

# FUKUSHIMA, DES NOTIONS TECHNIQUES AUX ENSEIGNEMENTS PRATIQUES EN PASSANT PAR LES CONSÉQUENCES

PAR GUY MARLEAU ET RICHARD CHAMBON

La production abondante d'énergie par la fission nucléaire est une option incontournable pour lutter contre le réchauffement climatique résultant des gaz à effet de serre. Ainsi, près de 25 ans après l'accident de Tchernobyl, le nucléaire civil semblait renaître de ses cendres. Cependant, l'accident à la centrale de Fukushima pourrait remettre en question les avancées des dernières années en relançant la polémique autour de cette technologie. Les manifestations imprévisibles et les décisions politiques hâtives s'attaquent avec vigueur à l'utilisation de cette forme d'énergie. Il faut cependant faire la part des choses et analyser d'un point de vue factuel cet accident afin de poser des actions réfléchies et éclairées vis-à-vis du nucléaire. C'est ce que nous tenterons de faire dans cet article.

Dans un premier temps, nous décrirons les événements qui se seraient déroulés à la centrale nucléaire de Fukushima daiichi en se basant sur les dernières informations disponibles<sup>[1]</sup>. Nous décrirons ensuite les contraintes associées à l'exploitation d'une centrale à l'arrêt et approfondirons les concepts de chaleur résiduelle et de radiotoxicité du combustible irradié afin de mieux comprendre les défis et les enjeux rencontrés en radioprotection ainsi que les conséquences environnementales de cet accident. Enfin, nous examinerons les leçons que nous pouvons tirer de l'accident de « Fukushima » et les améliorations dans le design des centrales nucléaires actuelles et futures qui pourraient en découler.

## RÉSUMÉ

« Fukushima », un nom devenu tristement célèbre. Mais en fait que s'est-il vraiment passé à Fukushima? Quelles ont été les conséquences de cet accident et quelles leçons peut-on en tirer? Voici les questions auxquelles nous tenterons de répondre dans ce bref texte.

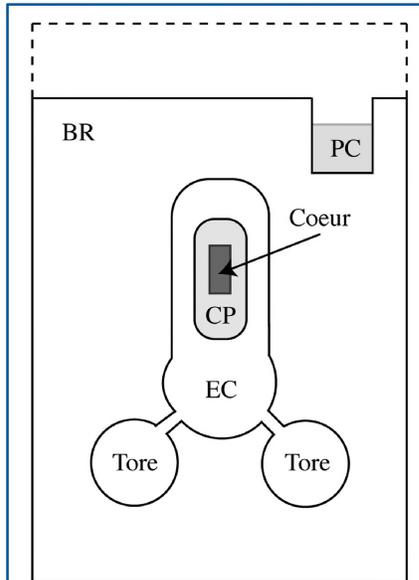


Fig. 1 Édifice typique contenant un réacteur à eau bouillante. Ici « BR » représente le bâtiment réacteur en béton armé, « EC » l'enceinte de confinement aussi en béton armé, « CP » la cuve sous pression en acier inoxydable, et « PC » la piscine de stockage du combustible usagé. La région torique sous le réacteur est une seconde enceinte de confinement qui est utilisée par le système de dépressurisation de la cuve du réacteur.

## L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA

Le 11 mars 2011 à 14h46, un tremblement de terre de magnitude 9 survient au large de la côte Pacifique du Japon. Dans les deux secondes suivant le séisme, tous les réacteurs nucléaires en marche dans la région immédiate de Fukushima (11 réacteurs, dont trois des six à la centrale Fukushima daiichi, quatre à Fukushima daini, trois à Onagawa et un à Tokai) sont mis à l'arrêt automatiquement par l'insertion de barres de pilotage. Cet arrêt implique que la réaction en chaîne contrôlée dans le réacteur n'est plus possible, mais aussi que le réacteur continue d'être refroidi en continu (état d'arrêt à froid). Ce refroidissement est requis pour évacuer la chaleur résiduelle, produite par la désintégration des noyaux radioactifs créés

par la réaction de fission, et qui pourrait, si elle s'accumule, mener à la fonte du combustible.

