

Développement de l'énergie nucléaire

ISBN 978-92-64-99123-1

Évaluation de risques d'accidents nucléaires comparés à ceux d'autres filières énergétiques

© OCDE 2010
AEN n° 6862

AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE
ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements de 32 démocraties œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Chili, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Slovaquie, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission européenne participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE ou des gouvernements de ses pays membres.

L'AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1er février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OEEC. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 28 pays membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

- d'aider ses pays membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins civiles ; et
- de fournir des évaluations faisant autorité et de dégager des convergences de vues sur des questions importantes qui serviront aux gouvernements à définir leur politique nucléaire, et contribueront aux analyses plus générales des politiques réalisées par l'OCDE concernant des aspects tels que l'énergie et le développement durable.

Les domaines de compétence de l'AEN comprennent la sûreté nucléaire et le régime des autorisations, la gestion des déchets radioactifs, la radioprotection, les sciences nucléaires, les aspects économiques et technologiques du cycle du combustible, le droit et la responsabilité nucléaires et l'information du public. La Banque de données de l'AEN procure aux pays participants des services scientifiques concernant les données nucléaires et les programmes de calcul.

Pour ces activités, ainsi que pour d'autres travaux connexes, l'AEN collabore étroitement avec l'Agence internationale de l'énergie atomique à Vienne, avec laquelle un Accord de coopération est en vigueur, ainsi qu'avec d'autres organisations internationales opérant dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Publié en anglais sous le titre :

Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources

Les corrigenda des publications de l'OCDE sont disponibles sur : www.oecd.org/editions/corrigenda.

© OCDE 2010

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.

Photos de couverture : R. de Barse (Electrabel, Belgique) et L. Astruc (EDF, France).

AVANT-PROPOS

Les accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl avaient considérablement freiné le développement de l'énergie nucléaire partout dans le monde. Depuis, les performances en matière de sûreté nucléaire sont régulièrement au centre des débats sans que l'on tienne compte généralement des résultats de l'ensemble de la filière ni que l'on procède à des comparaisons avec les risques que présentent les autres sources d'énergie.

Cet ouvrage décrit les progrès de la sûreté des centrales nucléaires au fil des années, suivant l'évolution de leur conception de la première à la troisième génération de centrales. Il souligne l'importance du concept de défense en profondeur et l'accent mis sur la culture de sûreté. Il compare la fréquence de fusions du cœur et de rejets importants de radioactivité sur la base d'études probabilistes de sûreté pour montrer comment les évolutions de la conception des centrales ont permis d'abaisser la probabilité et d'atténuer les conséquences des accidents graves. Il compare les données sur les accidents graves (ayant causé la mort de cinq personnes ou plus) survenus lors de l'exploitation d'un large éventail de sources d'énergie. La comparaison montre que les risques nucléaires sont souvent très inférieurs à ceux des autres industries. Elle examine les décès immédiats mais aussi ultérieurs, sachant que ces derniers sont plus difficiles à estimer et à vérifier. Enfin, le rapport exploite les résultats de sondages d'opinion pour analyser la confiance que le nucléaire inspire au public et les corrélations entre cette confiance et le crédit accordé à la législation et au système réglementaire.

Des conclusions sont tirées de ces évaluations concernant la nécessité de continuer à améliorer la sûreté et à approfondir la connaissance du public de l'exploitation et de la réglementation des centrales nucléaires. Pour gagner sa confiance, la transparence et l'ouverture sont vitales dans les décisions ou activités liées aux centrales nucléaires. Ce rapport s'adresse principalement à un public généraliste et aux services responsables des politiques énergétiques.

Remerciements

Ce rapport a été rédigé par Stan Gordelier et révisé par le Chef de la Division du développement de l'énergie nucléaire, Ron Cameron, sous la direction du Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC).

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	3
THÈMES DE RÉFLEXION POUR LES DÉCIDEURS	7
SYNTHÈSE	9
1. INTRODUCTION	13
2. PHILOSOPHIE DE LA SÛRETÉ DES CENTRALES NUCLÉAIRES	15
2.1 Principes fondamentaux de sûreté de l'AIEA	15
2.2 Défense en profondeur	16
3. ÉVOLUTION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE	21
3.1 Nombre d'arrêts automatiques de réacteur	21
3.2 Exposition des travailleurs	22
4. ÉVOLUTION DES PRÉVISIONS DU RISQUE D'ACCIDENT GRAVE	27
4.1 Étude probabiliste de sûreté.....	27
4.2 Baisse de la probabilité de fusion du cœur et de la probabilité de rejet radioactif important	28
5. ANALYSE COMPARÉE DES RISQUES D'ACCIDENT GRAVE DANS LE SECTEUR ÉNERGÉTIQUE	33
5.1 Analyse comparée des principales filières énergétiques	34
5.2 Courbes fréquence-conséquences.....	36
5.3 Récapitulation des risques d'accident grave dans le secteur énergétique.....	40
6. NUCLÉAIRE ET CONFIANCE DU PUBLIC	43
7. CONCLUSIONS	47

Liste des figures

1 : Concept de défense en profondeur.....	18
2 : Nombre moyen d'arrêts automatiques de réacteurs dans le monde pour 7 000 heures d'exploitation.....	22
3 : Dose collective moyenne correspondant aux réacteurs en service qui font partie du programme ISOE, classée par filière de réacteur.....	23
4 : Baisse de la dose individuelle moyenne dans l'industrie électronucléaire française.....	24
5 : Évolution de la dose collective annuelle moyenne par réacteur dans différentes régions.....	25
6 : Baisse de la probabilité de rejet radioactif important des générations de réacteurs qui se sont succédé ces cinquante dernières années.....	29
7 : Probabilité de fusion du cœur des réacteurs VVE V-213 de la centrale de Dukovany.....	29
8 : Évolution de la probabilité de fusion du cœur et de la probabilité de rejet radioactif important des réacteurs des générations actuelles (I et II) et des réacteurs de demain (générations III et III+).....	30
9 : Nombre annuel de décès lors d'accidents graves liés à l'activité humaine dans le secteur énergétique (≥ 5 morts).....	35
10 : Comparaison des courbes fréquence-conséquences d'accidents dans des filières énergétiques complètes, établies d'après des statistiques réelles d'accidents graves (≥ 5 morts).....	37
11 : Corrélacion entre la confiance accordée aux autorités de sûreté et la conviction que les centrales nucléaires peuvent être exploitées en toute sécurité.....	44
12 : Relations entre la confiance du public dans les exploitants, les autorités de sûreté et la législation nucléaire.....	45

Liste des tableaux

1 : Principes fondamentaux de sûreté de l'AIEA.....	18
2 : Récapitulatif des accidents graves (≥ 5 morts) survenus dans les filières fossiles, hydraulique et nucléaire (1969 et 2000).....	36

Annexes

I : Sigles et acronymes.....	51
II : Explication des termes techniques.....	53

THÈMES DE RÉFLEXION POUR LES DÉCIDEURS

Ce rapport contient des informations et statistiques dont la finalité est d'aider les décideurs à comprendre comment les risques d'accident sont gérés dans les centrales nucléaires ainsi qu'une analyse des risques relatifs présentés par la filière nucléaire et d'autres filières énergétiques. Les décideurs y trouveront aussi des éclairages sur la perception du public des risques nucléaires. Cet ouvrage n'est pas destiné aux spécialistes de sûreté nucléaire qui possèdent déjà une bonne partie des informations présentées, pas plus qu'il n'est censé explorer de façon exhaustive les principaux éléments de la conception et du fonctionnement des installations nucléaires.

L'un des principaux moyens d'éviter et d'atténuer les conséquences d'accidents consiste à appliquer le concept de défense en profondeur qui prescrit d'employer plusieurs niveaux consécutifs et indépendants de protection pour limiter ou empêcher totalement que l'accident n'ait des effets dangereux sur les populations et l'environnement.

Pour garantir l'intégrité des multiples lignes de défense, une solide culture de sûreté dans les organisations exploitantes est également primordiale. Les données que l'on possède sur les indicateurs de performance et indirectement sur la culture de sûreté révèlent une amélioration régulière au cours des vingt dernières années, quelles que soient les régions du monde et les filières de réacteur.

Les conceptions des réacteurs ont également été modifiées pour abaisser le niveau de risque. Étant donné que les accidents se soldant par un rejet important de radioactivité sont extrêmement rares, les estimations des risques reposent sur des calculs effectués par des techniques probabilistes connues. La probabilité théorique calculée d'un accident grave dans une centrale nucléaire, suivi d'un important rejet de radioactivité, a été divisée par 1 600 entre les premières conceptions de réacteurs de la génération I et des centrales des générations III et III+ construites aujourd'hui. Il importe de noter que la sûreté de la conception d'origine des centrales nucléaires a également été améliorée par des mises à niveau au fil des années.

La comparaison des statistiques d'accidents graves réels (un accident grave provoque le décès immédiat de cinq personnes au moins) avec les probabilités

théoriques calculées d'accidents dans les centrales nucléaires montre que, contrairement à l'opinion répandue, l'énergie nucléaire présente un risque nettement inférieur :

- Plus de 2 500 personnes décèdent chaque année lors d'accidents graves liés à l'exploitation de l'énergie, un triste record qui ne fait que croître avec la hausse de la demande d'énergie.
- Entre 1969 et 2000, on a enregistré 2 259 et 3 713 décès immédiats respectivement dans la filière charbon et la filière pétrole dans les pays membres de l'OCDE et 18 017 et 16 505 décès immédiats dans les pays non membres. Quant à l'hydroélectricité, un accident unique survenu en Chine a fait 29 924 morts. La filière nucléaire, quant à elle, ne compte qu'un accident grave au cours de la période considérée (Tchernobyl), qui a provoqué la mort immédiate de 31 personnes.

L'évaluation des décès tardifs résultant de l'exposition à des substances radioactives rejetées lors de l'accident de Tchernobyl donne des statistiques pouvant atteindre 33 000 décès au cours des 70 prochaines années si l'on adopte l'hypothèse linéaire sans seuil (ce qui signifie qu'à la moindre quantité de rayonnement correspond un risque, même très faible). Sur cette base, on peut calculer que la mortalité due à la radioactivité naturelle est 1 500 fois supérieure sur la même échelle de temps (environ 50 millions de décès) de sorte que d'éventuels décès supplémentaires seraient très difficiles à observer.

Toute comparaison des décès tardifs doit inclure le nombre de morts résultant de l'exposition aux produits rejetés lors de la combustion de combustibles fossiles. Bien qu'il soit difficile de trouver ce type de statistiques, la Direction de l'environnement de l'OCDE estime que les quantités de particules dans l'atmosphère ont provoqué 960 000 décès prématurés au cours de la seule année 2000 et l'on sait que l'énergie est à l'origine de 30 % de ces particules. La mortalité tardive imputable aux combustibles fossiles dépasse donc de loin la mortalité résultant de tous les accidents survenant dans les filières énergétiques, y compris Tchernobyl.

Bien que l'exploitant en soit responsable au premier chef, l'excellent palmarès de l'énergie nucléaire est, en partie, le résultat des efforts des autorités de sûreté nucléaire pour imposer, au fil des ans, des normes de conception et d'exploitation exigeantes. Les sondages d'opinion montrent également que la confiance dans les autorités de sûreté et la réglementation est corrélée à la conviction que les centrales nucléaires peuvent être exploitées en toute sécurité. Il importe donc que les pouvoirs publics veillent à ce que les autorités de sûreté disposent des moyens et compétences dont elles ont besoin pour continuer d'imposer ces normes exigeantes.

SYNTHÈSE

Nombreux sont les pays qui envisagent d'intégrer l'énergie nucléaire à leur parc énergétique pour résoudre les problèmes que posent le changement climatique, la sécurité d'approvisionnement énergétique, les prix des combustibles fossiles et leur volatilité. L'énergie nucléaire cependant reste une technologie discutée pour certains cercles politiques et dans l'esprit d'une bonne partie du public.

La sûreté des centrales nucléaires est l'un des motifs de préoccupation. Pourtant, le choix d'une source d'énergie, s'il se veut rationnel, doit reposer sur les comparaisons impartiales des risques liés aux diverses possibilités. Il ne sert à rien de rejeter une source d'énergie si celle qui la remplace présente des dangers plus importants. Ce document a pour objectif de fournir aux décideurs des informations et statistiques de qualité qui leur permettent de comprendre comment les risques d'accidents sont gérés dans les centrales nucléaires. Il se veut également une analyse rationnelle des risques relatifs des principales technologies de production d'électricité.

Le rapport commence par une description d'un élément majeur de la philosophie de la conception des réacteurs nucléaires, le concept de défense en profondeur. Ce concept est mis en œuvre en combinant des niveaux consécutifs et indépendants de protection qui doivent être défaillants pour que le public et l'environnement ressentent des effets négatifs d'un incident. Si l'un des niveaux de protection ou l'une des barrières devait tomber, le niveau ou la barrière suivante pourrait toujours assurer la protection voulue.

