déduit aisément que les activités du nucléaire supportent ce but et sont ainsi une illustration évidente de cette observation.

Dès lors, il est nécessaire de rappeler que si l'existence d'un risque requiert de facto l'existence potentielle du danger, le risque ne doit toutefois pas être confondu avec le danger : la définition du risque est la multiplication de l'exposition au danger par le danger lui-même. S'il n'y a pas d'exposition au danger, il n'y a pas de risque.

On peut imaginer que la perception des risques correspondrait à une évaluation correcte des risques eux-mêmes dès qu'ils sont objectivement prouvés. Mais ce serait un rêve utopique, qu'il faut analyser sous trois angles de perspectives :

- Psychologie

La perception des risques ne repose pas exclusivement sur des facteurs irrationnels. Tout le monde construit son propre « panier de risques » et le gère avec un certain degré de rationalité. Par exemple, on peut accepter certains risques selon la compensation qu'ils fournissent ; ce qui est ainsi le cas pour les personnes habitant autour d'une centrale ou d'une installation nucléaire.

- Sociologique

La perception des risques dépend fortement de la culture, du pays et de l'historique du pays.

De plus les risques sélectionnés par un individu de façon personnelle ne sont pas craints de la même façon que le sont les risques vus par la collectivité. L'énergie nucléaire est un mode de production d'électricité qui n'a pas été explicitement choisi par la plupart des personnes qui risquent d'être éventuellement affectées par ses inconvénients.

- Communication

Les sujets sur lesquels on communique affectent la perception des risques et le jugement de valeurs du public. L'énergie nucléaire appartenant à un domaine hautement scientifique et technique pour lequel la plupart des membres du public ne disposent pas vraiment de connaissances par expérience, les médias sont susceptibles de jouer un rôle fortement heuristique sur la formation de la perception du public sur les risques nucléaires, rôle devenu d'autant plus persuasif dans l'ère actuelle de média fondée sur le Web.

Analyse des perceptions du risque de l'énergie nucléaire au regard de la psychologie

La psychologie soumet l'idée que l'individu perçoit les risques au travers de certains mécanismes cognitifs psychologiques. Les facteurs de déviation cognitive liés aux risques incluent notamment : des facteurs subjectifs, comme les traits individuels de personnalité, le savoir et l'expérience, la « perte de conscience du risque » ou « l'attente du risque », ainsi que des facteurs objectifs tels que la nature du risque, sa taille, les facteurs de contrôle et de compréhension du risque. Ainsi, chez différentes sortes de personnes on retrouve de fortes différences dans la compréhension des risques liés à l'énergie nucléaire : pour les professionnels, l'identification des risques se fonde généralement sur des évaluations techniques pesant le pour et le contre ; de son côté, le public tend à percevoir ses propres intérêts en les liant de très près aux thèmes de la sûreté et à la santé, en ignorant les bénéfices de l'énergie nucléaire, ce qui donne fréquemment naissance à un syndrome NIMBY (Not In My Backyard, ou, « pas chez moi ») dirigé contre les installations nucléaires.

Le public considère usuellement que les termes de catastrophe potentielle, incontrôlable et inconnue, sont des caractéristiques intuitives de l'énergie nucléaire, une vision aggravée par les accidents de TMI, de Tchernobyl et de Fukushima. Le public n'est généralement pas au courant que les effets des rayonnements en provenance des centrales nucléaires sont bien plus faibles que ceux liés à l'industrie du charbon et que les nouveaux réacteurs de Gen-III et de Gen-IV sont conçus spécifiquement afin de prévenir des fuites de radioactivité en toutes circonstances. Le public, lui, a toujours tendance à penser que le risque nucléaire est bien plus élevé que ceux qu'on rencontre dans d'autres industries.

Les résultats d'une enquête conduite par les départements du gouvernement, par les chercheurs et par les médias sur l'acceptation du public en Chine indiquent que :

- Le public ne dispose que de sources limitées d'informations sur l'énergie nucléaire et manque d'un savoir basique sur ce sujet,
- La majorité des inquiétudes du public au sujet du développement de l'énergie nucléaire est principalement causée par une participation faible du public au domaine nucléaire, ainsi que par un manque de transparence des informations et par leurs appréhensions sur la sûreté nucléaire. Le résultat se traduit en une population chinoise ne soutenant qu'à 40 % le développement de cette énergie dans leurs pays,
- L'accident de Fukushima eu comme conséquence de rendre le public plus sensible au possible développement des projets d'énergie nucléaire, et de le faire s'opposer en conséquence à de tels projets, surtout près de chez eux.

En France, les résultats principaux du rapport « IRSN 2016 Baromètre de la perception des risques et de la sécurité du public français » indiquent que :

- Le terrorisme est devenu l'inquiétude principale des Français,
- Plus d'un Français sur deux déclare qu'il a plus confiance en la science aujourd'hui qu'il y a dix ans et aussi qu'il fait confiance aux experts et organismes techniques et scientifiques qui interviennent dans le domaine nucléaire,
- La majorité du public est en faveur d'un accès libre aux résultats des expertises,
- Même si 46 % des sondés pensent que toutes les précautions sont prises pour assurer un très haut degré de sûreté dans les centrales françaises, environ 90 % d'entre eux persistent à penser qu'un accident au sein d'une centrale ne pourrait qu'avoir de très sérieuses conséquences.