À la centrale de Fukushima, on retrouve trois différentes générations de réacteurs à eau bouillante (REB) : le BWR-3 (voir Figure 1) de 1380 MW-thermique (réacteur 1), le BWR-4 de 2381 MW qui est presque identique au BWR-3 mais sensiblement plus gros (réacteurs 2 à 5) et le BWR-5 de 3293 MW qui est une version avancée du BWR-4 (réacteur 6). Seulement trois de ces six réacteurs sont en



G. Marleau  
<guy.marleau@polymtl.ca> et  
R. Chambon  
<richard.chambon@polymtl.ca>, Institut de génie nucléaire, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC,

marche lorsque le tremblement de terre isole le site du réseau (réacteurs 1 à 3). Les génératrices au mazout prennent alors la relève afin d'assurer l'alimentation en électricité des pompes de refroidissement.

Cependant, moins d'une heure après l'arrêt des réacteurs, le tsunami engendré par le séisme atteint le site de la centrale. Les réservoirs de mazout qui assurent l'alimentation des génératrices d'urgence sont alors détruits. Les systèmes de refroidissement de ces réacteurs deviennent rapidement inactifs et un accident se profile à l'horizon. Les batteries, qui constituent le dernier rempart pouvant assurer l'alimentation du site en électricité, continueront de fonctionner pour 8 heures avant de finalement s'épuiser. Elles sont cependant inadéquates pour alimenter les pompes de refroidissement. Étant donné la gravité de la situation si le refroidissement du cœur ne peut être rétabli promptement, les autorités ordonnent en soirée l'évacuation de la population dans un rayon de 2 puis 3 km. Ce rayon est étendu à 10 km la même nuit.

La suite des événements pour les réacteurs 1 à 3 est alors semblable. Sans possibilité de refroidissement, et étant donné la chaleur émise par le combustible irradié, le niveau d'eau dans le cœur diminue et la température du combustible augmente jusqu'à atteindre 3330 K et causer sa fonte (température de fusion de l'ordre de 2225 K) endommageant successivement la cuve pressurisée et l'enceinte de confinement. Cependant, avant même que ceci ne se produise, une série d'autres problèmes viendront aggraver la situation.

Les crayons de combustible dans les réacteurs nucléaires sont ensachés dans une gaine en zirconium hermétique qui sert à maintenir l'intégrité structurale des assemblages de combustible et à empêcher les produits de fission gazeux de s'échapper dans l'environnement. Lorsque cette gaine atteint une température de l'ordre de 810 K, elle commence à se fracturer à cause du processus d'oxydation accéléré qu'elle subit. À une température de 1255 K, la réaction exothermique vapeur-zirconium accélère la production d'hydrogène libre dans la cuve du réacteur. Pour les réacteurs en fonctionnement normal on s'assure que l'hydrogène ainsi créé est recombiné avant que sa concentration n'atteigne des niveaux trop importants. Cette recombinaison n'étant pas possible sans électricité à Fukushima daiichi, l'hydrogène s'accumule, et ce, d'autant plus vite que la température du cœur est élevée. La pression à l'intérieur de la cuve atteint rapidement les limites de conception et doit être réduite par ventilation. Une quantité importante d'hydrogène est alors relâchée à l'environnement et se retrouve dans la zone de rechargement. Ceci mènera plus tard aux explosions spectaculaires des bâtiments abritant les réacteurs 1 et 3. Comme les gaines entourant le combustible sont endommagées, des produits de fission gazeux maintenant libres, tels l'iode-131 et le césium-137, seront aussi évacués de l'enceinte du réacteur pour se répandre dans l'environnement.

La priorité des opérateurs de la centrale à ce point est de refroidir le cœur pour diminuer à la fois la formation d'hydrogène, la pression dans la cuve du réacteur et la

dégradation ou même la fonte du combustible. On a donc recours à l'eau de mer, seule source froide facilement disponible, et ce même si celle-ci est très corrosive.