L'importante question de la culture de sûreté mise en place pour maintenir les niveaux de risque au plus bas dans les organisations exploitantes est ensuite évoquée. La qualité de la culture de sûreté d'un exploitant ne peut être mesurée directement. La communauté internationale a donc mis au point des indicateurs que l'on enregistre et compare pour en dégager des évolutions des performances dans les centrales nucléaires. Le présent rapport contient des statistiques relatives à des indicateurs tels que le nombre d'arrêts automatiques de réacteurs, l'exposition collective et individuelle des travailleurs aux rayonnements. Ces données révèlent des tendances très positives de tous ces indicateurs au cours

des vingt dernières années, quelles que soient les régions du monde et les filières de réacteurs.

Un rejet dans l'environnement provoquant l'exposition à des substances radioactives, avec des effets sanitaires sur les populations, tel est le risque que présente l'exploitation d'une centrale nucléaire. Or, comme il est extrêmement rare que se produisent d'importants rejets de radioactivité, les statistiques relatives à ces événements n'existent pas. Le rapport emploie la technique d'analyse de l'étude probabiliste de la sûreté (EPS) qui permet de mesurer la probabilité d'occurrence et les conséquences d'accidents potentiels. Il est courant de mesurer les effets de ces accidents en termes de probabilités théoriques de fusion du cœur (un accident provoquant une rupture de la gaine du combustible par surchauffe et fusion, par exemple) et d'événements plus graves au cours desquels d'importantes quantités de radioactivité s'échappent du circuit primaire et de l'enceinte secondaire et sont libérées dans l'environnement. Ces deux mesures sont ce que l'on appelle la probabilité théorique de fusion du cœur et la probabilité théorique de rejet important de radioactivité. Il ne s'agit pas de statistiques réelles, mais d'évaluations qui permettent d'illustrer des tendances.

Le rapport s'intéresse aux probabilités de fusion du cœur et de rejet radioactif important de réacteurs « tels que conçus » sur toute l'évolution des conceptions, des générations I puis II de réacteurs jusqu'aux générations III et III+. Il montre que, tout au long de cette évolution, ces deux probabilités ont très nettement diminué. Bien que ce résultat démontre que les filières modernes sont extrêmement sûres, il faut savoir que l'on a aussi modernisé les filières les plus anciennes pour y introduire des améliorations de la sûreté, évaluées souvent par les techniques des EPS. Si le monde doit adopter à grande échelle l'énergie nucléaire pour résoudre les problèmes énergétiques auxquels il est confronté, il faut espérer que cette évolution des probabilités de fusion du cœur et de rejet important de radioactivité se poursuivra, et c'est d'ailleurs ce qui devrait se passer.

Le rapport examine ensuite les données sur les accidents réels survenus dans des filières énergétiques complètes qui ont été tirées d'une quantité impressionnante de statistiques recueillies par l'Institut Paul Scherrer (IPS) en Suisse. Ces données sur les accidents graves (événements ayant causé la mort immédiate de cinq personnes au moins, survenus à partir de 1969) servent ensuite à des comparaisons avec les effets d'accidents théoriques calculés par les études probabilistes de sûreté. En effet, les pays de l'OCDE ne possèdent aucune statistique réelle sur les accidents nucléaires, et les pays non membres de l'OCDE, une seule source. Cet exercice montre que, contrairement à ce que

pensaient bon nombre de personnes, l'électronucléaire présente un risque très faible par rapport aux énergies fossiles.

Le nombre de décès tardifs (décès survenant longtemps après l'exposition à des substances radioactives) imputables à l'accident de Tchernobyl est également étudié. Il est analogue au nombre de morts immédiates dues au plus grave accident hydraulique qui se soit produit dans des pays non membres de l'OCDE. Il est également considérablement inférieur au nombre de décès tardifs résultant de l'exploitation des énergies fossiles bien qu'il soit difficile de trouver des données concernant ces décès.

Enfin, le rapport aborde la question de la confiance qu'inspire le système législatif et réglementaire. Outre le travail rigoureux de l'industrie, le faible niveau de risque de l'énergie nucléaire doit beaucoup aux efforts accomplis par les autorités de sûreté au fil des années et de la rigueur des normes qu'elles ont prescrites pour la conception et l'exploitation. La contribution des autorités de sûreté à l'instauration de la confiance est analysée d'après les réponses à des sondages d'opinion. Pour le public, la conviction que les réacteurs nucléaires peuvent être exploités en toute sécurité semble, en effet, aller de pair avec la confiance qu'il accorde aux autorités de sûreté. Or il existe une forte corrélation entre la confiance dans les autorités de sûreté et celle dont jouissent les exploitants. Les pays qui exploitent l'énergie nucléaire sont également ceux où le public est le plus confiant.

1. INTRODUCTION

Ce rapport contient des informations et statistiques dont la finalité est d'aider les décideurs à comprendre comment les risques d'accident sont gérés dans les centrales nucléaires et présente une analyse rationnelle de la sûreté relative de diverses filières énergétiques. Il ne s'adresse pas aux spécialistes de la sûreté nucléaire bien que ces derniers puissent y trouver quelque intérêt. Ces derniers pourront se reporter aux travaux approfondis du Comité de l'AEN sur les activités nucléaires réglementaires (CANR) et du Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN), consultables sur le site web de l'AEN.

La sûreté nucléaire ne connaît pas de frontière : un événement grave dans un pays peut avoir des répercussions importantes chez ses voisins. Dans les années 70, l'énergie nucléaire était en plein essor. L'accident survenu à la centrale de Tchernobyl en 1986, qui frappé directement les populations locales et les pays voisins, a brisé le développement de l'électronucléaire dans le monde. Assurément, tout nouvel accident grave aurait des conséquences identiques. La majorité des conceptions de centrales nucléaires étaient équipées d'une enceinte de confinement, mais depuis les générations III et III+ de centrales, les réacteurs sont conçus de telle manière que les conséquences d'une fusion du cœur ne puissent se propager au-delà du bâtiment réacteur si bien que la probabilité de rejet important de radioactivité y est très réduite. Toutefois, cet événement aurait néanmoins des répercussions économiques considérables et pèserait lourdement sur les futures décisions d'investissement.

Malgré la capacité de l'énergie nucléaire d'apporter une réponse à l'insécurité énergétique et au dérèglement climatique, un sondage réalisé pour la Commission européenne montre que plus de la moitié des Européens sont d'avis que cette énergie présente plus de risques que d'avantages. La sensibilité exacerbée des médias et du public à l'énergie nucléaire démontre qu'un événement qui, dans la réalité, n'a que peu d'importance pour la sûreté peut avoir des effets disproportionnés sur l'industrie internationale. Les normes de sûreté doivent être irréprochables même si, comme le montre cette étude, l'inquiétude que le public manifeste quant à la sûreté de l'énergie nucléaire par rapport à d'autres modes de production d'électricité est démentie par les statistiques.

La sûreté nucléaire a pour finalité de protéger les populations et l'environnement contre les risques liés à la radioactivité, en cherchant à parvenir à des niveaux de sûreté maximum dans les centrales nucléaires. On ne transige pas

avec la sûreté. La sûreté est et restera la priorité première de l'industrie nucléaire. Comme nous le verrons dans ce rapport, l'énergie nucléaire, dans les pays de l'OCDE, affiche un palmarès de sûreté impressionnant par rapport aux autres filières énergétiques. Ce résultat est en grande partie dû aux efforts accomplis par les autorités de sûreté au fil des années ainsi qu'aux normes strictes qu'elles ont imposées pour la conception et l'exploitation de ces installations.

La sûreté repose sur un principe fondamental qui veut que la responsabilité première en incombe à la personne ou à l'organisation responsable de l'exploitation des installations ou des activités susceptibles de présenter un risque radioactif. Selon un autre principe, il doit être créé et maintenu un cadre législatif et gouvernemental efficace avec une autorité de sûreté indépendante. La production électronucléaire est donc une activité fortement réglementée. En ce sens, les autorités de sûreté contribuent de manière primordiale au maintien de la sûreté nucléaire.

La sûreté des centrales nucléaires est étudiée sous différents aspects : les conditions normales de fonctionnement ou la fréquence et les conséquences des accidents. La sûreté dans les conditions normales de fonctionnement recouvre les répercussions des rejets de toutes sortes dans l'environnement. Dans les conditions normales de fonctionnement elles sont réduites. Le public et les médias ne s'y intéressent pas beaucoup, et d'ailleurs ces effets ne sont pas le thème du présent rapport. Nous nous concentrerons ici plutôt sur les accidents susceptibles de provoquer des rejets de radioactivité dans l'environnement.

Pour éviter des accidents, une culture de sûreté développée est capitale. C'est pourquoi, après avoir décrit la philosophie de la conception des centrales nucléaires, l'étude commence par présenter les indicateurs de performance employés par la communauté internationale car ils donnent une image d'ensemble de la culture de sûreté. Elle analyse ensuite l'évolution de la probabilité de fusion du cœur et de la probabilité de rejets importants de radioactivité en 50 ans d'exploitation industrielle de l'énergie nucléaire à mesure que les constructeurs ajoutaient des éléments propres à assurer la sûreté dans les nouvelles filières des réacteurs. On notera que ces améliorations, loin de se cantonner aux nouvelles filières, ont été introduites dans les réacteurs antérieurs lors de remises à niveau destinées à en améliorer leur sûreté par rapport à la conception d'origine. Des statistiques sur la fréquence et les conséquences des accidents graves survenus dans les industries énergétiques de la planète (accidents ayant fait plus de cinq morts) sont ensuite étudiées et comparées à des évaluations des risques effectuées pour l'industrie nucléaire. Enfin, l'étude s'intéresse à la contribution capitale de l'autorité de sûreté à la mise en place et à la préservation de la sûreté nucléaire ainsi qu'à la question de la confiance du public.

2. PHILOSOPHIE DE LA SÛRETÉ DES CENTRALES NUCLÉAIRES

Les normes de sûreté imposées aux centrales nucléaires relèvent depuis toujours de la responsabilité de chaque pays. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), avec le coparrainage de huit autres organisations internationales dont l'AEN (AIEA, 2006), a publié des principes fondamentaux de sûreté en 2006. Il est dit dans ce document « L'objectif fondamental de sûreté est de protéger les personnes et l'environnement contre les effets nocifs des rayonnements ionisants ». Le document explique que cet objectif fondamental de sûreté de protection des personnes, individuellement et collectivement, et de l'environnement doit être intégré aux systèmes conçus pour garantir la sûreté d'exploitation des installations ou la sûreté des activités présentant un risque radiologique.

2.1 Principes fondamentaux de sûreté de l'AIEA

La communauté internationale est tombée d'accord sur dix principes de sûreté à partir desquels il faudra élaborer des exigences de sûreté et prendre des mesures pour s'assurer que l'exploitation des installations respecte les niveaux de sûreté les plus élevés que l'on puisse raisonnablement atteindre. Ces principes internationaux intègrent avec force la philosophie de la sûreté des centrales nucléaires adoptée à l'échelle mondiale. Ils sont repris dans le tableau 1.

Le présent document s'intéresse principalement aux accidents graves qui relèvent du principe fondamental de sûreté n° 8. L'application du concept de défense en profondeur est le principal moyen d'éviter les accidents et d'en atténuer les conséquences.

Tableau 1 : Principes fondamentaux de sûreté de l'AIEA

Principe 1 : <i>Responsabilité en matière de sûreté</i>	La responsabilité première en matière de sûreté doit incomber à la personne ou à l'organisme responsable des installations et activités entraînant des risques radiologiques.
Principe 2 : <i>Rôle du gouvernement</i>	Un cadre juridique et gouvernemental efficace pour la sûreté, y compris un organisme de réglementation indépendant, doit être établi et maintenu.
Principe 3 : <i>Capacité de direction et de gestion pour la sûreté</i>	Une capacité de direction et de gestion efficace de la sûreté doit être mise en place et maintenue dans les organismes qui s'occupent des risques radiologiques et les installations et activités qui entraînent de tels risques.
Principe 4 : <i>Justification des installations et activités</i>	Les installations et activités qui entraînent des risques radiologiques doivent être globalement utiles.
Principe 5 : <i>Optimisation de la protection</i>	La protection doit être optimisée de façon à apporter le plus haut niveau de sûreté que l'on puisse raisonnablement atteindre.
Principe 6 : <i>Limitation des risques pour les personnes</i>	Les mesures de contrôle des risques radiologiques doivent protéger contre tout risque de dommage inacceptable.
Principe 7 : <i>Protection des générations actuelles et futures</i>	Les générations et l'environnement actuels et futurs doivent être protégés contre les risques radiologiques.
Principe 8 : <i>Prévention des accidents</i>	Tout doit être concrètement mis en œuvre pour prévenir les accidents nucléaires ou radiologiques et en atténuer les conséquences.
Principe 9 : <i>Préparation et conduite des interventions d'urgence</i>	Des dispositions doivent être prises pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence en cas d'incidents nucléaires ou radiologiques.
Principe 10 : <i>Actions protectrices visant à réduire les risques radiologiques existants ou non réglementés</i>	Les actions protectrices visant à réduire les risques radiologiques existants ou non réglementés doivent être justifiées et optimisées.