L'analyse de la perception des risques de l'énergie nucléaire au regard de la sociologie

La perception des risques d'un individu ne se base pas que sur sa cognition psychologique individuelle, mais est aussi associée à une certaine organisation ou système social. La perception du risque individuel est affectée par la position sociale, par l'influence de la communauté, et par le background social du pays. Les événements désastreux ont beaucoup d'effets sur la psychologie, la société, le système et les statuts culturels d'un pays, ce qui peut profondément influencer la perception des risques de la population. On connaît ceci comme l'effet de la chaîne sociale sur la perception des risques : quand la crainte est plus fréquemment mentionnée dans les conversations ou les médias que le reste, le public prête de plus en plus d'attention aux informations racontées, pour enfin « percevoir » (ou plutôt imaginer) un risque, qui, en réalité, dévie très fortement du véritable risque factuel. Par exemple, après l'accident nucléaire de Fukushima du Japon, on a pu relever des comportements aux États-Unis, en France, en Allemagne et dans d'autres pays, d'achats de tablettes d'iode. En Malaisie, aux Philippines et en Russie, ce phénomène s'est traduit par un approvisionnement en teinture d'iode, en Corée du Sud par la fin des achats de produits à base d'algues, et en Chine par l'achat de sel iodé. Plus important encore, on trouve des exemples où il a fallu arrêter des projets nucléaires à cause des protestations du public, ce qui nécessite un examen approfondi afin de trouver de meilleures façons de gérer de telles crises sociétales.

Analyse de la perception du risque du nucléaire au regard de la communication

La communication sur les risques effectifs implique les agences nationales gouvernementales, les scientifiques experts et érudits de ces domaines, le public, les médias, les organisations non-gouvernementales et ainsi de suite. Une communication non homogène sur différents sujets affectera les différents effets de transmission des risques, surtout la perception des risques par le public et son jugement de valeur sur ces derniers. Après l'accident de Tchernobyl, les différents rapports du gouvernement, des médias et des organisations au sujet des victimes causées par l'accident ont différé de façon très notable, conduisant à une situation où le public n'arrivait plus à se former une opinion correcte des véritables impacts de l'accident.

Le public est fortement sensible à l'acquisition d'informations concernant les véritables risques qu'il encourt ainsi qu'à la confiance qu'il peut placer en ces sources d'information. Des informations incomplètes sur les risques tendent à faire augmenter les risques perçus par le public, par manque d'informations soit à cause de mesures d'évitement du gouvernement soit à cause d'une attitude ambiguë de la part de ce dernier quant aux risques, et à mener à une perte de confiance dans les informations fournies. La couverture des médias ainsi que leur requalification de « l'explosion d'hydrogène » de l'incident nucléaire de Fukushima en « explosion nucléaire » ont de la sorte contribué à faire paniquer le public.

La Chine souhaite améliorer son système national de sûreté nucléaire, renforcer ses capacités en termes de sûreté nucléaire et booster sa culture de la sûreté nucléaire. En 2014, la sûreté nucléaire a été officiellement incorporée au système de sécurité national Chinois.

Les problèmes, défis et difficultés de la perception du risque nucléaire

Les risques perçus sont à la fois objectifs et influencés par la communication des médias, par la perception et le jugement individuels, et par des facteurs sociaux, institutionnels et culturels. À la suite de la construction de nouvelles centrales nucléaires, et de la survenue d'accidents au travers du monde, de changements et développements des politiques d'énergie nucléaire de différents pays, la connaissance par le public de l'énergie nucléaire a changé. Elle montre un haut degré d'attention de sa part sur ce sujet, un degré limité d'acceptabilité et de connaissance, ainsi qu'une attitude caractérisée par sa subjectivité et son irrationalité. Comment améliorer la connaissance du public, réguler la dissémination des informations et réduire la panique du public : tels sont les défis et les difficultés rencontrés pour le développement de l'énergie nucléaire dans le monde.

Pour avoir une meilleure compréhension de ce qui pourrait être fait pour améliorer la connaissance du public et à la lumière des considérations notées ci-dessus, il est du plus grand intérêt de se rappeler deux divergences majeures entre le véritable danger et la perception du risque des activités nucléaires.

- *La réalité du danger est que* : les accidents « graves » se produisant dans les centrales nucléaires de Génération-III+ n'occasionneraient que des contre-mesures limitées, ne pouvant en raison de leur conception pas entraîner de conséquences radiologiques majeures.

La perception subjective du risque par le public est que : en cas d'un crash d'avion ou d'un accident grave endommageant le cœur du réacteur, d'importantes quantités de produits radioactifs ne manqueront pas de se déverser hors du bâtiment de confinement.

- *La réalité du danger est que* : la nocivité biologique des faibles niveaux et doses de radioactivité est toujours en cours d'étude, mais aucune conclusion claire prouvant une quelconque nocivité n'a pu être acquise. Toutefois, le retour d'expérience des populations vivant dans des régions avec de « hauts niveaux » de radioactivité naturelle (comme le Kerala, la Bretagne, etc.) ne témoigne d'aucun effet visiblement perceptible sur le long terme.

La perception subjective du risque par le public est que : le « premier becquerel » en provenance d'une installation ou centrale nucléaire est nocif pour la santé humaine. Mais si ce même Becquerel provient d'une radiographie passée chez le dentiste ou l'hôpital, il a perdu sa nocivité.

Conclusions

Les politiques menées de transparence totale et d'information du public sur les résultats des études scientifiques et techniques dédiées aux différents problèmes liés à l'énergie nucléaire semblent se révéler fructueuses. Elles contribuent fortement à la réduction du fossé existant entre le véritable risque potentiellement engendré par une centrale et la perception de ce même risque par le public. Toutefois, la population a tendance à surestimer les véritables dangers potentiellement encourus à cause de l'industrie nucléaire en raison d'un savoir sur le plan scientifique et technique limité. Il reste beaucoup de travail pour que le public prenne conscience du progrès immense fait dans la sûreté nucléaire grâce aux mesures post-Tchernobyl et post-Fukushima mises en place dans le monde : grâce à des mesures de prévention adéquates, la probabilité estimée d'accidents avec fusion du cœur du réacteur a été réduite par un facteur dix, à la fois pour les flottes déjà existantes en France et en Chine, et pour les réacteurs de Gen-III. De la même manière, des améliorations permettant de réduire les risques ont été ajoutées au sein des réacteurs déjà existants, et implantées d'office au cœur des nouvelles conceptions de réacteurs ce qui réduit drastiquement les conséquences radiologiques de tels accidents. Aucune contre-mesure ne sera donc nécessaire, excepté sur l'environnement immédiat de la centrale, et ce de toute façon durant une période limitée.