Examinons maintenant ce qui s'est passé dans le réacteur 4 qui était à l'arrêt lors du séisme. Ce réacteur ne contient pas de combustible et donc le refroidissement du cœur n'est pas un problème. Cependant, le combustible utilisé dans ce réacteur (comme celui de tous les réacteurs) est stocké après irradiation dans une piscine qui joue deux rôles importants : refroidir le combustible usé pendant les quelques années après sa sortie du réacteur où il est le plus actif et servir d'écran radiologique afin d'atténuer la dose de rayonnement au personnel de la centrale. Cette piscine est, en temps normal, refroidie continuellement, mais la panne généralisée d'électricité désactive aussi les pompes servant à cette fin. La température de l'eau augmente donc lentement, mais régulièrement, alors que son niveau ne cesse de diminuer. Les grappes de combustible sont alors exposées à l'air humide ce qui pourrait avoir mené à la production de suffisamment d'hydrogène pour conduire à l'explosion du bâtiment de rechargement et endommager la piscine de ce réacteur (on soupçonne qu'une partie de l'hydrogène ayant causé cette explosion proviendrait aussi du réacteur 3). Encore une fois, les autorités réagissent en déversant des quantités d'eau importantes dans la piscine difficilement accessible avec un succès initialement mitigé.

Le site reste isolé du réseau électrique pendant près de dix jours durant lesquels les multiples mesures d'urgence qui sont prises parviennent parfois difficilement à contrôler la situation. Lorsque l'électricité est rétablie, les autorités de sûreté nucléaire parviennent finalement à faire un état des lieux qui leur permettra de mettre en place des mesures de contrôle plus permanentes. Depuis, les opérateurs s'affairent à minimiser l'impact environnemental de cet accident en colmatant les fuites et en nettoyant et décontaminant l'eau utilisée pour refroidir le cœur des réacteurs et les piscines contenant le combustible usagé lors des interventions d'urgence initiales.

Ce bref aperçu de l'accident illustre bien la complexité associée à l'exploitation d'une centrale nucléaire. L'état de la centrale a été répertorié dans un ensemble de 152 rapports qui seront produits régulièrement pendant les quatre mois suivant l'accident (voir références [2] et [3]). Le suivi des opérations de décontamination et le statut de la centrale sont aussi rapportés régulièrement sur le site web de la référence [2] (en tout, 104 rapports émis en date du 28 septembre).

## CHALEUR LATENTE ET RADIOTOXICITÉ

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, bien que l'événement initiateur de l'accident à la centrale nucléaire de Fukushima daiichi soit le séisme, la cause première de l'accident « nucléaire » est la production de chaleur résiduelle dans le combustible.

La source de cette chaleur est la désintégration des noyaux, pour la plupart radioactifs, produits lors de l'exposition du

combustible à un flux de neutrons. Ainsi, la désintégration naturelle (alpha, bêta et gamma et fission spontanée) d'un noyau libère une quantité d'énergie non négligeable (énergie cinétique des particules) qui se dépose majoritairement dans la matrice de céramique que constitue le combustible. Heureusement, la concentration de ces noyaux radioactifs dans le combustible diminue avec le temps, plus ou moins rapidement en fonction de leur demi-vie, les plus actifs (ceux ayant la plus courte demi-vie) disparaissant le plus rapidement. Ainsi la puissance résiduelle  $P$  produite dans le combustible à un temps  $t$  (en seconde) après l'arrêt de la réaction en chaîne variera suivant la relation approximative [4]

$$P(t) = a (t^{-b} - (T_0 + t)^{-b}) P_0$$

où  $T_0$  (en secondes) est la période de temps pendant lequel le combustible a été irradié à une puissance  $P_0$ . Les coefficients  $a$  et  $b$  varient en fonction du temps  $t$  et sont présentés au Tableau 1.