Source : AIEA (2006).

2.2 Défense en profondeur

Les objectifs de la défense en profondeur sont les suivants (AIEA, 1996) :

- compenser les défaillances humaines et techniques éventuelles ;
- maintenir l'efficacité des barrières en empêchant tout dommage à la centrale et aux barrières elles-mêmes ;
- protéger des dommages la population et l'environnement au cas où ces barrières ne seraient pas pleinement efficaces.

La mise en œuvre du principe de défense en profondeur allie plusieurs niveaux consécutifs et indépendants de protection qui doivent tous être défaillants pour que les populations ou l'environnement soient exposés aux effets dangereux d'un incident. Si un niveau de protection ou une barrière tombe, le niveau ou la barrière suivant doit pouvoir jouer son rôle. Ce principe de défense en profondeur garantit qu'aucune défaillance technique, humaine ou organisationnelle ne peut avoir, à elle seule, des effets nocifs et que la combinaison de défaillances susceptibles de produire des effets nocifs importants est très peu probable. L'efficacité des différents niveaux de défense, pris individuellement, est une donnée fondamentale de la défense en profondeur. Elle repose sur la redondance et de la diversité, qui supposent, par exemple, qu'il y ait toujours différentes manières de mesurer un paramètre essentiel comme la température du combustible. Si un capteur ou un ensemble de câbles tombaient en panne, d'autres prendraient la relève. Si l'alimentation électrique d'un système vital tombe en panne, il y aura toujours encore diverses sources d'électricité de remplacement. La centrale ne peut pas fonctionner tant qu'un nombre minimum de systèmes différents n'est pas en état de marche. La figure 1 est une illustration du concept.

Les principales lignes de défense pour éviter les accidents sont une sélection judicieuse du site et la recherche de la qualité dans la conception, la construction et l'exploitation de la centrale pour que la défaillance, c'est-à-dire l'écart par rapport au fonctionnement normal, devienne rare. Les systèmes sont conçus pour faire face aux événements susceptibles de survenir à la suite de défaillances matérielles et humaines.

La ligne de défense suivante consiste à prévoir des systèmes de contrôle et de protection ainsi que d'autres dispositifs de surveillance conçus pour détecter les défaillances et gérer tout dysfonctionnement avant qu'il n'ait des conséquences importantes.

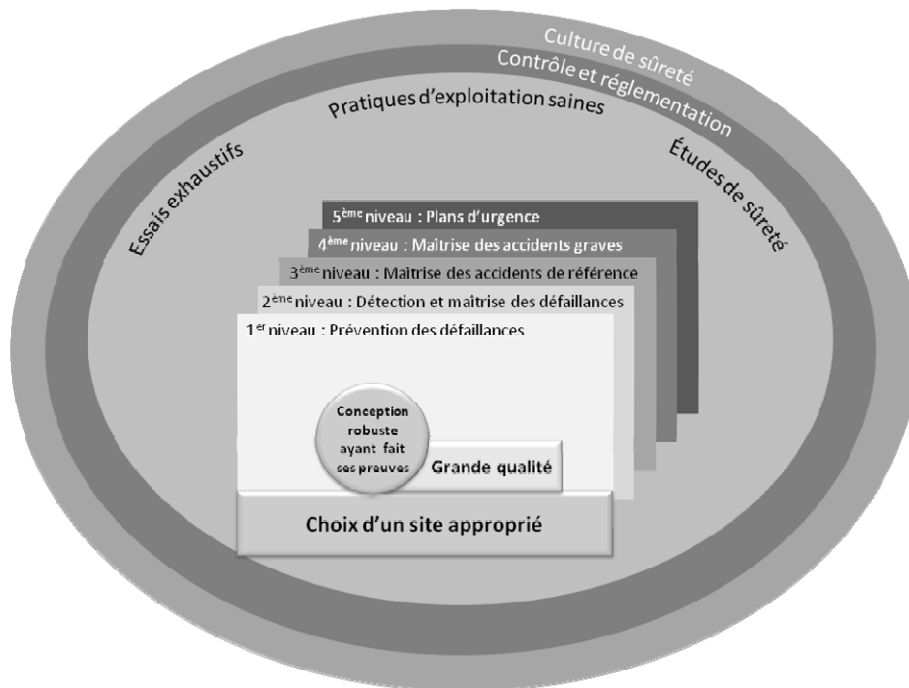
La sûreté des réacteurs repose sur le concept des accidents de référence. La centrale et son infrastructure intègrent des systèmes de sauvegarde et des procédures de conduite qui permettent de faire face à ces événements et assurent une troisième ligne de défense. L'efficacité et la fiabilité des systèmes de sauvegarde en présence de ces accidents ont été démontrées par une étude de sûreté. Les systèmes de sauvegarde sont conçus essentiellement afin d'éviter la fusion du cœur et de préserver la fonction de rétention de l'enceinte de confinement pour empêcher tout rejet incontrôlé de substances radioactives de l'environnement.

La quatrième ligne de défense, pour l'éventualité d'un accident plus grave que l'accident de référence, est assurée principalement par l'enceinte de

confinement du réacteur. L'accident de Three Mile Island, au cours duquel le combustible a fondu, n'a pas rejeté de quantités significatives de radioactivité dans l'environnement parce que l'enceinte est restée intacte. En revanche, la centrale de Tchernobyl ne possédait pas d'enceinte comme la plupart des conceptions de centrales et c'est pourquoi de grandes quantités de radioactivité ont été libérées dans l'environnement après la fusion du cœur.

La cinquième et dernière ligne de défense, qui est destinée à limiter les conséquences radiologiques d'importants rejets de substances radioactives hors de l'enceinte, est le plan d'urgence hors site. Il consiste notamment à recueillir et à évaluer des informations sur les niveaux d'exposition qui pourraient être atteints après un accident et sur les mesures de protection qu'il faut prendre à court et à long terme.

Figure 1 : Concept de défense en profondeur



Source : AIEA (1996).

Au moment de la conception des réacteurs, on met en place des barrières physiques successives pour confiner les substances radioactives. Dans le cas des REO, les barrières qui servent à confiner la radioactivité sont normalement :

- la matrice de combustible fritté ;
- la gaine du combustible ;
- l'enveloppe du circuit primaire ;
- l'enceinte de confinement.

A ces lignes de défense, il faut ajouter un système de gestion fondé sur un souci constant de la sûreté, une solide culture de sûreté, des contrôles et une réglementation efficaces, des pratiques d'exploitation saines, des programmes complets d'essais et des études de sûreté. Une culture de sûreté solide est essentielle à la préservation de l'intégrité des multiples barrières qui constituent le système de défense en profondeur tout entier. En matière de sûreté, les valeurs, normes et attitudes de l'organisation exploitante sont tout aussi importantes que la conception et la construction de la centrale nucléaire.

Références

AIEA (2006), *Principes fondamentaux de sûreté – Fondements de sûreté* n° SF-1, AIEA, Vienne, Autriche.

AIEA (1996), *La défense en profondeur en sûreté nucléaire*, INSAG-10, AIEA, Vienne, Autriche.

3. ÉVOLUTION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE

La protection du public, des travailleurs et de l'environnement contre les rayonnements ionisants est l'objectif premier des exploitants et des autorités de sûreté, et cela depuis l'origine de l'industrie nucléaire civile. On peut juger des améliorations des performances globales des installations nucléaires à l'aide d'indicateurs tels que le nombre d'arrêts automatiques du réacteur et l'exposition des travailleurs aux rayonnements. Toutes les entreprises d'électricité du monde mesurent ces indicateurs, entre autres, et en rendent compte régulièrement aux autorités de sûreté mais aussi à des groupes d'experts de l'industrie tels que l'Association mondiale des exploitants de centrales nucléaires (WANO). Ces indicateurs sont en progrès constant. Ce chapitre décrit, à titre d'exemple, l'évolution de la fréquence des arrêts automatiques du réacteur et de l'exposition des travailleurs.

3.1 Nombre d'arrêts automatiques de réacteur

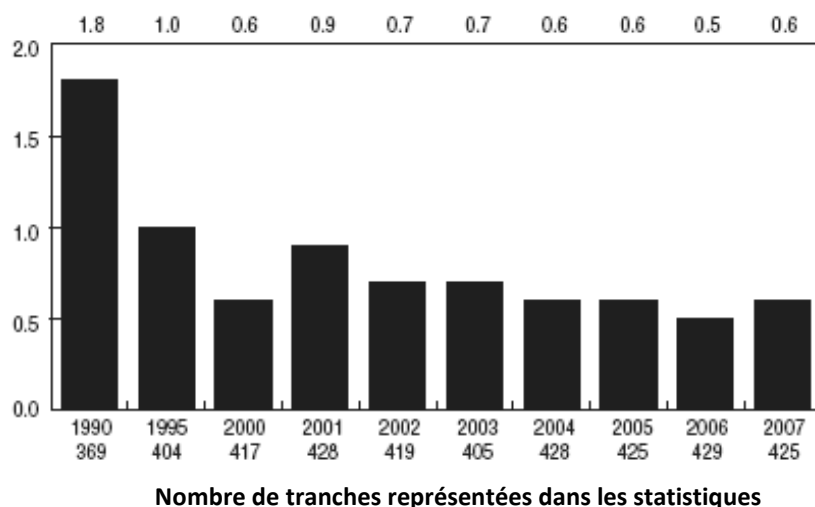
Le nombre d'arrêts automatiques de réacteur (AAR) est un des indicateurs généraux de la culture de sûreté. L'arrêt automatique d'un réacteur est déclenché par l'un des systèmes de sûreté et non par les opérateurs. Le nombre d'arrêts est établi pour 7 000 heures (approximativement une année d'exploitation).

Une réduction du nombre d'arrêts automatiques de réacteur est une indication globale d'une amélioration de la sûreté des centrales. Moins d'arrêts signifie moins de transitoires thermiques et hydrauliques indésirables et imprévus. Ce paramètre est également un indicateur de la qualité de la maintenance et de la conduite de la centrale. On s'aperçoit, en effet, que les centrales qui enregistrent le moins d'arrêts sont également celles où les programmes d'exploitation, d'ingénierie, de maintenance et de formation sont les plus efficaces et que ce bon résultat révèle une attention de la direction à une multitude d'aspects divers qui ont tous un impact sur la sûreté.

La figure 2 présente les statistiques relatives au nombre d'arrêts automatiques de réacteurs réunies par la WANO (WANO, 2008). Elle montre bien que

cet indicateur s'est amélioré année après année. En 2007, les données présentées sur la figure correspondent à 425 réacteurs sur les 439 qui étaient exploités à l'époque. À 0.6 pour 7 000 heures d'exploitation, la moyenne mondiale du nombre d'AAR a été divisée par trois en 2007 par rapport à 1990.

Figure 2 : Nombre moyen d'arrêts automatiques de réacteurs dans le monde pour 7 000 heures d'exploitation

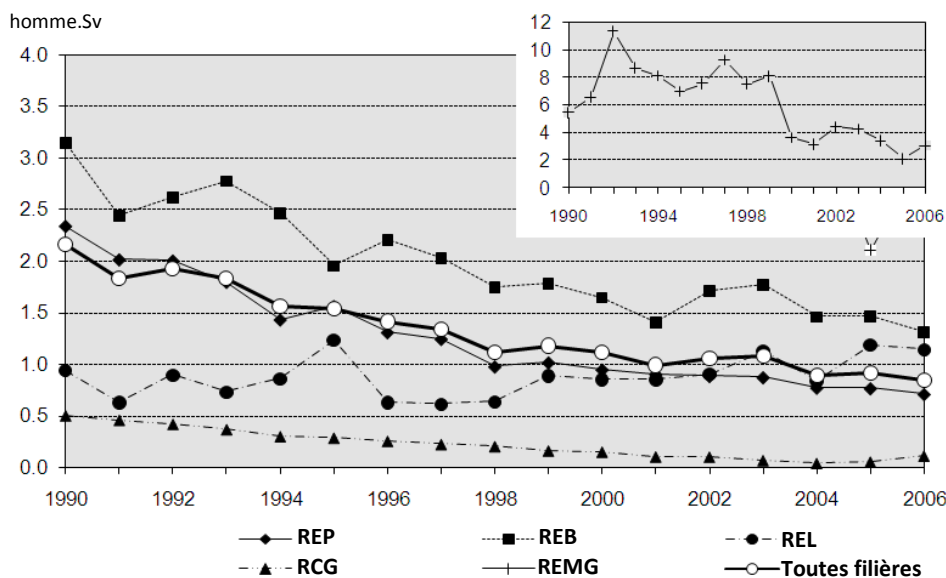


Source : WANO (2008).