Section 16. Amélioration de la prise de conscience du public et exigences de gouvernance

Recommandations

- Les pays développant l'énergie nucléaire doivent partager entre eux leurs informations et arguments en faveur des bénéfices et faiblesses majeurs de l'énergie nucléaire et sur la façon d'y remédier afin d'améliorer la connaissance du public dans ces domaines. Le rôle de l'énergie nucléaire en tant que source stable, fiable et partageable d'électricité sans émission de gaz à effets de serre doit véritablement être souligné auprès de la population.
- Les exploitants des installations nucléaires et les parties prenantes devraient adopter une stratégie de communication positive sur les exploitations réussies des centrales et se montrer transparents pour faire part des événements qui s'y produisent.
- Au-delà du partage des arguments et messages, les stratégies de communication devraient prendre en compte les différents degrés de développement des pays qui introduisent en masse sur leur territoire les énergies renouvelables. Il y a aucune raison que cette implantation massive de production d'énergie renouvelable soit en conflit avec l'énergie nucléaire, si les énergies renouvelables servent bien à remplacer les centrales utilisant des énergies fossiles pour réduire les émissions de carbone et non pas à réduire la part d'énergie nucléaire qui ne produit déjà pas de carbone.

Pour les pays industrialisés et émergents, qu'ils soient occidentaux ou orientaux et plus généralement à l'échelle de la planète, les avantages clés de l'énergie nucléaire résident en les points suivants :

- Il n'y a dans le nucléaire aucune émission de gaz à effets de serre, ce qui soutient l'effort de lutte mondiale contre le changement climatique,
- Une grande puissance exploitée par un fonctionnement en base, assurant stabilité de réseau et permettant le développement de l'industrie et de lourdes infrastructures pour les pays,
- La mise à disposition de façon aujourd'hui abondante et sûre d'une électricité à relativement bas prix comparé aux autres sources,
- L'inutilité du stockage de l'électricité, dont le besoin pénalise les énergies intermittentes.

D'un autre côté, les faiblesses clés résident en les points suivants :

- Le fardeau des déchets radioactifs à longue durée de vie de haute activité, dont le volume est certes relativement limité mais qui peut subsister durant des centaines de milliers d'années,
- Les effets des accidents graves sur de larges zones et des populations importantes

Dans tous ces pays, les efforts fondamentaux d'amélioration de la prise de conscience du public consisteront à fournir des informations accessibles sur chacun de ces thèmes, en portant une attention toute particulière à leur quantification, et à débattre des solutions.

Ce qui distingue les pays et requiert un traitement différentiel pour chacun est la tendance de la croissance de demande d'électricité. En Chine et de façon plus générale au sein des économies à développement rapide, la rapide hausse de la demande d'électricité qui s'y fait permet une introduction progressive mais substantielle d'une capacité de génération d'électricité renouvelable intermittente qui ne s'oppose pas au développement simultané d'un fort secteur de l'énergie nucléaire. La situation est quelque peu différente en Europe, où les perspectives de la consommation d'électricité sont assez plates (mais pourraient être revues de nouveau à la hausse si la consommation de combustibles fossiles devait être remplacée par l'électricité). Ainsi, tandis qu'une introduction majeure et rapide d'énergies renouvelables (éolienne, solaire) intermittentes sans émission de carbone demande de larges investissements, la conséquence principale est de réduire la demande d'électricité d'origine nucléaire. Cette démarche n'aura en réalité qu'un impact très limité sur les émissions de CO₂, puisque l'énergie nucléaire n'émet pas de carbone non plus. Et cela n'aura pas non plus vraiment d'effet sur la flotte nucléaire actuellement installée, qui devra être maintenue afin de pouvoir soutenir les manques engendrés par l'intermittence de ces énergies renouvelables.

L'idée à la mode déjà présente en Europe que le développement d'énergies intermittentes « permettrait de faire un pas vers l'avant pour le futur du monde », que le public couple à des idées plus ou moins philosophiques comme celle de la « théorie de la croissance négative », aggrave la difficulté à faire prendre conscience au public pour le rendre un peu moins émotif et requiert de la part des instances de trouver plus d'arguments rationnels et de faire plus d'efforts.

De plus amples arguments détaillés liés aux cinq points mentionnés précédemment pourront être trouvés dans les autres chapitres de ce rapport. En particulier, les problèmes concernant la gestion des déchets radioactifs qui sont traités dans le Chapitre 4, où il est démontré que le stockage de déchets radioactifs à longue durée de vie dans des centres en couches géologiques profondes est faisable. Les améliorations considérables en matière de sûreté accomplies sur les installations actuelles et intégrées au cœur des conceptions des réacteurs de Génération-III après les survenues d'accidents impliquant centrales nucléaires et autres installations sont examinées dans le Chapitre 12. Toutefois, il serait utile de réaliser des études supplémentaires afin d'aider à une meilleure compréhension de la situation actuelle en Europe.

Actuellement et dans les décennies à venir probablement, le sujet du changement climatique ne suffira pas à convaincre ni la population ni les corps politiques d'accueillir de nouvelles centrales et de leur accorder un soutien gouvernemental fort que l'on peut trouver par exemple en Finlande ou au Royaume-Uni. Un tel soutien gouvernemental doit être garanti pour le développement des projets sur le moyen terme, soit durant la phase de décision (entre 5 à 10 ans) puis durant la phase de construction (de 5 à 10 ans), mais aussi sur le long terme, c'est-à-dire durant la durée de vie d'exploitation de la centrale (au moins 60 ans).

Si la contribution des énergies nucléaires à la réduction des émissions de CO₂ est connue du public (mais plus ou moins nié par les multiples ONG antinucléaires !), sa valeur n'est pas pleinement appréciée. Les bénéfices économiques de l'énergie nucléaire (encore une fois, tout du moins en Europe) en termes de coûts de production d'électricité sont remis en question dans un contexte où des exigences toujours plus strictes de sûreté ont mené à des hausses significatives des coûts de production, tandis que le coût de la production photovoltaïque a lui beaucoup baissé.