**TABLEAU 1**  
COEFFICIENTS UTILISÉS POUR LE CALCUL  
DE LA CHALEUR RÉSIDUELLE

$t$ (s)	$a$	$b$
de 0.1 à 10	$60.25 \times 10^{-3}$	0.0639
de 10 à 150	$76.55 \times 10^{-3}$	0.1807
de 150 à $8 \times 10^8$	$137.35 \times 10^{-3}$	0.2962

La Figure 2 illustre le comportement de la puissance résiduelle avec le temps. Initialement, elle correspond à environ 6 % de la puissance d'opération du réacteur. Pour le réacteur 1 de Fukushima, qui produisait 1380 MW thermiques, ceci équivaut à environ 82 MW et n'est donc pas négligeable. Cependant, le rapport  $P/P_0$  diminue rapidement et atteint 0.1 % après un an, ce qui représente tout de même 1.38 MW pour ce même réacteur.

La radiotoxicité du combustible irradié dépend aussi très fortement de l'énergie libérée par la désintégration de ces noyaux radioactifs. Cette énergie, lorsqu'elle se dépose dans des cellules vivantes, peut les détruire ou en modifier la structure. Comme l'illustre la Figure 3, les noyaux radioactifs créés par la réaction de fission représentent la partie majeure de cette radiotoxicité, et ce, durant près d'un siècle, un des contributeurs importants étant le césium-137 qui persiste donc pour une centaine d'années. Par la suite, l'activité du combustible irradié est principalement due à la présence d'actinides qui se désintègrent beaucoup plus lentement. On doit donc attendre environ un million d'années pour que la radiotoxicité du combustible irradié corresponde à celle du minerai d'uranium naturel.

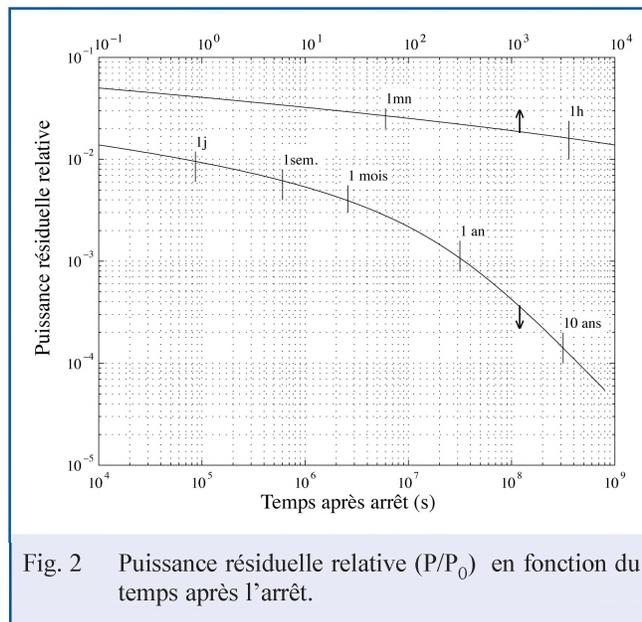


Fig. 2 Puissance résiduelle relative ( $P/P_0$ ) en fonction du temps après l'arrêt.

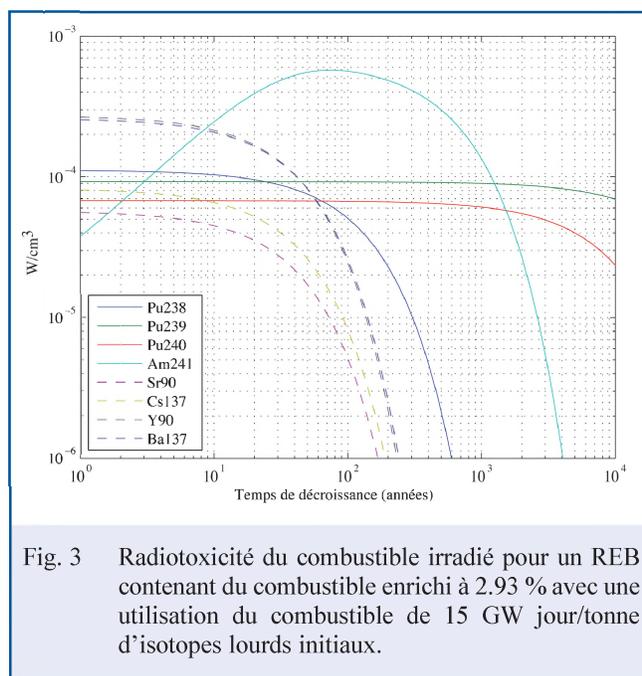


Fig. 3 Radiotoxicité du combustible irradié pour un REB contenant du combustible enrichi à 2.93 % avec une utilisation du combustible de 15 GW jour/tonne d'isotopes lourds initiaux.