3.2 Exposition des travailleurs

Dans l'industrie nucléaire, la radioprotection suit normalement les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Ces recommandations ont été largement adoptées par toutes les autorités nationales et les organisations internationales. Elles reposent sur les dernières découvertes scientifiques en la matière dont le rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) fait la synthèse. Les recommandations de la CIPR servent à évaluer l'exposition aux rayonnements des travailleurs et du grand public.

Figure 3 : Dose collective moyenne correspondant aux réacteurs en service qui font partie du programme ISOE, classée par filière de réacteur (1992-2006)



Source : AEN et AIEA (2007).

Le programme ISOE recueille également des statistiques sur l'exposition des travailleurs aux rayonnements. La figure 3 montre comment cet indicateur a diminué au cours des 17 dernières années. Les statistiques portées sur ce schéma correspondent aux doses collectives annuelles, c'est-à-dire l'exposition totale de tous les membres du personnel travaillant dans un réacteur particulier au cours d'une année donnée. L'exposition aux rayonnements est mesurée en Sieverts (Sv) ; la dose collective est exprimée en homme-Sv par an. Sur la figure 3, on a porté les médianes calculées pour toutes les tranches appartenant à la même filière (la valeur médiane est moins sensible aux statistiques aberrantes et donc, par conséquent, plus représentative des performances globales). Les données concernant les réacteurs modérés au graphite et refroidis à l'eau ordinaire (à savoir les REMG ou RBMK) ont été présentées sur un schéma séparé.

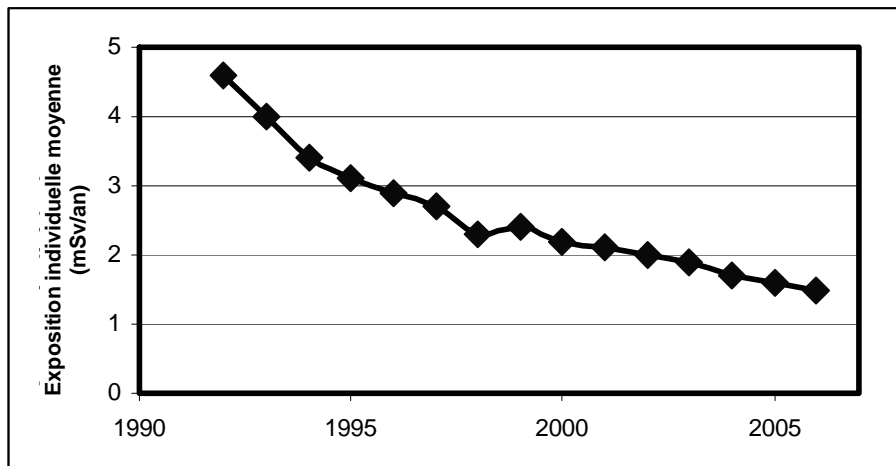
La figure 3 montre que la dose collective moyenne par tranche a été divisée par 2.6 entre 1990 et 2007. En 2007, cette grandeur a été mesurée dans 424 des 439 réacteurs en exploitation dans le monde. Les expositions enregistrées dans la filière de réacteur la plus exploitée, à savoir les REP, n'ont cessé de diminuer au cours de cette période. Le petit schéma encadré dans la

figure 3 fait apparaître des baisses très importantes de l'exposition des travailleurs dans les réacteurs à graphite au cours des dix années qui séparent 1995 de 2005.

De multiples facteurs expliquent ces réductions, mais la mise en œuvre plus efficace de l'optimisation de l'exposition par l'application rigoureuse du principe ALARA (aussi bas qu'il est raisonnablement possible) a joué un rôle primordial.

Cette baisse générale des expositions se vérifie si l'on considère l'exposition professionnelle d'un travailleur moyen. En prenant pour illustration l'industrie électronucléaire française, on montre, dans la figure 4, que l'exposition annuelle moyenne des travailleurs a été divisée par près de trois au cours des 14 années qui séparent 1992 de 2006.

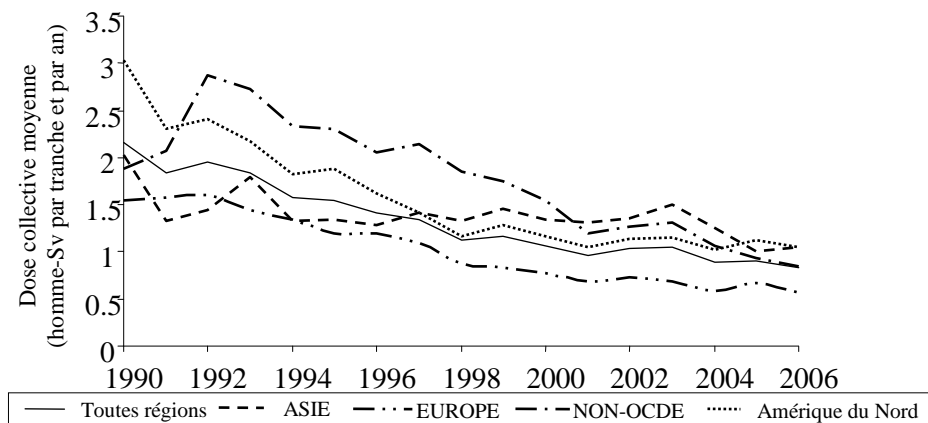
Figure 4 : Baisse de la dose individuelle moyenne dans l'industrie électronucléaire française



Source : EDF (2007).

Traditionnellement, l'exposition collective moyenne dans les pays non membres de l'OCDE était supérieure à celle des régions de l'OCDE, comme le montre la figure 5. Aujourd'hui, on assiste à une convergence des expositions régionales moyennes en raison notamment des expertises assurées par des organisations telles que la WANO, mais aussi d'échanges permanents de retour d'expérience entre les compagnies d'électricité du monde entier sur ce qui concerne en particulier les pratiques recommandables pour les opérations de maintenance et les travaux pendant les arrêts.

Figure 5 : Évolution de la dose collective annuelle moyenne par réacteur dans différentes régions



Source : AEN et AIEA (2007).

Sur les figures 3 à 5, on observe une baisse constante des expositions par réacteur, évolution qui devrait se poursuivre dans les nouvelles centrales qui seront construites avec des réacteurs des générations III et III+. Les doses individuelle et collective enregistrées dans chaque centrale devraient en effet diminuer encore avec la mise en service de réacteurs intégrant des améliorations de la sûreté d'autant que les exploitants continueront de perfectionner leurs techniques de gestion de la sûreté. La réduction, à l'échelle mondiale, de l'exposition des travailleurs et du nombre d'arrêts automatiques de réacteur dénote une culture de sûreté en progression régulière dans l'industrie électro-nucléaire. Or cette amélioration peut s'observer dans toutes les régions du monde et toutes les filières de réacteurs.

Références

EDF (2007), Exposé de Laurent Stricker à la session d'octobre 2007 du Comité de direction de l'AEN.

AEN et AIEA (2007), *Occupational Exposures at Nuclear Power Plant – Seventeenth Annual Report of the ISOE Programme, 2007*, publication commune de l'AIEA et de l'OCDE/AEN, Paris, France.

WANO (2008), *2007 Performance Indicators*, World Association of Nuclear Operators (Association mondiale des exploitants de centrales nucléaires), Londres, Royaume-Uni, www.wano.org.uk/PerformanceIndicators/PI_TriFold/PI_2007_TriFold.pdf

4. ÉVOLUTION DES PRÉVISIONS DU RISQUE D'ACCIDENT GRAVE

La réduction, au fil du temps, de la probabilité de fusion du cœur des réacteurs, par rapport à leur conception d'origine, apporte une nouvelle preuve de l'amélioration du niveau de sûreté des réacteurs du monde entier. Les risques que présentent les centrales nucléaires sont analysés par des techniques quantitatives.

4.1 Étude probabiliste de sûreté

L'étude probabiliste de sûreté (EPS) est une technique systématique et exhaustive employée pour évaluer les risques liés à des systèmes complexes tels que des centrales nucléaires. Elle est également utilisée dans d'autres industries fondées sur des technologies complexes, dont l'industrie chimique, l'aviation civile et la construction aérienne. L'EPS a été pour la première fois appliquée dans l'industrie nucléaire en 1975 avec la réalisation d'une étude intitulée le WASH 1400 – *Reactor Safety Study* (connue également sous le nom de Rapport Rasmussen du nom du professeur Norman Rasmussen qui présidait le comité de spécialistes à l'origine de ce rapport rédigé pour la NRC aux États-Unis en 1975). Cette étude évaluait la probabilité de séquences accidentelles susceptibles d'entraîner la fusion du combustible du réacteur (fusion du cœur).

L'EPS est employée au moment de la conception et de l'exploitation des centrales nucléaires pour identifier et analyser des pannes et séquences d'événements susceptibles d'entraîner un endommagement grave (fusion) du cœur. L'EPS s'intéresse à trois questions :

1. Quelles sont les pannes ou séquences d'événements susceptibles de conduire à la fusion du cœur ?
2. Quelles sont les conséquences d'une fusion du cœur et d'un rejet potentiel de radioactivité ?
3. Quelle est la probabilité de ces événements ?

L'EPS calcule la probabilité et les conséquences des pannes envisageables ainsi que le risque correspondant à chacune d'elles. L'analyse des pannes

potentielles des systèmes inclut une évaluation de la fiabilité humaine et des modes de défaillance communs (c'est-à-dire des effets susceptibles de provoquer des défaillances simultanées de plusieurs systèmes). L'EPS s'intéresse tant aux agressions internes qu'aux agressions externes. Les agressions internes recouvrent des défaillances des composants et des erreurs humaines, les agressions externes incluent les risques naturels tels que les séismes et des événements liés à l'activité humaine comme une chute d'avion.

Les résultats d'une EPS peuvent s'exprimer de plusieurs manières, en probabilité de fusion du cœur (PFC) et probabilité de rejet radioactif important (PRRI) notamment. La probabilité de fusion du cœur combine les probabilités d'événements naturels ou liés à l'activité humaine susceptibles de menacer la centrale et, suivant la façon dont le réacteur en question est conçu et exploité, la probabilité que ces événements provoquent un endommagement du combustible du réacteur. La probabilité de rejet radioactif important est une estimation de la probabilité que ces accidents entraînent un rejet important non maîtrisé de radioactivité dans l'environnement. Elle donne une idée du risque potentiel que présente, pour l'environnement et les populations, un accident dans un réacteur nucléaire. La probabilité de fusion du cœur et la fréquence de rejet important se calculent pour une centrale particulière.

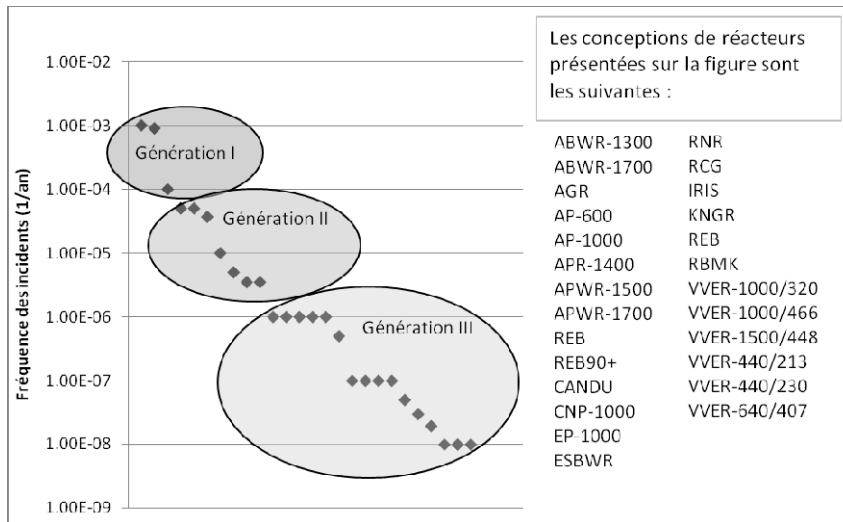
Les EPS peuvent identifier les points forts et les points faibles de la sûreté d'une centrale nucléaire. Au cours de plusieurs décennies, elles ont été utilisées afin de définir les priorités et de concentrer les efforts sur les aspects les plus importants pour améliorer la sûreté des nouvelles conceptions de réacteurs. Elles ont permis également d'identifier des améliorations intéressantes à apporter aux réacteurs de conception plus ancienne.