Aujourd'hui, les cultures technologiques, industrielles et économiques des politiciens, des médias et du public en général sont relativement limitées et orientées sur le court terme. Les atouts industriels et les considérations économiques sont trop souvent sous-évalués dans la balance des processus de décision en faveur d'arguments politiques, voire philosophiques.

Heureusement, il reste des décisionnaires politiques qui prennent en considération les objectifs économiques et contraintes technologiques. C'est le cas par exemple de beaucoup de membres du Parlement français appartenant à l'OPECST (l'Office parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Techniques). Cet office conduit des enquêtes bien informées sur les différents sujets du nucléaire et délivre des rapports de haute qualité qui sont souvent certes ignorés à la fois par le public et par les médias, mais qui méritent pourtant d'être pris en compte dans les décisions concernant les thèmes complexes du secteur de l'énergie.

Cependant dans pratiquement tous ces pays, la plus grande méprise se trouve dans le rythme de la « transition énergétique ». Il n'y a aucune raison qui exigerait de remplacer l'énergie nucléaire par des énergies renouvelables intermittentes en moins de 50 à 100 ans, si cette intermittence nécessite ensuite de la suppléer par de centrales alimentées aux énergies fossiles ! Voici le message central qu'il faudrait adresser au public.

Les exigences en matière de gouvernance et la prise de conscience du public sont extrêmement influencées certes par les stratégies de communication des exploitants nucléaires mais aussi par les messages des ONG antinucléaires. Et il faut porter la plus grande attention à ce que les messages envoyés par les exploitants nucléaires ne soient pas complètement interprétés par le public de travers, soit à l'exact opposé de leur signification initiale. Par exemple, le slogan d'EDF « Safety First » a été interprété par beaucoup de gens comme un message signifiant que la « flotte nucléaire d'EDF ne serait pas sûre » et nécessiterait des modifications urgentes. Cette interprétation est tout particulièrement liée à l'énorme montant des investissements requis par le « Grand Carénage ».

Pour pouvoir commencer à construire de nouvelles installations nucléaires sur des « espaces verts », un soutien gouvernemental très fort est requis et de longues procédures correctement adaptées au projet sont obligatoires. Les problèmes ne sont pas principalement dus à des oppositions locales mais souvent à des opposants « professionnels » internationaux, et, - au moins en France - à un réseau complexe de lois environnementales, comme la Loi sur l'eau, la Loi des côtes, la Loi sur la biodiversité. Même l'extension des sites existants risque de devenir problématique sur le territoire. En Chine, certains projets à l'intérieur des terres sont toujours en stand-by depuis l'incident de Fukushima.

Conclusions

Les bénéfices de l'énergie nucléaire et en particulier sa production stable et massive d'électricité à des prix faibles et ses très faibles émissions de gaz carbonique ne sont pas suffisamment connus du public. Le besoin de production d'une production d'électricité stable n'est pas assez compris de ce dernier qui a une insuffisante appréciation des services remarquables fournis par le réseau électrique, par sa stabilité et sa relativement faible sensibilité aux conditions météorologiques. Il est nécessaire de mettre un peu plus de réalisme au sein du débat du mix énergétique. Il est capital en particulier de souligner que le caractère intermittent de l'énergie renouvelable devra nécessairement être compensé par quelque chose d'autre : en effet, lorsque les énergies renouvelables ne sont pas en mesure de produire d'électricité en cas d'absence de vent ou de soleil, il faut bien recourir à une capacité de sauvegarde, puisque les installations de stockage de l'électricité ne sont pas disponibles et pourraient ne pas l'être avant de nombreuses années. Et si ce renfort s'appuie alors sur des combustibles fossiles, cela induira forcément des émissions de GES. De plus, il faut savoir que quand le montant de la capacité de génération d'électricité renouvelable atteint un niveau critique, il y a de sévères problèmes de stabilité concernant de larges parties de réseaux interconnectés. Ce problème est dû à la nécessité d'opérer les capacités conventionnelles de production d'électricité de façon hautement intermittente, ce qui pourrait ne pas être tenable techniquement ou économiquement.

Cela vaut la peine d'expliquer ces points fondamentaux au public et de lui montrer que l'on a besoin de l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité de façon sûre et continue pour de larges réseaux répondant à la demande croissante d'une société urbanisée. Comme les points de vue sur le mix énergétique des pays sont souvent influencés par des arguments émotionnels, il y a véritablement besoin d'améliorer le niveau de compréhension en termes de contraintes technologiques et d'objectifs économiques fondamentaux et de fournir plus d'informations sur les thèmes de la sûreté et des progrès qui ont été faits sur la gestion des accidents. Ces objectifs pourraient être atteints via l'adoption de meilleures stratégies de communication et une meilleure éducation du public sur l'énergie, afin que la population puisse comprendre les véritables problèmes sans se faire abuser par des arguments trompeurs et, qu'elle puisse développer une véritable opinion fondée sur une analyse rationnelle des faits.

Il est aussi important de prendre en compte les vitesses différentes de développement des pays, ce qui en cas d'un développement économique faible risque de créer des conflits entre l'introduction massive d'énergies renouvelables intermittentes et l'énergie nucléaire, tandis qu'en cas de développement économique rapide ce ne sera pas forcément le cas.

Section 17. Organisation, méthodologies et rôles des différents acteurs dans l'amélioration de la compréhension du public

Recommandations

Pour améliorer l'acceptation du public, il est recommandé d'agir sur trois niveaux différents.

- Sur le niveau technique, il est important de prendre entièrement en compte les expériences qui ont été tirées des accidents majeurs afin de pouvoir exploiter les centrales actuelles d'une manière sûre et efficace.
- Sur le niveau organisationnel, les gouvernements centraux devraient formuler une stratégie claire en matière d'énergie et s'efforcer de l'appliquer. Une séparation claire est requise entre les exploitants d'un côté, et de l'autre les autorités de sûreté et organismes de soutien techniques en matière de sûreté. Toutes les actions entreprises sur le plan local pour établir fermement une plate-forme de dialogue accessible au public augmenteront de facto la confiance du public.
- Au niveau de la communication, il est important de faire savoir ces efforts et progrès au grand public, par l'organisation de son accès à des informations transparentes, exactes et structurées. Afin de prendre en compte correctement l'acceptabilité sociale du nucléaire, il est important de développer son éducation sur les thèmes de l'énergie, surtout sur les facteurs techniques et économiques, sur les impacts environnementaux et risques, et d'améliorer sa compréhension des défis fondamentaux en matière d'énergie.