## CONSÉQUENCES HUMAINES ET ENVIRONNEMENTALES

Les principales conséquences humaines et environnementales de cet accident sont liées au relâchement dans l'environnement de produits radioactifs, les principaux contaminants étant l'iode-131 et le césium-137. Cependant, il faut noter que ces deux noyaux n'ont été émis à l'environnement en quantité importantes que pendant une période de temps relativement courte. Les opérations de refroidissement d'urgence

contribueront aussi à cette contamination, car l'eau de refroidissement, qui réussira à s'échapper de l'enceinte de confinement ou qui sera tout simplement rejetée à la mer, accumulera des noyaux radioactifs par lessivage du combustible nucléaire irradié (celui-ci n'étant plus protégé par sa gaine de zirconium).

Étant donné la quantité de radioactivité relâchée, l'accident est noté au niveau 7 (accident majeur) sur l'échelle INES, tout comme Tchernobyl même si on estime que 10 fois moins de matière radioactive a été émise à l'environnement.<sup>[5]</sup> De plus, le type de contamination dans les deux cas est très différent : essentiellement des gaz pour l'accident de Fukushima alors qu'à Tchernobyl la majorité des émissions le sera sous forme de particules, le coeur en entier s'étant désintégré.

L'iode-131 a une demi-vie de 8 jours environ. Il cause principalement le cancer de la glande thyroïde qui retient 90 % de l'iode assimilable par le corps. Cependant, en ingurgitant une capsule d'iode non radioactif, il est possible de saturer cette glande pour une période de 60 jours et de réduire ainsi la contamination due à ce noyau. C'est la procédure qui a été suivie à Fukushima. Une quantité importante de césium-137 a aussi été rejetée à l'environnement. Cependant, le césium n'a pas tendance à s'accumuler dans le corps et, n'étant que de passage (demi-vie biologique de 110 jours pour les adultes et un peu moins pour les enfants), il est peu probable qu'il s'y désintègre. De plus, avec le temps, la concentration de césium aura tendance à diminuer par dilution.

De nombreuses stations d'échantillonnage et de mesure de la radioactivité suivent depuis le début de l'accident la progression de la contamination (voir référence [2,3]). Le caractère décroissant de la radioactivité avec le temps est flagrant dans ces observations. Une estimation de la dose engendrée sur l'année qui suit l'accident est de 200 mSv pour la zone d'exclusion de 20 km (avec des pics locaux atteignant 400 mSv), de 100 mSv pour une zone ayant un rayon entre 20 et 30 km de la centrale et de 10 mSv pour les régions plus éloignées sauf pour un couloir nord-est qui débute à la centrale où l'accumulation de contaminants radioactifs a été un peu plus importante (ces zones ont aussi été évacuées afin de s'assurer que la population ne reçoive pas de doses supérieures à 20 mSv sur une période d'un an).

Il est encore très difficile d'évaluer aujourd'hui les conséquences de cet événement sur la santé publique. Cependant, la zone d'évacuation ayant été imposée rapidement par les autorités, aucune personne n'aura résidé dans les zones les plus contaminées. La dose absorbée par le public dans les régions habitées les plus exposées devrait donc se situer en dessous de 10 mSv sur un an et plus rarement atteindre les 20 mSv. Cette valeur de 10 mSv/an est en fait comparable à la dose ambiante dans certaines parties du monde et correspond à peu près à un examen par scanner pour une personne normale. Selon une analyse présentée à la référence [6], une dose de 20 mSv pourrait faire passer les probabilités de cancer au cours de la vie normale d'une personne de 42 % (naturellement) à

42.2 %. Cette estimation conservatrice est basée sur le modèle linéaire dose – effet (taux de cancer) sans seuil utilisé par l'AIEA depuis près de 50 ans.