4.2 Baisse de la probabilité de fusion du cœur et de la probabilité de rejet radioactif important

La figure 6 illustre la baisse de la probabilité de rejet radioactif important au cours des dernières décennies. Elle a été établie d'après les statistiques recueillies sur 26 conceptions de réacteurs employées de par le monde qui vont des premiers réacteurs de la première génération jusqu'aux derniers réacteurs des générations III et III+. Il importe de noter que ces données ne concernent que la conception d'origine des réacteurs en question. Les améliorations introduites au fil des années ont contribué à rehausser nettement leur palmarès de sûreté ; c'est le cas de la centrale de Dukovany (voir figure 7). Les centrales des générations III et III+ qui ont été conçues en fonction des enseignements tirés de Three Mile Island et de Tchernobyl et des exigences réglementaires qui ont suivi, ont une probabilité de rejet radioactif important nettement inférieure aux centrales qui les ont précédées (si l'on se réfère toujours à la conception

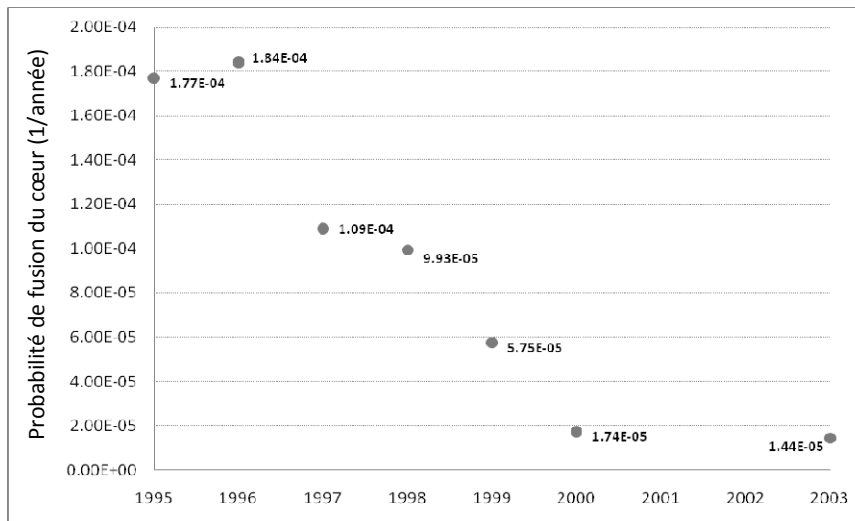
d'origine). La concurrence sur les marchés a également joué un rôle car les entreprises d'électricité ont exigé des niveaux de sûreté plus élevés, en même temps qu'un rendement et une fiabilité supérieurs, de façon à pouvoir être concurrentielles tout en respectant les normes de sûreté de la société dans laquelle elles opèrent.

Figure 6 : Baisse de la probabilité de rejet radioactif important des générations de réacteurs qui se sont succédé ces cinquante dernières années



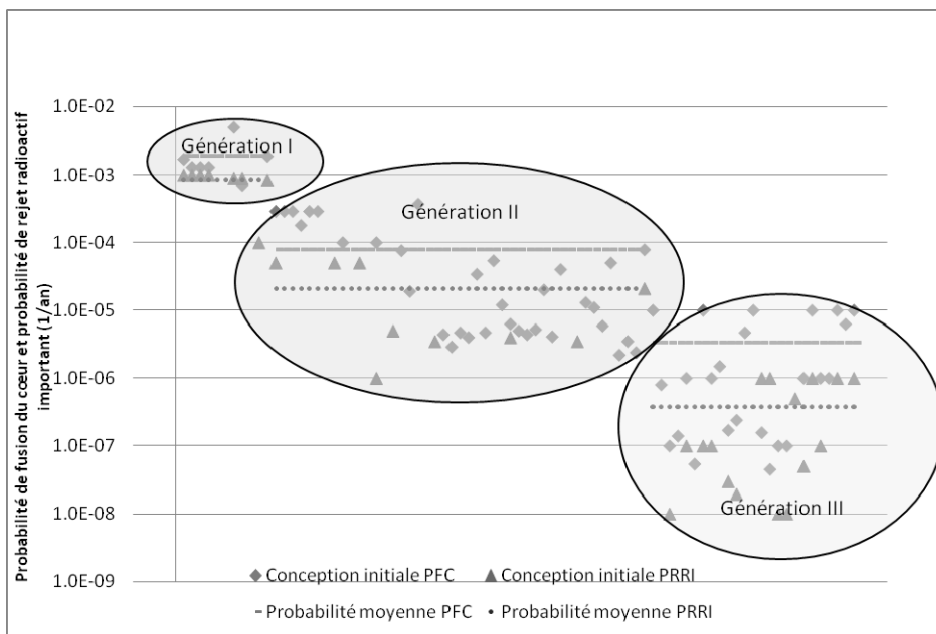
Source : AIEA (2004).

Figure 7 : Probabilité de fusion du cœur des réacteurs VVE V-213 de la centrale de Dukovany



La figure 8 montre l'évolution de la probabilité de fusion du cœur et de la probabilité de rejet radioactif important des réacteurs sur lesquels on possède des données publiées. Les regroupements ont été effectués en fonction de la génération de réacteurs seulement. Leur position sur l'abscisse ne correspond pas à des changements précis dans le temps mais à la simple succession des générations.

Figure 8 : Évolution de la probabilité de fusion du cœur et de la probabilité de rejet radioactif important des réacteurs des générations actuelles (I et II) et des réacteurs de demain (générations III et III+)



Source : AIEA (2004).

L'EPS est un outil puissant d'évaluation des progrès de la sûreté dans une centrale donnée. Toutefois, il est difficile de comparer différentes tranches car la configuration des installations varie, de même que les événements initiateurs pris en compte dans l'étude et la précision et l'exhaustivité des données de fiabilité utilisées dans les calculs. C'est pourquoi les probabilités présentées ci-dessus donnent une idée générale de l'évolution de la sûreté avec les conceptions de réacteurs, mais ne doivent pas être employées pour comparer des conceptions de réacteurs appartenant à la même génération.

Les données présentées ici sont directement consultables sur Internet et montrent que les prévisions de la probabilité d'un rejet radioactif important lors

d'un accident grave dans un réacteur nucléaire ont diminué d'un facteur de 1 600 entre les réacteurs de la première génération et les centrales des générations III et III+ que l'on construit aujourd'hui.

Outre l'amélioration de la sûreté des réacteurs en service que révèle la baisse de la probabilité de fusion du cœur, on constate que les valeurs de la probabilité de rejet radioactif important tombent plus vite que celles de la probabilité de fusion du cœur comme le montre la figure 8. Au début des années 60, un accident provoquant un endommagement du cœur aurait provoqué un important rejet de radioactivité. Or, les améliorations techniques apportées au combustible, au circuit primaire et à l'enceinte de confinement permettent de mieux maîtriser les conséquences de cet accident de sorte que la probabilité de rejet dans l'environnement est environ dix fois moins importante que celle de la fusion du cœur. Depuis le début des années 90, le risque de fusion du cœur des réacteurs de deuxième génération a été abaissé de manière efficace grâce à des améliorations de la sûreté. L'expérience acquise et les leçons tirées de l'évaluation de la conception des réacteurs des générations I et II ont permis d'intégrer directement à la conception des réacteurs des générations III et III+ les améliorations de la sûreté.

L'évolution de ces deux probabilités témoigne de la capacité des exploitants nucléaires d'évaluer et de mettre en œuvre des améliorations de la sûreté en exploitation des centrales nucléaires. Leur diminution dans les nouvelles conceptions de réacteurs peut être considérée comme révélatrice de la volonté de l'industrie de veiller en permanence à ce que la production électronucléaire soit la plus sûre possible.

Référence

AIEA (2004), *Status of advanced light water reactor designs 2004*, IAEA-TECDOC-1391, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche.

5. ANALYSE COMPARÉE DES RISQUES D'ACCIDENT GRAVE DANS LE SECTEUR ÉNERGÉTIQUE

Pour répondre à la demande croissante d'informations des décideurs et des parties prenantes, on a de plus en plus besoin de données statistiques précises indiquant le nombre de catastrophes naturelles et d'accidents liés à l'activité humaine ainsi que les dommages associés.

Bien que ces statistiques sur les accidents et leurs répercussions se soient considérablement améliorées au cours des trente dernières années, il est difficile de comparer des données de sources différentes car les définitions, les méthodes et les procédures de vérification ne sont pas normalisées. Les accidents survenant dans le secteur énergétique constituent le groupe d'accidents liés aux activités humaines le plus important après les transports. Toutefois, les statistiques sur ce secteur étaient loin d'être systématiques et complètes avant que l'Institut Paul Scherrer (IPS) n'entreprenne, au début des années 90, une étude de risques axée sur les accidents dans le secteur énergétique. Toutes les données que nous citerons dans ce chapitre ont été communiquées à l'AEN par l'Institut Paul Scherrer.

Lorsque l'on étudie les accidents et risques propres au secteur énergétique, il est primordial d'étudier des filières énergétiques complètes. En effet, s'agissant des combustibles fossiles, les accidents survenant dans les centrales sont très peu importants par rapport à ceux qui se produisent à d'autres étapes. Des analyses qui se contenteraient de porter sur les centrales sous-estimeraient grossièrement la situation réelle. En général, on inclut dans une filière énergétique les phases de prospection, d'extraction, de transport, d'entreposage, de production de chaleur et/ou d'électricité, de transport, de distribution locale, de traitement et de stockage des déchets même si toutes les filières énergétiques ne comprennent pas l'intégralité de ces étapes. Les accidents graves sont parmi les aspects les plus préoccupants tant pour le public que lors de la définition des politiques énergétiques. C'est pourquoi, ils monopolisent l'attention, quand bien même la somme des accidents mineurs ayant des conséquences bien moindres est plus importante. Il y a diverses manières de définir ce qu'est un accident « grave ». L'Institut Paul Scherrer a choisi de les définir comme étant ceux qui provoquent cinq décès immédiats au minimum. Ce seuil permet également de recueillir des ensembles de données plus fiables puisque les accidents de moindre importance attirent moins l'attention et peuvent passer inaperçus.

L'Institut Paul Scherrer a analysé les accidents graves dans le secteur énergétique entre 1969 et 2000 (voir références 1 à 5) et procède actuellement à l'enrichissement de sa base de données qu'il étend aux accidents survenus jusqu'à la fin de 2005. Les informations qui figurent dans ce chapitre ne concernent, en revanche, que la période 1969-2000. La base de données contient des statistiques sur des accidents réels survenus avec une diversité de sources d'énergie parmi lesquelles les énergies fossiles, hydraulique et nucléaire qui présentent toutes d'importants risques sanitaires, environnementaux ou socio-politiques.

Les résultats ont été présentés séparément pour les pays membres de l'OCDE et non membres qui se différencient par leur développement technologique et les niveaux de sûreté atteints, y compris leur cadre réglementaire et leur culture de sûreté. S'agissant de la Chine, les données sur la filière charbon n'ont été analysées que pour les années 1994-99, période où paraissait l'annuaire statistique de l'industrie charbonnière chinoise.

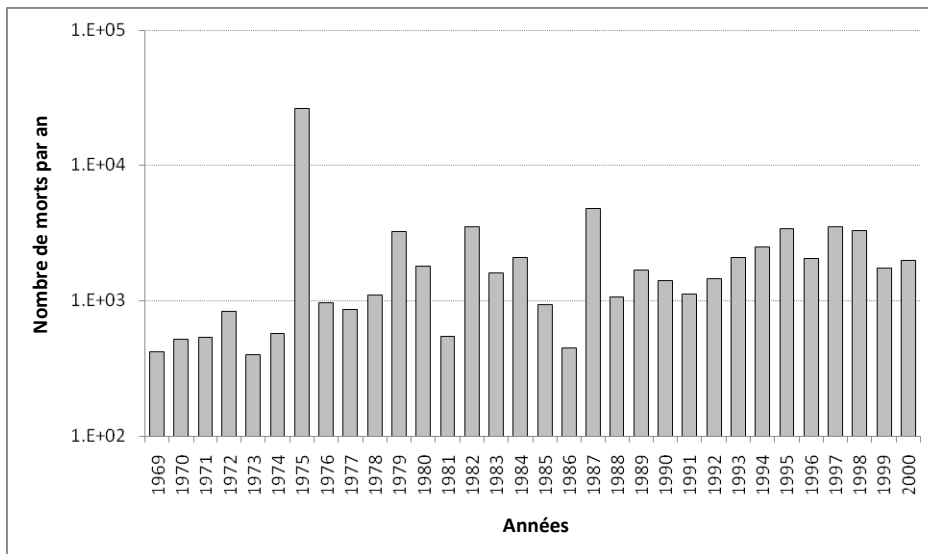
Pour les comparaisons, deux méthodes ont été employées. La première fait appel à des indicateurs qui permettent une comparaison directe des conséquences d'accidents graves entre différentes filières énergétiques et différents groupes de pays. Ces indicateurs sont exprimés en nombre de morts par unité d'énergie produite et présentés sur le tableau 2. Dans une deuxième étape, la comparaison des résultats a été étendue en combinant des analyses de la fréquence et des conséquences pour en tirer des estimations du risque que l'on a présentées sur la figure 9. Dans le cas de l'énergie nucléaire, il a fallu recourir à l'étude probabiliste de sûreté (EPS), car cette industrie n'a connu qu'un seul accident grave, Tchernobyl. Les probabilités et conséquences d'accidents nucléaires hypothétiques ont donc été analysées par les techniques de l'EPS. Les résultats correspondants doivent donc être considérés comme des estimations théoriques.