L'expérience apprise à partir des accidents de Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima a permis de reconsidérer les facteurs de risques à prendre en compte pour être mieux préparé au cas où il faudrait faire face à une grande fuite de radioactivité dans l'environnement – mais cela a également souligné le besoin d'informer le public sur les questions nucléaires, de façon indépendante et transparente et professionnelle. Tout ceci exige différents types d'action.

Le *premier type d'action* est essentiellement technique et consiste en un constant progrès dans l'exploitation des centrales en termes d'efficacité, de sûreté et d'intégration des retours d'expérience au sein de la flotte actuelle de centrales et dans les conceptions des futures centrales. Pour pouvoir gérer les facteurs de risques avec efficacité, ils doivent d'abord être analysés rationnellement et priorisés. Ces analyses et priorisations ont mené à la conception de réacteurs de troisième génération, qui bénéficient de caractéristiques fortement augmentées en termes de résistance aux accidents, et à divers actes d'agression.

Le *second type d'action* se fait d'un point de vue organisationnel et inclut trois niveaux d'acteurs :

- Gouvernements centraux et leurs départements fonctionnels d'énergie, d'éducation, de communication, de santé, etc. ;
- Acteurs directs de l'industrie nucléaire dans leur totalité, ce qui inclut les départements de supervision, les exploitants, les autorités de sûreté, les organisations de soutien technique indépendantes, les associations industrielles, etc. ;
- Autorités locales et le public des territoires où les projets nucléaires sont situés.

Pour chacun de ces niveaux, différentes responsabilités et actions potentiellement envisageables peuvent être identifiés :

1. Les gouvernements centraux devraient harmoniser leurs cadres de réglementation nationaux afin de formuler une stratégie claire en matière de développement énergétique national, notamment au sujet du développement de l'énergie nucléaire. Ensuite, ils devraient s'efforcer de se tenir à leur décision, et coordonner leurs départements fonctionnels subordonnés afin de rester conformes à cette stratégie énergétique nationale

2. Tous les acteurs de l'industrie nucléaire doivent structurer le secteur nucléaire d'une manière rigoureuse définissant clairement leurs rôles respectifs afin qu'ils puissent s'engager dans une culture de sûreté et la mettre et garder en pratique. Ce rôle est normalement défini par l'AIEA comme *« l'assemblée de caractéristiques et d'attitudes dans les organisations et les individus qui établissent que, en tant que priorités absolues, les sujets de la protection de la sûreté puissent recevoir l'attention méritée par leur importance. »* Afin de mettre en place cette culture, il est indispensable de nommer les rôles des différents acteurs bien distinctement :

- D'abord, la responsabilité de la sûreté revient principalement aux exploitants des réacteurs nucléaires.
- Ensuite, les exploitations doivent être placées sous l'autorité administrative d'une agence de sûreté publique indépendante, qui contrôle et surveille toutes les installations civiles nucléaires. En France, son indépendance est garantie par la nomination de ses membres pour un mandat irrévocable de six ans. Cette agence de sûreté organise des inspections régulières et obligatoires des sites nucléaires et des équipements, délivre les autorisations d'exploitation et a le pouvoir de les suspendre sous toutes circonstances quand elle le juge nécessaire.
- Cette agence administrative doit se reposer sur une forte expertise technique, qu'elle peut soit développer en interne, ou trouver chez un ou plusieurs Organismes Techniques de Sûreté (se référer à la Section 7).

3. Au niveau local, on peut retrouver différentes situations selon le type de décentralisation du pays. Par exemple en France, le représentant local du Gouvernement Central (le « Préfet ») est le seul interlocuteur de l'exploitant. Les autorités locales sont impliquées pour consulter et informer le public des territoires où les projets nucléaires ont été installés : les projets liés à l'énergie nucléaire, sont créés après de complexes procédures de décision. Après approbation des projets et début de la phase de préparation de la construction, les autorités locales devraient, avec les exploitants, établir fermement des plates-formes de dialogue ouvertes au public ainsi que des mécanismes de divulgation d'informations transparentes. De plus, les autorités locales devraient explorer des moyens de recherche

pour le développer de manière intégrée les projets nucléaires et des progrès sociaux économiques et sociaux locaux, ce qui comprendrait un soutien sous la forme de contributions financières de la part du projet nucléaire et d'emploi local.

Dans certains cas, en France, une consultation publique des citoyens doit être organisée avant la prise de décisions, afin de mieux comprendre les sources potentielles de craintes. Cela a été fait par exemple pour la planification du projet de stockage en couche géologique profonde pour les déchets radioactifs, du nom de CIGÉO.

Le *troisième type d'action* est de faire connaître ces efforts au public en augmentant sa prise de conscience et sa compréhension du système.