Selon un rapport du ministère de la Santé du Japon, daté du 15 septembre 2011, 99 travailleurs ont reçu des doses entre 100 et 250 mSv (250 mSv est la dose limite permise au personnel intervenant lors d'accidents graves) alors que pour 309 autres personnes les doses variaient entre 50 et 100 mSv. Les conséquences estimées de ces expositions correspondent à une augmentation des chances de développer un cancer de 1 % sur une période de 20 ans pour cette population. L'augmentation de la mortalité pouvant résulter de l'exposition au rayonnement lors de cet accident pourrait donc s'avérer faible, surtout si on la compare aux 20000 pertes de vie que l'on peut attribuer directement au tsunami. Il ne faut cependant pas négliger les conséquences psychologiques et sociales de l'accident, principalement à cause des dimensions de la zone d'évacuation et du nombre de personnes qui ont dû être déplacées (environ 78000 personnes).

Les conséquences environnementales sur le site de la centrale sont cependant gigantesques. Le coeur des réacteurs 1 à 3 a fondu, ce qui rendra le démantèlement extrêmement compliqué. Une partie du bâtiment abritant le réacteur 4 a été détruite et le site complet reste à décontaminer. Des sarcophages sont prévus autour des réacteurs 1, 3 et 4, le premier ayant été complété en octobre 2011. On espère ainsi réduire de près de 90 % les émissions déjà faibles de radioactivité à l'environnement.

## QUELQUES LEÇONS DÉJÀ APPRISES DE CET ACCIDENT

Nous présenterons ici en vrac quelques leçons que l'on peut d'ores et déjà tirer de l'accident de Fukushima.

Une première observation est que les réacteurs nucléaires semblent avoir résisté au séisme et au tsunami. Cependant, la perte du réseau électrique et l'isolement du site résultant de cette catastrophe naturelle ont eu des effets catastrophiques. La première recommandation évidente serait de modifier le réseau électrique de façon à ce qu'il résiste mieux aux secousses sismiques et de mettre en place des mécanismes afin d'assurer un retour rapide à la normale en cas d'accident majeur. L'ilotage des réacteurs (ils s'alimentent eux-mêmes en électricité) pourrait aussi présenter des avantages certains lors de tels événements, car les centrales deviendraient alors autosuffisantes.

La résistance des infrastructures d'urgence au tsunami a clairement été sous-évaluée à Fukushima. En effet, si les génératrices au mazout étaient restées opérationnelles, le refroidissement des réacteurs et des piscines aurait pu être assuré en permanence. Ces systèmes d'urgence doivent donc être mieux protégés. Pour ce faire, plusieurs options se présentent incluant l'isolation des génératrices et des réservoirs dans des bâtiments résistants aux inondations comme cela se

fait déjà en Corée. La difficulté d'accéder à la piscine de stockage du combustible usagé, étant donné sa localisation dans le bâtiment réacteur (30 m au dessus du sol), a ralenti considérablement le travail des équipes d'intervention d'urgence à la suite des explosions hydrogène. Il faut donc s'assurer, lors de la conception de nouvelles centrales, que toutes les parties critiques de la centrale sont facilement accessibles en cas d'accident.

L'hydrogène qui s'est dispersé dans le bâtiment réacteur a causé de nombreux feux et explosions. Cette possibilité n'avait jamais été envisagée dans le design original, la présence d'hydrogène étant toujours limitée à l'enceinte de confinement primaire. Le contrôle de l'hydrogène doit donc être assuré, en tout temps et à tout point de l'édifice contenant le réacteur et la piscine, soit par des systèmes passifs (les recombineurs) ou des systèmes actifs (brûleurs, allumeurs).