5.1 Analyse comparée des principales filières énergétiques

La base de données de l'IPS contient aujourd'hui des statistiques portant sur 1 870 accidents survenus dans le secteur énergétique et ayant causé la mort de cinq personnes au moins. La figure 9 illustre le très grand nombre de décès provoqués chaque année par les accidents graves (≥ 5 morts) dans le secteur énergétique entre 1969 et 2000. Au total, cela représente 81 258 décès immédiats, toutes les filières confondues. L'accident le plus grave qui se soit produit est la rupture du barrage de Banqiao/Shimantan, en Chine, en 1975 et qui a coûté la vie à 30 000 personnes. Si l'on s'en tient aux filières fossiles, le charbon a provoqué le plus grand nombre de décès, suivi par le pétrole, le GPL et le gaz naturel. Le tableau 2 est une synthèse des accidents graves (≥ 5 morts)

survenus dans les filières fossiles, hydraulique et nucléaire entre 1969 et 2000. Les chiffres varient considérablement d'une filière à l'autre. On compte par exemple, 1 221 accidents graves ayant provoqué la mort d'au moins 5 personnes dans la filière charbon contre 1 dans la filière nucléaire (Tchernobyl).

Figure 9 : Nombre annuel de décès lors d'accidents graves liés à l'activité humaine dans le secteur énergétique (≥ 5 morts)



Source : données communiquées à l'AEN par l'IPS.

Les pays de l'OCDE comptabilisent un nombre de morts par unité d'énergie produite nettement inférieur à celui des pays non membres de l'OCDE, quelles que soient les filières énergétiques. S'agissant des filières fossiles, c'est le GPL qui a provoqué le plus grand nombre de morts, suivi par le pétrole et le charbon. Le gaz naturel obtient les meilleurs résultats. Les centrales nucléaires et hydrauliques des pays membres de l'OCDE comptent le moins de morts, tandis que, dans les pays non membres de l'OCDE, les statistiques suggèrent que les ruptures de barrages présentent un risque nettement supérieur. Le tableau 2 montre également qu'il convient de traiter séparément la filière charbon en Chine, car la mortalité par accident y est dix fois supérieure à celles d'autres pays non membres de l'OCDE et environ 40 fois supérieure à celle des pays membres de l'OCDE.

Tableau 2 : Récapitulatif des accidents graves (≥ 5 morts) survenus dans les filières fossiles, hydraulique et nucléaire (1969 et 2000)

Filière énergétique	Pays membres de l'OCDE			Pays non membres de l'OCDE		
	Accidents	Nombre de morts	Nbre de morts/ GWe/an	Accidents	Nombre de morts	Nbre de morts/ GWe/an
charbon	75	2 259	0.157	1 044	18 017	0.597
charbon (statistiques chinoises de 1994 à 1999)				819	11 334	6.169
charbon (sans la Chine)				102	4831	0.597
pétrole	165	3 713	0.132	232	16 505	0.897
gaz naturel	90	1 043	0.085	45	1 000	0.111
GPL	59	1 905	1.957	46	2 016	14.896
hydraulique	1	14	0.003	10	29 924	10.285
nucléaire	0	0	–	1	31*	0.048
Total	390	8 934		1 480	72 324	

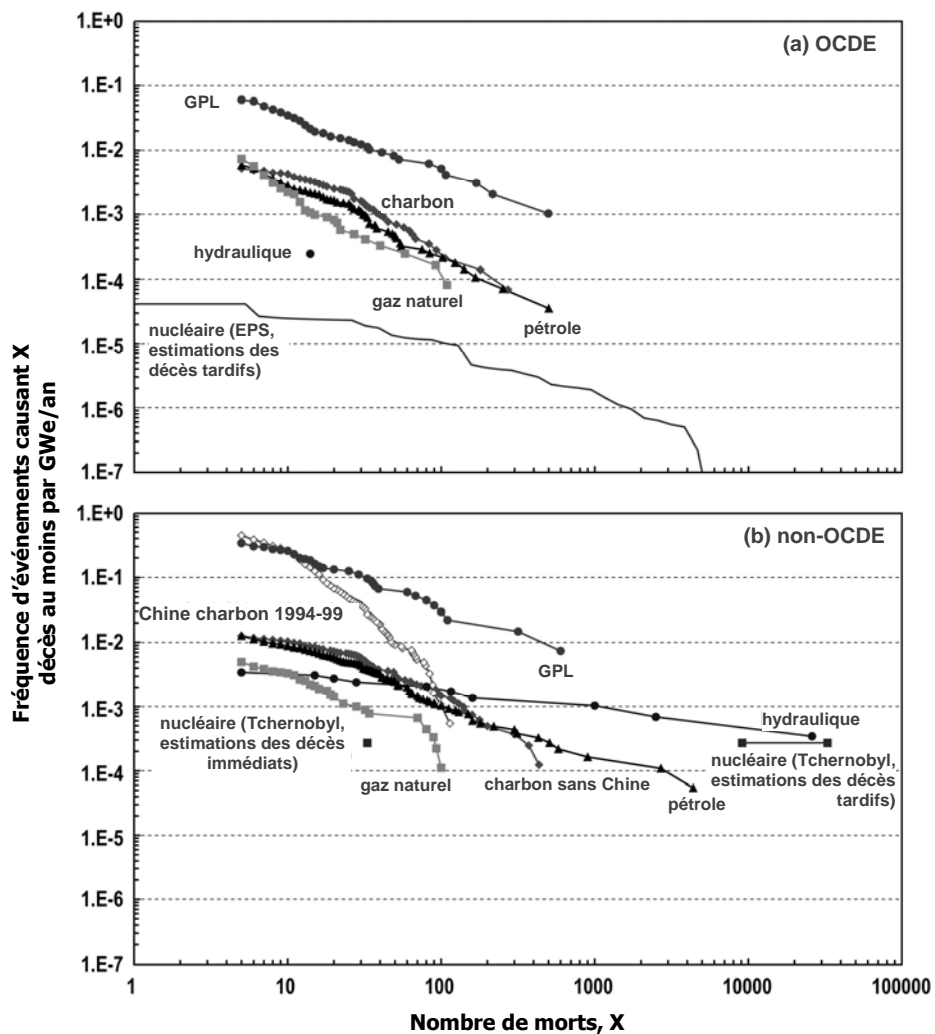
Note : * Il s'agit uniquement des décès immédiats.

Source : données communiquées à l'AEN par l'Institut Paul Scherrer (IPS).

5.2 Courbes fréquence-conséquences

Les courbes fréquence-conséquences sont une méthode couramment employée par les industries employant des technologies complexes pour exprimer les risques collectifs ou sociaux dans les études quantitatives de risques. Elles indiquent la probabilité d'accident ayant des conséquences d'importance variable, des décès par exemple. Ces courbes fournissent une estimation du risque d'accident auquel est exposé un grand nombre de personnes, en donnant la fréquence cumulée d'événements produisant N ou plus décès. Cette fréquence est en général présentée sur un graphe à deux axes logarithmiques qui permet de faire apparaître, sur un même schéma, un intervalle de variation important.

Figure 10 : Comparaison des courbes fréquence-conséquences d'accidents dans des filières énergétiques complètes, établies d'après des statistiques réelles d'accidents graves (≥ 5 morts)



Note : Concerne (a) les pays de l'OCDE et (b) les pays non membres de l'OCDE sur la période 1969-2000, à l'exception de la Chine entre 1994 et 1999 (voir texte). Les estimations des décès tardifs ont été tirées de l'étude probabiliste de sûreté de la centrale nucléaire suisse de Mühleberg et des évaluations du risque en fonction des doses effectuées pour Tchernobyl.

Source : [2 à 6] et données communiquées par l'IPS à l'AEN.

La figure 10 présente les courbes fréquence-conséquences d'accidents graves dans le secteur énergétique (≥ 5 morts) en dissociant les pays membres

des pays non membres de l'OCDE. Dans les pays membres de l'OCDE (figure 10a), les filières fossiles présentent une fréquence d'accidents graves supérieure à la filière hydraulique, le GPL obtenant les résultats les plus mauvais et le gaz naturel les meilleurs. On ne possède qu'une statistique sur l'hydraulique, car la période analysée n'a connu qu'un accident grave dans cette filière (Teton, aux États-Unis, qui a coûté la vie à 14 personnes en 1976).

Dans les pays de l'OCDE, l'énergie nucléaire est très sûre par rapport aux filières fossiles. Aucun accident ayant provoqué au moins cinq décès immédiats ne s'y est produit. Par conséquent, comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, la comparaison n'est possible qu'avec des fréquences théoriques d'accidents tirées d'études probabilistes de sûreté. Les courbes présentées sur la figure 10a concernent les décès tardifs calculés pour une centrale nucléaire suisse. Elles figurent ici à titre de comparaison, bien qu'elles ne puissent être directement comparées aux statistiques concernant des décès réels. Les décès tardifs n'étant pas donnés pour les autres types d'accidents, on peut considérer qu'en un sens, les statistiques sur le nucléaire sont prudentes.

Dans les pays non membres de l'OCDE (figure 10b), le classement des courbes fréquence-conséquences par filière énergétique est identique à celui de l'OCDE, à l'exception de la filière charbon chinoise qui obtient des résultats nettement moins bons que dans les autres pays non membres. À nombre de morts équivalent, les fréquences d'accidents sont supérieures dans les pays non membres de l'OCDE et, dans le cas du GPL et du charbon (Chine, 1994-99), les fréquences d'accidents ayant tué cinq personnes ou plus atteignent parfois 0.4 GWe/an.

Dans le cas de Tchernobyl, le seul accident nucléaire grave (≥ 5 morts) qui se soit produit dans un pays non membre de l'OCDE, le nombre de décès immédiats est inférieur au nombre de décès tardifs (décès survenant de nombreuses années après à cause des effets sanitaires de l'exposition aux substances radioactives rejetées). Les estimations du montant total de décès tardifs imputables à Tchernobyl ont été tirées d'études de la CE/AIEA/OMS et de l'UNSCEAR ainsi que de nombreuses autres sources, russes notamment. Ces estimations, que l'on a représentées sur la figure 10b s'échelonnent, au cours des 70 prochaines années, entre 9 000 (en fonction de la troncature appliquée à la dose) et 33 000 (pour tout l'hémisphère nord et si l'on ne prévoit pas de troncature de la dose). Ce chiffre donne un nombre de morts par GWe/an de 13.9 à 51.2 pour les pays non membres de l'OCDE. Toutefois, il n'est pas rationnel d'extrapoler ces risques nucléaires aux pays qui sont actuellement membres de l'OCDE, car les centrales de la zone OCDE reposent sur des technologies plus sûres et sont exploitées dans un cadre réglementaire nettement plus rigoureux que celui qui existait en Ukraine au moment où s'est produit

l'accident de Tchernobyl. On notera que les estimations des décès tardifs imputables à l'accident de Tchernobyl sont du même ordre de grandeur que les décès immédiats qu'a causés la plus importante rupture de barrage survenue dans un pays non membre de l'OCDE.

S'agissant des décès tardifs dus à l'exposition aux rayonnements, si le risque pour des individus qui reçoivent de très faibles doses est proportionnellement très petit, il n'en reste pas moins que, dans le temps et l'espace, un nombre considérable de personnes peuvent être touchées par un accident de l'ampleur de Tchernobyl. Sachant que, pour calculer l'exposition individuelle, on associe cette forte dose collective (somme de millions de doses très faibles) à une fonction dose-réponse qui est linéaire et sans seuil (ce qui signifie qu'il existe une relation directe entre la probabilité de cancer mortel à long terme et la dose reçue, aussi infime soit-elle), les effets sanitaires ainsi obtenus peuvent devenir très importants.

À titre de comparaison, la dose efficace globale de 600 000 personnes-sieverts que l'on attribue à l'accident de Tchernobyl ne représente que 5 % des 13 000 000 personnes-sieverts que reçoit **annuellement**, d'après les estimations, la population mondiale du fait des sources de rayonnements naturelles. Sur les 70 années prises en compte pour le calcul du nombre de morts tardives imputables à Tchernobyl, la dose collective due aux sources de rayonnements naturelles atteindrait 910 millions de personnes-sieverts (à supposer que la population soit constante), soit une dose 1 500 fois supérieure. Théoriquement, donc, une exposition au fonds naturel de rayonnements provoquerait 1 500 fois plus de décès. Nous n'avons cependant aucun moyen de confirmer les chiffres de Tchernobyl car la mortalité par cancer, tous cancers confondus, est nettement supérieure.