Toutefois, le manque d'éducation fondamentale du public sur la radioactivité ainsi que l'invisibilité des rayonnements, l'association du nucléaire civil dans beaucoup d'esprits aux armes nucléaires, laissent la part belle à la peur. Même quand on parle des côtés bénéfiques les plus évidents de la physique nucléaire, comme l'irradiation des tumeurs afin de guérir les cancers, ou l'utilisation de la résonance magnétique nucléaire dans l'imagerie, ou la compréhension de l'histoire de notre planète au travers les radio-isotopes, le mot « nucléaire » est banni des vocabulaires associés à ces utilisations de toute évidence bénéfiques, comme s'il était trop effrayant. Il est évident que le futur du nucléaire va dépendre en grande partie de sa compréhension par le public et de l'acceptation de ce dernier de cette technologie. Ceci a été bien illustré en Europe notamment par des pays tels que l'Italie, qui refuse désormais toute industrie nucléaire, ou par l'Allemagne qui a décidé après Fukushima de fermer toutes ses centrales nucléaires en 2022. Il est donc important d'expliquer en détail les mesures de sûreté qui ont été incluses dans les nouvelles conceptions de réacteur en assurant la transparence des informations liées au nucléaire, en fournissant l'éducation nécessaire à cette compréhension, et en répondant à la demande croissante d'information du public dans son entièreté. Il est aussi temps d'améliorer nos façons d'informer le public et de communiquer au sujet des accidents et des incidents, qu'ils soient naturels ou en partie ou totalement occasionnés par la main de l'homme. En France, au niveau national, le Haut Comité de la Transparence et de l'Information sur la Sûreté Nucléaire (HCTISN) garantit déjà que des informations exactes et accessibles sur les exploitations nucléaires civiles soient disponibles au public.

Conclusion

Au-delà des multiples actions entreprises afin d'assurer la sûreté de l'exploitation des centrales nucléaires, il est important d'énoncer clairement les rôles des différents acteurs et de fournir au public des informations transparentes, exactes et structurées sur l'énergie nucléaire. Cela constitue la meilleure réponse aux différentes attitudes négatives envers son développement. Il est aussi important de souligner les bénéfices de l'énergie nucléaire comme source d'énergie sûre, propre et efficace ainsi que ses avantages dans le développement économique de chaque pays.

Glossaire

ABWR : Advanced Boiling Water Reactor, ou *Réacteur Nucléaire à Eau Bouillante Avancé*

APWR : Advanced Pressurised Water Reactor, ou *Réacteur à Eau Pressurisée Avancé*

ASN : Autorité de Sûreté Nucléaire (France)

BOO : Build Own Operate model, ou *CPE, Construction-Propriété-Exploitation*

BOT : Build Own Transfer, ou *Construction-Exploitation-Transfert*

BWR : Boiling Water Reactor, ou *REB, Réacteur à Eau Bouillante*

CAD : Computed Aided Design, ou *CAO, Conception Assistée par Ordinateur*

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique (French atomic energy commission)

CEFR : China Experimental Fast Reactor, ou *Réacteur (à Neutrons Rapide Expérimental Chinois*

CGN : China General Nuclear Power Corp, entreprise majeure de l'industrie nucléaire

CNNC : China National Nuclear Corporation, ou *Compagnie Nucléaire Nationale Chinoise*

COP : Conference of Parties to the United Nations Framework on Climate Change, ou *CCNUCC, Conférence des Parties à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques*

DOE : Department of Energy, ou *Département de l'Énergie (des États-Unis)*

EDF : Électricité de France (Fournisseur d'électricité Français)

EPR : European Pressurised Water Reactor, ou *Réacteur Pressurisé Européen à Eau*

ESBWR : Essentially Simplified Boiling Water Reactor, ou *Réacteur Nucléaire à Eau Bouillante*

EUR : European Utilities Requirements, ou *Exigences Communes des Fournisseurs d'Électricité Européens*

FNR : Fast Neutron Reactors, ou *Réacteurs à Neutrons Rapides*

FOAK : First of a kind, ou *Premier Projet du Genre*

GCR : Gas Cooled Reactor, ou *Réacteur Refroidi au Gaz*

Les termes de Gen-II, Gen-III, Gen-IV renvoient respectivement à la seconde, troisième et quatrième Générations de réacteurs nucléaires actuellement exploités ou en cours de développement. La première génération était constituée de prototypes, qui sont en cours d'arrêt.

GFR : Gas Cooled Fast Reactor ou *Réacteurs Rapides Refroidis Au Gaz*

GHG : Greenhouse gas ou *GES, Gaz à Effets de Serre*

GIF : Generation-IV International Forum ou *Forum International Génération IV*

HL-LLW : High level Long-lived waste ou *HAVL, Déchets de Haute Activité à Vie Longue*

HLW : High Level Waste, ou, *Déchets de Haute Activité*

HPR1000 : Advanced Pressurized Water Reactor développé en Chine ou *(EPR), Réacteur Avancé à Eau Pressurisée (aussi nommé Hualong One)*

IAEA : International Atomic Energy Agency, ou *AIEA, Agence Internationale de l'Energie Atomique*

INSAG : International Nuclear Safety Advisory Group (Groupe Consultatif auprès du Directeur Général de l'AIEA), ou *Groupe Consultatif International pour la Sûreté Nucléaire*

IRSN : Institut de radioprotection et sûreté nucléaire (France)

IT : Information technology, ou *Technologie de l'Information*

LLW : Long-Lived Waste ou *Déchets à Vie Longue*

LLW : Low Level waste ou *Déchets de Faible Activité*

LWR : Light Water Reactor ou *REL, Réacteur à Eau Légère*

MOX : Mixed Uranium-Plutonium oxide ou *Mélange d'Oxydes, mélange Uranium-Plutonium*

MSR : Molten Salt Reactor ou *Réacteur Nucléaire à Sel Fondu (RSF)*

NEPIO : Nuclear Energy Programme Implementing Organisation ou *Organisation de Mise en Œuvre du Programme d'Energie Nucléaire*

NGO : Non-Governmental Organisation ou *ONG, Organisation Non Gouvernementale*

NNSA : National Nuclear Safety Administration (China) ou *Administration Nationale De La Sûreté Nucléaire (Chine)*

NPP : Nuclear Power Plant, ou *Centrale Nucléaire*

NRC : Nuclear Regulatory Commission (USA) ou *Commission de Réglementation Nucléaire des Etats-Unis*

PLM : Product Lifecycle Management, ou *Gestion du Cycle de Vie des Produits*

PPA : Power Purchase Agreement, ou *Convention d'Achat d'Électricité*

PWR : Pressurised Water Reactor ou *Réacteur à Eau Pressurisée (REP)*

R&D : Research and Development ou *Recherche et Développement*

RW : Radioactive waste ou *Déchets Radioactifs*

SBO : Station blackout ou *Perte d'alimentation)*

SFR : Sodium-cooled Fast Reactor ou *Réacteur à Neutrons Rapides Refroid au Sodium (RNR-Na)*

SG : Steam generator ou *Générateur de Vapeur (GV)*

SMR : Small Modular Reactor ou *Petit Réacteur Modulaire (PRM)*

SWU : Separation Working Unit ou *Unité de Travail de Séparation (UTS)*

TMI : Three Miles Island

TNR : Thermal Neutron Reactor ou *Réacteur À Neutrons Thermiques (ou Réacteur à Neutrons Lents)*

TSO : Technical Safety Organisation ou *Organismes Techniques de Sûreté*

UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation ou *Comité Scientifique des Nations-Unies pour l'étude des Effets des Rayonnements Ionisants*

URD : Utility Requirement Document (développé aux Etats-Unis) ou *Document d'Exigence d'Utilité*

VHTR : Very High Temperature Reactor ou *Réacteur Nucléaire à Très Haute Température*

Auteurs et contributeurs

Academie des Technologies

<http://www.academie-technologies.fr/en/members>

Alain BUGAT (*Study co-leader*), Yves BAMBERGER, Pascal COLOMBANI, Bernard ESTEVE, Gerard GRUNBLATT, Patrick LEDERMANN, Philippe PRADEL, Bruno REVELLIN-FALCOZ (*Coordinateur international*), Bernard TARDIEU, Dominique VIGNON

Académie des Sciences

<http://www.academie-sciences.fr/en/Members/members-of-the-academie-des-sciences.html>

Edouard BREZIN, Sebastien CANDEL (*Study co-leader*), Robert GUILLAUMONT

Chinese Academy of Engineering (CAE)

<http://en.cae.cn/en/Member/Member/>

ZHAO Xiangeng (*Study co-leader*), YE Qizhen (Co-leader assistant)

Equipe d'experts chinois

TIAN Jiashu (CNNC) (*Team Leader*), ZHANG Meng (CINIE), CHEN Bin (NPIC), GUO Hao (CNPE), DENG Wei (CNPE), XIE Xiaoqin (CZEC), LI Youchen (CIRP), REN Xiaona (CIRP), YIN Xiangyong (CNG)

Equipe technique

Wolf GEHRISCH (NATF) (*Secrétaire technique*), Jean-Yves CHAPRON (NASF) (*Secrétaire technique*), TIAN Qi (CAE) (*Coordinateur international*), Zong Yusheng (CAE), LI Ruoyu (CIAE) (*Communication*)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier, Antoine DANCHIN (AS), Jean FRENE (AT), Ghislain DE MARSILY (AS and AT), Marc FONTECAVE (AS), Yves LEVI (AT), Olivier PIRONNEAU (AS) pour leur lecture attentive de la version initiale de ce rapport et pour leurs commentaires nombreux et utiles.

Les auteurs souhaitent également remercier DU Xiangwan (CAE), WANG Dazhong (CAE), ZHENG Jianchao (CAE), PAN Ziqiang (CAE), LI Guanxing (CAE), CHEN Niannian (CAE), YU Junchong (CAE), XU Mi (CAE), SUN Yufa (CAE), WAN Yuanxi (CAE), PENG Xianjue (CAE), ZHANG Huazhu (CNEA), LEI Zengguang (CNNC), BAI Yunshen (CINIE), SHI Lei (CINIE), LIU Yizhe (CIAE), DONG Yujie (TSU), LI Xiang (NPIC), QIN Zhong (NPIC), GAO Ruifa (CNPE), WANG Yuhong (CNPE), YANG Qiuyu (CNPE), LV Tao (CNPE), LI Xingyu (CNPE), Zhao Shufen (CNPE), FANG Haoyu (NPIC), YANG Yong (CIAE), CHEN Gongquan (CGN), ZHENG Baojun (CNPE), MA Chao (CNPE), LIN Haomiao (CZEC), SHAO Chendong (CZEC), REN Yue (CIRP), WANG Yan (CIRP), WANG Zhiyu (JNPC), LIU Zhonghua (CNNC), Wu Guokai(CAE), Song Dexiong(CAE), and Wang Zhenhai (CAE) pour leur contribution et commentaires précieux.

Notes biographiques

Des informations sur les CV des auteurs peuvent être trouvées sur les sites web des trois académies. Des données biographiques résumées sont données ci-dessous.

Académie des technologies

Alain BUGAT est membre et président honoraire de l'Académie des technologies. Il a été administrateur du Commissariat à l'énergie atomique et il est actuellement vice-président de NUCADVISOR

Yves BAMBERGER est membre de l'Académie des technologies et ancien directeur de la recherche et du développement d'EDF

Pascal COLOMBANI, est membre de l'Académie des technologies, ancien administrateur général du CEA et ancien président du Conseil de surveillance d'AREVA, il est président du Advisory Board d'A.T. Kerney Paris

Bernard ESTEVE, est membre de l'Académie des technologies. Ancien conseiller nucléaire pour Total, il est président de B.E. Consult

Gerard GRUNBLATT, est membre de l'Académie des technologies. Il est ancien responsable des applications de la supraconductivité chez ALSTOM

Patrick LEDERMANN, est membre de l'Académie des technologies. Il est ancien directeur général d'ALSTOM Inde limité

Philippe PRADEL, est membre de l'Académie des technologies. Il est vice-président de ENGIE Nucléaire, en France

Bruno REVELLIN-FALCOZ est membre et président honoraire de l'Académie des technologies. Il est ancien vice-président directeur général de Dassault Aviation

Bernard TARDIEU, est membre de l'Académie des technologies. Il est président d'honneur de COYNE et BELLIER

Dominique VIGNON est membre de l'Académie des technologies. Ancien président directeur général de Framatome, il est actuellement associé de NUCADVISOR

Académie des sciences

Sébastien CANDEL est président de l'Académie des sciences. Spécialiste des sciences de l'ingénieur, Professeur des universités émérite à CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, il a été récemment nommé Président du Conseil scientifique d'EDF.

Edouard BREZIN est membre de l'Académie des sciences et ancien président de cette académie. Spécialiste de physique statistique et de physique des particules, il est professeur émérite à l'Ecole Normale Supérieure.

Robert GUILLAUMONT est membre de l'Académie des sciences. Professeur honoraire de l'Université d'Orsay, spécialiste de radiochimie, il est membre de la Commission Nationale d'Evaluation.

Académie d'ingénierie de Chine

ZHAO Xiangeng est vice-président de l'Académie d'ingénierie de Chine (CAE)

YE Quizhen est membre de la CAE. Il est spécialiste du domaine des réacteurs nucléaires et de la technologie de production d'énergie nucléaire. Il a été ingénieur en chef du projet d'énergie nucléaire de Qinshan.

Équipe de travail

Les membres de cette équipe travaillent pour CNNC (China National Nuclear Corporation), CINIE (China Institute of Nuclear Information and Economics), NPIC (Nuclear Power Institute of China), CNPE (China Nuclear Power Engineering Corporation), CZEC (China Zhongyuan Engineering Corporation affiliée CNNC), CIRP (China Institute for Radiation Protection), CNG (China General Nuclear Power Corporation)

Dans la situation actuelle où une grande partie de la production de l'énergie électrique mondiale s'appuie sur les énergies fossiles et plus particulièrement le charbon, l'énergie nucléaire constitue l'une des options les plus réalistes de réponse à cette demande d'électricité de manière sûre, efficace et propre – tout en simultanément résolvant les problèmes environnementaux et de changement climatique. Parce qu'il s'agit d'une source d'énergie stable et massive, elle peut fournir avec fiabilité une énergie aisément répartissable et peut servir de compléments aux sources d'énergies renouvelables (telles que celles issues des éoliennes ou des panneaux solaires) qui ont un caractère principalement intermittent et sont peu aisées à mobiliser pour répondre à la demande.

Le développement de l'énergie nucléaire continue de soulever toujours beaucoup de défis et de questions sur les sujets de la sûreté, de la gestion des déchets radioactifs à longue vie, sur le développement et le déploiement de réacteurs nucléaires avancés, en matière d'économies, d'acceptation du public, etc. (dont certains ont potentiellement trouvé réponse). Étant deux des pays disposant de la plus grande capacité nucléaire (NPP) du monde, la France et la Chine attachent toutes deux une grande importance à l'usage pacifique de l'énergie nucléaire autour du globe, et ont la responsabilité ainsi que la volonté d'aider les pays émergents dans leur développement de NPP et dans leurs souhaits de résoudre les défis auxquels ils feront face.

Dans la continuation des décisions de la COP 21 et de la COP 22 qui visaient à obtenir une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre au travers du monde, les trois Académies (l'Académie Chinoise d'Ingénierie, l'Académie Française des Technologies et l'Académie Française des Sciences) pensent que cette initiative qui est la leur, visant à faire la lumière sur certains des thèmes les plus complexes liés à la production d'énergie nucléaire, pourrait envoyer un message fort et important aux académies, décideurs et sociétés des autres pays.

Le rapport actuel reflète les positions des trois académies qui agissent en tant que corps indépendants, et ne sauraient être interprétées comme positions d'acteurs industriels dans le domaine des NPP ou des gouvernements français ou chinois. Dans ce rapport, les académies ayant contribué à sa rédaction visent à rappeler l'histoire et les perspectives de l'énergie nucléaire, et à s'intéresser aux problèmes clés à considérer afin de rendre l'énergie nucléaire encore plus sûre et plus abordable pour les pays développés ou émergents. Même si ce rapport touche à beaucoup de différents sujets, il n'est pas conçu pour être exhaustif. Il est la synthèse de toutes réflexions et des discussions durant une période de six mois.

Ce rapport comprend une synthèse ainsi que dix-sept sections. Deux de ces sections donnent un bref rappel de l'histoire, des problèmes et défis du développement nucléaires et touchent aux problèmes concernant les déploiements des NPP de Gen-III. Deux autres traitent des aspects scientifiques, incluant les promesses et défis des futures conceptions de réacteurs et s'intéressent spécifiquement à la situation des Gen-IV et aux concepts des nouveaux Petits Réacteurs Modulaires (PRM). Une section s'occupe de la gestion des déchets nucléaires. Les sujets purement technologiques sont ensuite pris en considération et débattus, soulignant enfin la nécessité et l'importance des Organismes Techniques de Sûreté, mais aussi des avancées et des défis de la digitalisation et des nouveaux outils de conception. L'importance des installations et infrastructures de recherche nucléaire y est soulignée. La question de l'éducation et de la formation de la main-d'œuvre y est également examinée. L'un des objectifs consiste à attirer de jeunes diplômés avec un haut niveau d'éducation dans l'industrie du nucléaire. On s'intéresse aussi à la formation des employés dans les installations afin de leur donner un background scientifique convenable ainsi que la culture de la gestion de sûreté. Deux sections se préoccupent des questions d'ingénierie comme la gestion de projets nucléaires, ou la conformité aux exigences de sûreté tout en contrôlant les coûts et la complexité. La pertinence d'un soutien international aux projets nucléaires des pays émergents est également examinée.

Les questions sociétales sont étudiées dans les quatre dernières sections. Il est fait une évaluation de l'impact global des activités nucléaires sur la santé humaine durant les cinquante dernières années. Comme la sûreté est une question centrale de l'exploitation des NPP, elle est nécessaire à l'amélioration de la perception des risques, lorsqu'on l'analyse au regard des dangers avérés. Le rapport souligne la nécessité d'accroître la prise de conscience et le savoir du public dans ces domaines et considère la gouvernance requise à cet effet ainsi que les organisations et rôles des différents acteurs, ainsi chargés de l'amélioration de la compréhension du public et de limiter la tendance actuelle qui voit des réglementations croissantes apparaître qui compliquent le développement et l'exploitation des installations nucléaires.