La gestion d'accident doit aussi être revue afin de prendre en compte aussi bien les événements uniques que multiples. Il faut également prévoir les accidents qui impliquent plusieurs réacteurs simultanément. Des questions reliées à la disponibilité de personnel compétent auraient aussi pu se poser si un nombre élevé d'opérateurs et d'employés de la centrale avait péri à la suite de cette catastrophe naturelle. La création d'unités spéciales d'intervention régionales ou nationales et la prise en charge de la situation par le gouvernement, lorsque des situations d'accident hors norme se produisent, devraient être considérées sérieusement.

Le public doit être tenu informé en tout temps et les communications doivent demeurer ouvertes et factuelles. C'est d'ailleurs ce qui s'est produit à Fukushima. Cependant, le message doit être simplifié, notamment en ce qui concerne les doses émises à l'environnement. Les effets du rayonnement sur la santé et les unités utilisées pour les quantifier (mSv, Sv, Sv/h,

Sv/an, Rem, Gy, Bq) sont peu familiers pour la population en général. Certains auteurs<sup>[6]</sup> proposent d'utiliser plutôt des multiples de radioactivité naturelle (20 mSv serait équivalent à 7.5 fois la dose naturelle moyenne absorbée sur une période d'un an). Il est en effet contre-productif de distribuer aux médias de l'information qui devra être ensuite réinterprétée par des experts. Ceci est d'autant plus important si la population est déjà en état de choc à cause d'une catastrophe naturelle.

## CONCLUSIONS

D'un point de vue scientifique, l'accident malheureux de la centrale Fukushima a fait en sorte que tous les exploitants de réacteurs nucléaires sont à réévaluer la sûreté de leurs installations à l'aune de cet accident. Ceci les incitera certainement à déclasser plus rapidement les réacteurs ne pouvant rencontrer des critères de sûreté devenant de plus en plus sévères et à poursuivre le développement des systèmes de sûreté passive pour les réacteurs demeurant en exploitation (par exemple, l'utilisation de la convection naturelle pour assurer le refroidissement du réacteur en tout temps). Par ailleurs, les autorités chinoises ont décidé de limiter à quatre le nombre de réacteurs sur un site spécifique après avoir réalisé les problèmes de logistique reliés aux accidents multiples.

Un effort international est nécessaire afin de conserver et de rendre accessible la pléthore d'informations générée à la suite de cet accident. Un premier pas a d'ailleurs été fait dans cette direction par le ministère de la Santé du Japon qui a annoncé la création d'une base de données contenant toutes les informations de suivi médical et d'exposition de tous les travailleurs impliqués dans les travaux d'urgence à Fukushima. La mise en commun de cette information sera certainement très utile pour tous les chercheurs qui ont à coeur la protection du public et de l'environnement et permettra, nous l'espérons d'éviter qu'un tel accident ne se reproduise.

---

## RÉFÉRENCES

1. Pour plus d'informations reliées au déroulement des événements et à l'interprétation des observations faites à la centrale de Fukushima, consulter le site web de la Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) au <http://www.nisa.meti.go.jp/english/press/>
2. Japan Atomic Industrial Forum (JAIF) : <http://www.jaif.or.jp/english/>
3. Japan Nuclear Technology Institute (JANTI) : <http://www.gengikyo.jp/english/>
4. S. Glasstone, A. Sesonske, *Nuclear Reactor Engineering*, third edition, Krieger Publishing Company, Malabar, FI (1981).
5. On peut retrouver une description de l'échelle INES (International Nuclear and Radiological Event Scale) sur le site web du GNSSN (Global Nuclear Safety and Security Network) : <http://gnssn.iaea.org/default.aspx>
6. J. Buongiorno, R. Ballinger, M. Driscoll, B. Forget, C. Forsberg, M. Golay, M. Kazimi, N. Todreas, J. Yanch, *Technical Lessons Learned from the Fukushima-Daiichi Accident and Possible Corrective Actions for the Nuclear Industry: An Initial Evaluation*, MIT report MIT-NSP-TR-025, May 2011.