La prise en compte des effets sanitaires tardifs de la combustion des combustibles fossiles, qui représente le principal mode de production d'électricité en base autre que le nucléaire, peut apporter un nouvel éclairage. Selon les *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2030* [6], la pollution atmosphérique due aux particules fines (≤ 10 microns) aurait provoqué environ 960 000 décès prématurés en 2000 et la perte de 9 600 000 années de vie dans le monde entier. Trente pour cent de cette pollution sont imputables à l'énergie. Par conséquent, même si l'on se réfère au nombre de décès tardifs, les chiffres obtenus pour l'accident de Tchernobyl sont faibles par rapport à la mortalité imputable aux autres sources d'énergie, principalement les combustibles fossiles. Globalement, la mortalité accidentelle liée à la consommation d'énergie est nettement inférieure à celle qui résulte des effets des émissions des combustibles fossiles, mais elle attire bien davantage l'attention des médias et du public.

Les valeurs statistiques prévues des taux de mortalité dus aux accidents graves dans les filières nucléaires des pays de l'OCDE sont très faibles, mais les conséquences maximales concevables peuvent être importantes en raison de la prédominance des décès tardifs calculés sans appliquer de troncature à la dose. S'agissant des centrales nucléaires modernes, qui n'ont pas connu d'accident, le taux de mortalité tardive ne peut être évalué qu'à l'aide d'une étude probabiliste de sûreté (EPS) décrite à la section 4.1. L'Institut Paul Scherrer s'est servi, pour ce calcul, des études effectuées pour l'EPS de la centrale nucléaire suisse de Mühleberg. Ces données (voir figure 10a) donnent une probabilité de 1 sur 1 million d'années d'un accident causant la mort de plus de 2 000 personnes. Bien qu'il s'agisse d'un chiffre très important, les statistiques recueillies à l'Institut Paul Scherrer indiquent que les accidents les plus graves qui se sont réellement produits dans le monde dans le secteur énergétique ont fait autant, voire plus, de victimes immédiates. Outre la rupture du barrage chinois, un accident pétrolier aux Philippines a causé la mort immédiate de 4 386 personnes et un autre accident pétrolier en Afghanistan a fait 2 700 victimes immédiates. Les autres accidents hydrauliques survenus dans les pays non membres de l'OCDE ont fait également beaucoup de victimes, et un accident pétrolier en Corée du Sud a provoqué 500 morts immédiates, juste après l'adhésion de ce pays à l'OCDE.

Les accidents de cette ampleur sont heureusement très rares. Comme il n'existe pas d'équivalent de l'étude probabiliste de sûreté dans le secteur des énergies fossiles, il n'est pas possible de se faire une idée juste de l'importance des accidents les plus graves qui pourraient se produire dans ces filières.

5.3 Récapitulation des risques d'accident grave dans le secteur énergétique

Plus de 2 500 personnes trouvent la mort chaque année dans des accidents énergétiques graves, un chiffre qui croît avec la consommation d'énergie. De 1969 à 2000, on a ainsi compté 1 870 accidents ayant tué cinq personnes au moins. Le plus grand nombre de victimes immédiates dans les filières fossiles concerne les secteurs du charbon et du pétrole, avec 2 259 et 3 713 décès immédiats respectivement dans les pays de l'OCDE et 18 017 et 16 505 décès immédiats dans les pays non membres de l'OCDE. L'hydroélectricité a causé la mort de 29 924 personnes lors d'un seul accident survenu en Chine.

L'accident de Tchernobyl a provoqué 31 morts immédiates, et devrait faire entre 9 000 et 33 000 victimes supplémentaires dans les 70 années qui viennent si l'on se réfère aux coefficients employés actuellement pour évaluer le risque en fonction de la dose de rayonnement. Il n'est pas raisonnable d'extrapoler ces

risques aux pays membres de l'OCDE qui exploitent des technologies indubitablement plus sûres, et cela dans un cadre réglementaire plus sévère.

Le taux de mortalité tardive dans les centrales nucléaires modernes ne peut être évalué que par une EPS. L'EPS effectuée pour la centrale suisse de Mühleberg indique une probabilité de 1 sur 1 million d'années d'un accident provoquant plus de 2 000 décès tardifs. Dans les pays de l'OCDE, les courbes fréquence-conséquences montrent que le risque d'accident nucléaire faisant plus de 100 décès tardifs est, au moins, dix fois inférieur au risque d'accident causant 100 décès immédiats dans les filières du charbon, du pétrole, du gaz naturel et de l'hydraulique, et près d'un millier de fois moindre que le risque correspondant dans la filière du GPL.

Références

- [1] Burgherr, P., S. Hirschberg, A. Hunt, R.A. Ortiz (2004), « Severe accidents in the energy sector », Final Report to the European Commission of the EU 5th Framework Programme *New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies* (NewExt), DG de la recherche, du développement technologique et de la démonstration (RTD), Bruxelles, Belgique.
- [2] Hirschberg, S., G. Spiekerman, R. Dones (1998), *Severe accidents in the energy sector – first edition*. PSI Report No. 98-16, Institut Paul Scherrer, Villigen, Suisse.
- [3] Burgherr, P., S. Hirschberg (2008), « Severe accident risks in fossil energy chains : a comparative analysis », *Energy*, 33, 538-553.
- [4] Burgherr, P., S. Hirschberg (sous presse), « A comparative analysis of accident risks in fossil, hydro and nuclear energy chains, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1549-7860, Vol. 14, Issue 5, Institut Paul Scherrer, Villigen, Suisse.
- [5] Hirschberg, S., P. Burgherr, G. Spiekerman, R. Dones (2004), « Severe accidents in the energy sector : comparative perspective », *Journal of Hazardous Materials*, 111, 57-65.
- [6] OCDE (2008), *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2030*, OCDE, Paris, France.

6. NUCLÉAIRE ET CONFIANCE DU PUBLIC

Bien que la filière nucléaire, soit par comparaison, très sûre, la confiance du public, elle n'évolue que très lentement. Elle a des dimensions locales, nationales et mondiales et n'est pas particulièrement inconstante. Malgré tout, le nucléaire reste un sujet de controverse, et son utilisation suscite toujours un certain nombre d'inquiétudes chez le public.

Dans *L'opinion publique et l'énergie nucléaire* (AEN, 2010), l'AEN examine des sondages d'opinion afin de comprendre les attitudes du public vis-à-vis du nucléaire. Elle a ainsi pu constater qu'il existe une corrélation entre la connaissance et l'adhésion et entre le fait pour un pays d'être équipé de centrales nucléaires et une attitude favorable à leur exploitation.

La législation et l'efficacité des autorités de sûreté sont des déterminants de l'idée que se fait le public de l'acceptabilité de l'électronucléaire. La responsabilité de la réglementation nucléaire revient à chaque pays et aux autorités de sûreté nationales. Ces autorités définissent des exigences de sûreté que les exploitants doivent respecter pour pouvoir obtenir l'autorisation d'exploiter l'installation, pour assurer la protection des matières nucléaires, préserver l'environnement et gérer les déchets radioactifs et le combustible nucléaire usé. Les autorités de sûreté procèdent à des contrôles des installations de façon à vérifier que les activités sont menées dans des conditions sûres et, le cas échéant, imposent aux exploitants de prendre des mesures correctives pour respecter les prescriptions.

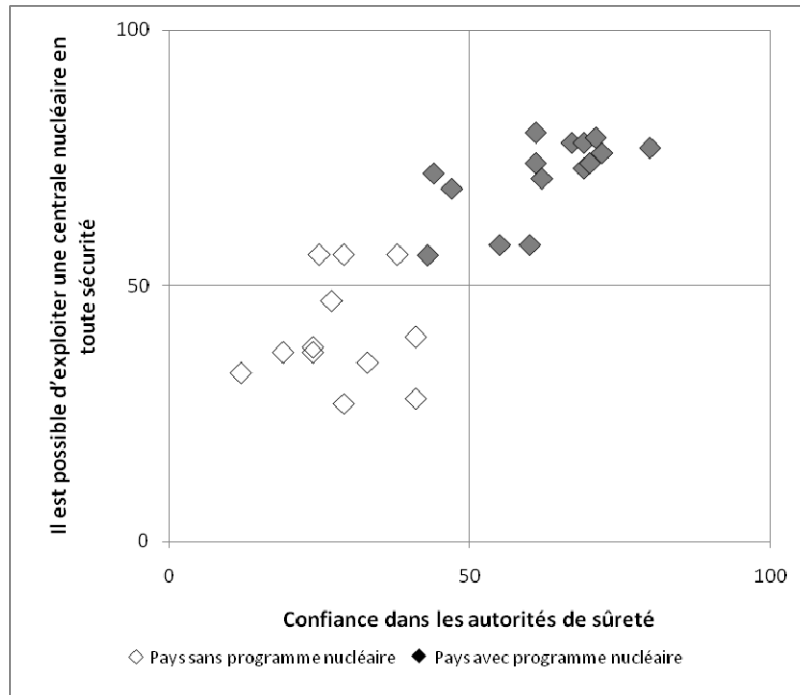
Les pouvoirs publics veillent à ce que l'autorité de sûreté compétente jouisse de moyens financiers et humains suffisants. L'indépendance effective des autorités est un ingrédient essentiel de la sûreté nucléaire car elle garantit l'absence de pressions ou à d'ingérences indues de la part des exploitants ou des pouvoirs publics.

Un sondage Eurobaromètre (Eurobaromètre, 2007) portant sur l'Europe des 25 plus deux pays, la Roumanie et la Bulgarie qui allaient, à l'époque, devenir membres de l'Union européenne, s'est intéressé à la question de la confiance du public dans la législation nucléaire. Il contenait des questions

relatives à la réglementation en sûreté nucléaire, les autorités de sûreté et les exploitants nucléaires.

Comme le montre la figure 11, ce sondage a révélé une forte corrélation entre la confiance dont jouissent les autorités de sûreté et la conviction que les centrales nucléaires peuvent être exploitées de manière sûre. Il est tout à fait clair que l'adhésion aux programmes d'énergie nucléaire passe par la confiance dans les autorités de sûreté. En outre, les pays dotés de programmes nucléaires où le citoyen a, ou croit posséder, une expérience directe des questions nucléaires, se fient davantage à leurs systèmes réglementaires et sont plus favorables à l'énergie nucléaire que les pays qui n'ont pas cette expérience.

Figure 11 : Corrélation entre la confiance accordée aux autorités de sûreté et la conviction que les centrales nucléaires peuvent être exploitées en toute sécurité



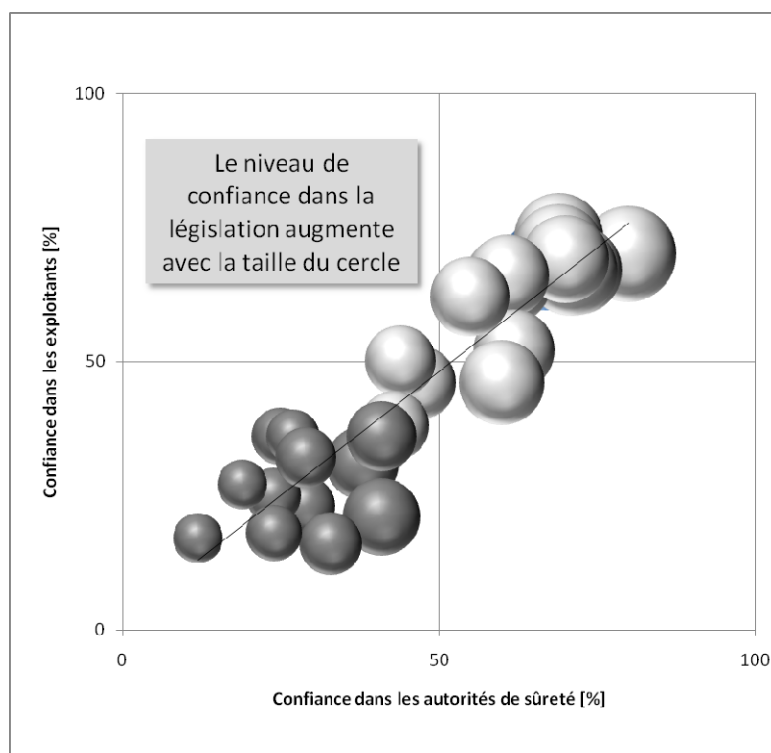
Source : Eurobaromètre (2007).

La figure 12 approfondit un peu plus le sujet en comparant la confiance accordée aux autorités de sûreté, aux exploitants et à la législation dans les pays qui exploitent l'énergie nucléaire et dans ceux qui ne le font pas. À l'évidence, la confiance dans les exploitants a une corrélation avec celle dont jouissent les autorités de sûreté, qui conduit à penser qu'il faut pouvoir se fier à la réglemen-

tation de l'énergie nucléaire pour accorder sa confiance aux exploitants de centrales nucléaires. Par ailleurs, cette double confiance dans les exploitants et les autorités de sûreté augmente avec le crédit accordé à la législation. Les pays qui n'exploitent pas l'énergie nucléaire sont, une fois de plus, ceux où le niveau de confiance dans les exploitants et les autorités de sûreté est le plus bas.

Ces résultats montrent clairement qu'une autorité de sûreté indépendante et forte se traduit par une meilleure adhésion du public à l'énergie nucléaire ou, du moins, est nécessaire pour emporter cette adhésion.

Figure 12 : Relations entre la confiance du public dans les exploitants, les autorités de sûreté et la législation nucléaire



Source : Eurobaromètre (2007).

Au moment de préparer l'avènement de la prochaine génération d'installations nucléaires, il devient essentiel de former et d'informer le public sur la sûreté et la sécurité. Diverses instances peuvent y contribuer, en particulier les pouvoirs publics à qui il reviendra d'expliquer les raisons des décisions de renouveler le parc nucléaire ou de remplacer des installations.

Une réglementation nucléaire efficace est un sujet d'intérêt général majeur et, de ce fait, doit être le fruit de négociations aussi ouvertes et honnêtes que possible pour mériter la confiance public. Une attitude suffisamment ouverte témoigne de la reconnaissance du droit qu'a le public d'être informé et de participer effectivement au processus réglementaire. L'ouverture et la transparence à l'égard de toutes les parties intéressées contribuent pour beaucoup à préserver la confiance de la population vis-à-vis des autorités de sûreté et des activités des exploitants.

Les documents et la correspondance relatifs au renouvellement des autorisations et au dépôt des demandes – à l'exception de certaines informations liées à la sécurité ou protégées, ou de toute autre information sensible – doivent être accessibles, et le public doit pouvoir consulter les sites web des autorités de sûreté. Il ne suffit pas de consulter les populations et de communiquer avec le public, il faut les faire participer.

Il est probable que le public manifeste davantage d'intérêt pour la façon dont les autorités de sûreté compétentes gèrent les dangers propres à l'exploitation des installations nucléaires. Dans les années qui viennent, nombreuses sont les autorités de sûreté qui devraient recevoir des demandes d'autorisation de construction et d'exploitation de centrales nucléaires et de stockages de déchets. L'instruction des dossiers par les autorités de sûreté devra être transparente. En outre, les demandes de prolongation des autorisations des réacteurs en service devraient se faire plus nombreuses. Toutes ces activités attireront l'attention du public.

Références

AEN (2010), *L'opinion publique et l'énergie nucléaire*, OCDE/AEN, Paris, France.

Eurobarometer (2007), *Special Eurobarometer 271*, Europeans and Nuclear Safety, CE, Bruxelles, Belgique.
http://ec.europa.eu/public_opinion/index_en.htm

7. CONCLUSIONS

Cette étude s'adresse principalement aux responsables des politiques énergétiques. Les spécialistes de sûreté nucléaire peuvent y trouver quelque intérêt, mais il leur est plutôt conseillé de se reporter aux travaux plus approfondis des comités de l'AEN qui travaillent sur la sûreté nucléaire, à savoir le Comité sur les activités nucléaires réglementaires et le Comité sur la sûreté des installations nucléaires. Les rapports de ces comités peuvent être consultés sur le site web de l'AEN. Voici les conclusions de la présente étude, d'intérêt plus général :

Sûreté nucléaire

- consiste à assurer la protection des personnes et de l'environnement contre les risques radiologiques et, pour ce faire, à atteindre les niveaux de sûreté les plus élevés possible dans les centrales nucléaires ;
- on ne peut transiger sur la sûreté nucléaire : elle est et restera la priorité première de l'industrie nucléaire ;
- doit s'instaurer à l'échelle planétaire car un événement grave qui surviendrait dans un pays pourrait avoir des répercussions importantes sur ses voisins et aurait des conséquences sur le développement du nucléaire dans le monde entier.

Philosophie de la sûreté des centrales nucléaires

- L'un des principaux moyens employés pour éviter et atténuer les conséquences d'accidents est le concept de la défense en profondeur par lequel on prévoit des niveaux de protection successifs et indépendants qui devront tous être défailants pour que l'homme et l'environnement ressentent des effets nocifs d'un accident.
- Pour assurer l'intégrité des barrières multiples du système de défense en profondeur, une solide culture de sûreté est indispensable. Les

valeurs et attitudes de l'intégralité de l'organisation exploitante concernant la sûreté sont tout aussi importantes que la conception et la construction de la centrale nucléaire.

Évolution du palmarès de sûreté

- Le nombre d'arrêts automatiques de réacteur, qui est un indicateur général du fonctionnement global de l'installation et indirectement de la culture de sûreté, a été divisé par trois depuis 1990, signe d'une culture de sûreté en progression régulière dans l'industrie électronucléaire.
- L'exposition collective annuelle des travailleurs par réacteur a été divisée par 2.6 au cours de la même période. Ce progrès s'observe dans toutes les régions du monde, quelle que soit la filière de réacteur. Il peut être perçu comme le signe d'une amélioration régulière de la culture de sûreté.
- Il y a tout lieu de penser que cette tendance se poursuivra dans les futurs programmes de construction. L'exposition individuelle et collective par tranche devrait normalement diminuer avec l'entrée en service de nouveaux réacteurs intégrant des améliorations de la sûreté et la poursuite de l'effort entrepris par les exploitants actuels pour perfectionner leurs systèmes de gestion de la sûreté.

Évolution des prévisions de risques d'accidents graves

- La probabilité prévue d'un accident grave dans une centrale nucléaire, suivi d'un important rejet de radioactivité a été divisée par 1 600 entre la conception initiale des premiers réacteurs de première génération et les générations III et III+ de centrales construites aujourd'hui (on notera toutefois que ces conceptions originales ont également été améliorées par des mises à niveau effectuées au fil des ans).
- Au début des années 60, un accident qui aurait provoqué un endommagement grave du cœur aurait pu entraîner un fort rejet de radioactivité. Les progrès techniques accomplis font que la probabilité de rejet dans l'environnement consécutif à un accident dans un réacteur de génération III ou III+ est environ 10 fois moindre que la probabilité de fusion du cœur.

Analyse comparée des risques d'accident grave dans le secteur énergétique

- Plus de 2 500 personnes perdent la vie chaque année dans des accidents graves (accidents tuant au moins cinq personnes) liés à l'exploitation de l'énergie.
- L'énergie nucléaire a beau être perçue comme une activité à haut risque, les comparaisons avec d'autres sources d'énergie montrent qu'elle a provoqué beaucoup moins de décès.
- Entre 1969 et 2000, les filières du charbon et du pétrole ont comptabilisé 2 259 et 3 713 décès immédiats respectivement, dans les pays de l'OCDE, et 18 017 et 16 505 décès immédiats, dans les pays non membres de l'OCDE. À titre de comparaison, le seul accident nucléaire grave qui se soit produit, à savoir Tchernobyl; a fait 31 victimes immédiates.
- Au cours des 70 prochaines années, on estime entre 9 000 et 33 000 le nombre de morts tardives imputables à l'accident de Tchernobyl. Pour comparaison, l'OCDE estime la mortalité tardive qui résulte de la présence de particules dans l'air à 960 000 morts pour l'année 2000 seulement. Or l'énergie est responsable de 30 % de cette pollution.

Confiance dans l'électronucléaire

- Bien que le nucléaire reste un sujet de controverse, la confiance du public évolue lentement mais il existe une corrélation entre la connaissance de cette technologie et la confiance.
- Les sondages d'opinion révèlent une forte corrélation entre la confiance dont jouissent les autorités de sûreté et la conviction que les centrales nucléaires peuvent être exploitées dans des conditions sûres. À l'évidence, la confiance dans les autorités de sûreté est déterminante pour obtenir l'adhésion du public aux programmes nucléaires.
- Gagner la confiance du public exige l'ouverture et la transparence des décisions publiques concernant l'exploitation du nucléaire mais aussi de la procédure d'autorisation.

Annexe I

SIGLES ET ACRONYMES*

AEN	Agence pour l'énergie nucléaire
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
ALARA	Aussi bas qu'il est raisonnablement possible
CANR	Comité sur les activités nucléaires réglementaires
CIPR	Commission internationale de protection radiologique
CSIN	Comité sur la sûreté des installations nucléaires
EPS	Étude probabiliste de sûreté
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
IPS	Institut Paul Scherrer
ISOE	Système international d'information sur la radioexposition professionnelle
NDC	Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
RBMK	Réacteur à eau ordinaire à modérateur graphite / <i>reactor bolchoï moschchnosti kanali</i>
REO	Réacteur à eau ordinaire

REP	Réacteur à eau sous pression
Sv	Sievert
UNSCEAR	Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants
WANO	Union mondiale des exploitants nucléaires

* Voir l'explication des termes techniques à l'annexe II.

Annexe II

EXPLICATION DES TERMES TECHNIQUES

Probabilité de fusion du cœur – Il s'agit de la probabilité d'endommagement du combustible qui résulterait d'un accident dans un réacteur nucléaire. Ce type d'accident est considéré comme grave car il peut avoir des conséquences sur la réaction en chaîne et éventuellement provoquer la fusion d'une partie ou de la totalité du cœur avec rejet de radioactivité dans le bâtiment de l'enceinte.

Probabilité de rejet important de radioactivité dans l'éventualité d'un accident nucléaire. Le rapport entre la probabilité de fusion du cœur et la probabilité de rejet important de radioactivité permet de mesurer la capacité du dispositif adopté pour atténuer les conséquences d'un accident (le récupérateur de cœur fondu par exemple) d'empêcher un rejet de radioactivité hors du bâtiment.

EPS – L'étude probabiliste de sûreté est une technique systématique et complète d'évaluation des risques propres à des systèmes complexes tels que des centrales nucléaires. On effectue une EPS au moment de la conception de l'installation mais aussi au cours de l'exploitation afin d'identifier et d'analyser toutes les pannes et séquences d'événements concevables susceptibles d'entraîner la fusion du cœur ou le rejet de radioactivité. Cette EPS consiste à quantifier la probabilité et les conséquences de toutes les pannes possibles et à déterminer le risque correspondant. L'EPS s'intéresse tant aux agressions internes qu'externes et dans tous les états de fonctionnement ou d'arrêt. Sachant que les résultats dépendent à l'évidence des données de fiabilité entrées et de l'exhaustivité des pannes prises en compte, les résultats de l'EPS ne doivent pas être considérés comme une prévision exacte des probabilités des événements.

Première génération – Nom donné aux premières centrales nucléaires construites dans le monde. Dans de nombreux pays, il s'agissait de réacteurs expérimentaux dérivés des réacteurs de propulsion navale. Ces réacteurs étaient principalement destinés à des usages militaires. Pour quelques rares pays toutefois, ce furent les premiers réacteurs de puissance civils. Presque tous les réacteurs de cette génération ne sont plus en service aujourd'hui.

Deuxième génération – Il s’agit de la seconde série de centrales nucléaires construites dans le monde. Ces réacteurs ont été conçus précisément pour produire de l’électricité. À partir du retour d’expérience des réacteurs de première génération, on a considérablement amélioré la sûreté de cette génération de réacteurs. Les principales améliorations ont consisté à prévoir une troisième barrière (l’enceinte de confinement destinée à éviter ou à réduire dans de fortes proportions l’éventualité d’un rejet de radioactivité dans l’environnement) et à diminuer l’importance du facteur humain pour l’exploitation de la centrale. La plupart des centrales nucléaires exploitées aujourd’hui appartiennent à la deuxième génération.

Troisième génération – Correspond à un ensemble de modèles standard de réacteurs de à eau ordinaire dont la sûreté et la rentabilité économique ont été renforcées. Ces réacteurs doivent garantir l’intégrité du cœur en cas d’agression externe grave comme une chute d’avion ou un séisme. On y a introduit des systèmes à sûreté passive supplémentaires (récupérateur de cœur fondu) de façon à éviter tout rejet de radioactivité, même dans l’éventualité d’une fusion hypothétique du cœur. De plus, l’impact d’erreurs humaines potentielles doit y être considérablement atténué. La probabilité de fusion du cœur d’un réacteur de troisième génération est normalement dix à cent fois inférieure à celle d’un réacteur de deuxième génération. Enfin, ces centrales de troisième génération doivent être économiquement rentables, grâce à leur coefficient de disponibilité élevé, une durée d’exploitation plus longue et un meilleur usage du combustible (rendement thermique, poisons consommables, etc.)

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE