



**INSTITUTE FOR ENERGY AND  
ENVIRONMENTAL RESEARCH**

**WORLD INFORMATION SERVICE ON ENERGY**

6935 Laurel Avenue, Suite 201  
Takoma Park, MD 20912-4413  
USA

31-33 rue de la Colonie  
75013 Paris  
FRANCE

Tél. : (301) 270-5500  
Fax : (301) 270-3029  
e-mail : [ieer@ieer.org](mailto:ieer@ieer.org)  
<http://www.ieer.org>

Tél. : (33) 01 45 80 26 07  
Mob. : (33) 06 07 71 02 41  
e-mail : [yves.marignac@wise-paris.org](mailto:yves.marignac@wise-paris.org)

## Sûreté nucléaire en France post-Fukushima :

Analyse critique des Évaluations complémentaires de sûreté (ECS)  
menées sur les installations nucléaires françaises après Fukushima

par

**Arjun Makhijani, Ph.D.**

**Président, Institute for Energy and Environmental Research  
(Takoma Park, Maryland, USA)**

**Yves Marignac**

**Directeur de WISE-Paris  
(Paris, France)**

**Février 2012**

# Résumé

## Conclusions et recommandations

La catastrophe qui a frappé la centrale de Fukushima Dai-ichi au Japon le 11 mars 2011 a définitivement démontré qu'un scénario d'accident jugé jusque là trop improbable pouvait se réaliser. Pour répondre aux défaillances multiples et sans précédent de la sûreté nucléaire ainsi mises en évidence, le Gouvernement français a engagé très vite une démarche d'évaluation complémentaire de la sûreté (ECS) des principales installations nucléaires. Les rapports ECS des exploitants ont été publiés en septembre 2011 et leur analyse par l'IRSN a été publiée en novembre 2011. Ces mesures de transparence inédites, accompagnées d'une concertation dans les instances nationales et locales concernées, ouvrent la voie à une expertise pluraliste du dossier.

Le présent rapport dresse une analyse critique de la démarche conduite à travers les ECS, depuis leur cahier des charges jusqu'aux conclusions de l'IRSN, en s'appuyant notamment sur l'analyse menée par EDF sur les trois sites de Gravelines, Civaux et Flamanville couvrant les différents paliers du parc de réacteurs ainsi que le projet de réacteur EPR en construction, et sur l'analyse menée par Areva pour les usines de retraitement de La Hague. À ce stade, notre analyse porte sur le processus d'évaluation technique et n'étudie pas les premières conclusions et prescriptions qu'en a tirées l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) début janvier 2012. Vu les délais courts et les ressources limitées, nous n'avons pas cherché à examiner tous les sites ou tous les problèmes. En conséquence, nous avons ciblé certaines questions de sûreté essentielles et formulé des recommandations qui, nous espérons, apporteront des éléments utiles au débat français sur la sûreté nucléaire.

Les rapports ECS étudiés présentent des points forts qu'il est important de souligner. Pour la première fois, des hypothèses écartées à la conception et dans la conduite des installations sont envisagées et leurs conséquences examinées. Conformément au cahier des charges, ils étudient de façon systématique les scénarios d'accident grave qui pourraient être déclenchés par un séisme et/ou l'inondation, y compris dépassant le dimensionnement des installations, ainsi que l'ensemble des situations pouvant découler d'une perte des alimentations électriques et/ou des sources de refroidissement. Enfin, les dispositifs qui devraient être mis en place pour prévenir des rejets radioactifs importants sont décrits en détail, et des propositions de dispositifs de renforcement sont introduites. Par conséquent, les documents ECS fournissent un premier éclairage important sur la sûreté nucléaire en France et les mesures qui pourraient être nécessaires pour réduire les risques d'accidents graves telles qu'on doit les envisager après Fukushima.

### Principales conclusions

Notre analyse des évaluations complémentaires de sûreté confirme, au-delà des conclusions tirées dans leurs rapports par les exploitants, qu'à la lumière de Fukushima plusieurs scénarios d'accident majeur doivent être considérés comme plausibles :

- pour les 58 réacteurs en exploitation d'EDF, quelque soit le palier considéré :
  - un accident de fusion du cœur peut conduire à une rupture brutale de l'enceinte (fuite atmosphérique majeure) et/ou un percement du radier (contamination des eaux),
  - un accident de vidange de piscine d'entreposage peut conduire à un feu du combustible et à des rejets très importants faute d'enceinte de confinement de ce bâtiment ;
- pour le projet de réacteur EPR, les mêmes risques ne peuvent pas être totalement écartés ;
- pour les usines de retraitement de La Hague, un accident majeur peut se produire sur une piscine de combustible ou sur un stockage de déchets liquides hautement radioactifs.

Les rapports ECS constituent un bon point de départ pour envisager le renforcement de la sûreté des installations vis-à-vis de ces scénarios, mais ils présentent en l'état trop de limites et de lacunes pour fonder des décisions définitives.

À l'examen, le cahier des charges très limité et son interprétation par les exploitants ont en effet conduit à des faiblesses importantes dans les ECS :

1. Une réserve générale doit être posée sur les conclusions apportées par les exploitants, du fait d'une part des limites dans l'analyse de l'état réel des installations, et d'autre part que les démonstrations présentées n'ont dans l'ensemble pas pu s'appuyer sur de nouvelles études. De nombreuses conclusions reposent ainsi sur la justification par les « jugements d'experts » et la confiance des ingénieurs dans la qualité de la conception et de la construction des installations ;
2. Le tableau des déclencheurs et aggravations possibles de situations accidentelles n'est pas complet et les situations étudiées dans les ECS ne sont donc pas « enveloppe » des scénarios d'accident. Les éléments suivants manquent ou ne sont pas suffisamment développés dans les ECS :
  - a) les scénarios découlant de défaillances matérielles sur les équipements des installations, d'erreurs humaines et d'actes de malveillance,
  - b) les défaillances et agressions secondaires pouvant résulter d'un séisme et/ou une inondation et d'une perte d'alimentation électrique et/ou de refroidissement, notamment : (i) ruptures dans les circuits primaire et secondaire de refroidissement des réacteurs, (ii) chutes de charge (y compris d'un assemblage de combustible usé lors de son transfert ou d'un château de transport du combustible), (iii) incendies et (iv) explosions, y compris les explosions d'hydrogène dans les réacteurs et les explosions chimiques de « red oil » à La Hague.
3. Des facteurs susceptibles de rendre plus difficiles la gestion d'un accident, notamment la contamination sur le site due à la défaillance d'installations secondaires non-classées ne sont pas pris en compte. La contamination du site s'est révélée être un facteur important dans les difficultés auxquelles les autorités et le personnel se sont heurtés pour gérer l'accident de Fukushima. Celui-ci a aussi démontré que la contamination hors site peut compliquer la mobilisation des secours extérieurs et détourner les ressources, comme le personnel de protection. À ce titre, la réflexion menée dans le cadre des ECS doit conduire à une réévaluation des scénarios pour la planification de la gestion des conséquences immédiates de l'accident hors site et la gestion post-accidentelle à plus long terme.
4. Plusieurs questions génériques importantes ne sont pas examinées, dont :
  - a) les limites imposées par les choix non ou difficilement réversibles de conception, telles que le dimensionnement des enceintes des réacteurs ou celui des piscines d'entreposage du combustible sur les sites des centrales et à La Hague ;
  - b) le rôle que le vieillissement joue dans l'aggravation des conséquences des accidents. Les ECS sont basées sur un état théorique des installations mi-2011 et ne prennent pas en compte le vieillissement, qui augmente le risque de défaillance des dispositifs de sûreté et celui de rupture d'éléments matériels, y compris non remplaçables (cuve et enceinte des réacteurs).
5. En général, les propositions développées autour de l'idée de « noyau dur » pour l'alimentation électrique et le refroidissement, et du renforcement des moyens de gestion de crise répondent par l'aval sans réduire en amont le potentiel de danger. Il manque par exemple dans les ECS :
  - a) une réflexion sur des facteurs de risques tels que l'utilisation de gaines de combustible en zirconium. Le zirconium joue un rôle central dans les accidents de fusion et dans la production d'hydrogène lors de ces types d'accidents, comme cela s'est produit à Three Mile Island et à Fukushima, mais la possibilité de recourir à des matériaux alternatifs n'est pas abordée ;
  - b) une évaluation du facteur aggravant que constitue l'utilisation du combustible MOX ou du risque que génère l'entreposage concentré de grandes quantités de combustible, dont une part importante de MOX, à La Hague.

## Principales recommandations

Les documents ECS devraient être révisés selon un cahier des charges plus complet, qui inclut les agressions internes et externes, et la gestion des crises prenant en compte la contamination sur site et hors site. Les analyses présentées devraient également mieux identifier les marges d'incertitude pesant sur les conclusions et les moyens et délais envisagés pour les réduire. En outre, les ECS devraient prendre en compte l'état actuel des installations.

Élargir le cercle de l'expertise de ces dossiers nous semble nécessaire et constitue à terme un moyen de faire émerger et de mettre en débat une approche plus complète pour définir des nouvelles exigences de sûreté et leurs conditions de mise en œuvre. À ce titre, un processus de recensement systématique et de suivi des différents approfondissements et prolongements de la démarche ECS devrait être mis en place, et des revues indépendantes devraient être prévues aux étapes les plus critiques. Ce processus devrait en particulier couvrir la réalisation des améliorations des ECS recommandées ci-après.

**Les scénarios d'accident pour les réacteurs :** les rapports ECS d'EDF montrent des limites importantes dans l'étude des scénarios considérés. Outre les limites fixées par le champ et le cahier des charges des ECS, EDF écarte systématiquement toute hypothèse d'aggravation des scénarios par des agressions induites par le déroulement de l'accident. De plus, EDF écarte pour les réacteurs l'ensemble des phénomènes les plus redoutés de rupture de l'enceinte par explosion ou percement du radier pour ne retenir que le cas le moins pénalisant d'une montée en pression lente et d'une dépressurisation de l'enceinte. Enfin, EDF ne retient pour les piscines qu'une situation d'échauffement sans vidange qui ne conduit pas à un accident grave, alors que différentes hypothèses pouvant engendrer une vidange et conduire à des conséquences plus sérieuses doivent être envisagées.

***Recommandations sur les scénarios d'accident pour les réacteurs :***

1. Les études ECS d'EDF devraient être complétées pour analyser de façon déterministe différents scénarios écartés dans les rapports actuels. Ceci comprend notamment la possibilité d'autres initiateurs liés à des défaillances matérielles internes ou à une origine humaine, ainsi que le rôle potentiel d'incendies, explosions ou chutes de charge induits par les chaînes d'événements supposées dans les scénarios considérés.
2. Les rapports ECS devraient être complétés par l'analyse des conséquences potentielles des phénomènes d'explosion d'hydrogène ou de vapeur ou de traversée du radier envisageables en cas de fusion du cœur et actuellement écartés par EDF.
3. EDF devrait dans le cadre des ECS mener des études spécifiques aux sites sur les accidents et leurs conséquences pour les piscines de combustible usé. En particulier, le faible niveau de protection contre une vidange de piscine et ses conséquences devrait être pris en compte.

**Le zircaloy :** la gaine des crayons de combustible est faite d'un alliage, le zircaloy, composé principalement de zirconium. Le découverture du combustible suite à une perte du refroidissement de la cuve déclenche une série de phénomènes qui entraîne la fusion du cœur. Le zircaloy joue un rôle central dans le déroulement de ces événements ainsi que dans la production d'hydrogène et le risque d'explosion. Cependant aucun document ECS n'envisage les possibilités pour remplacer le zirconium comme matériau de gainage du combustible.

***Recommandation sur le zircaloy :***

1. Le rôle des matériaux de substitution devrait consister à éliminer ou largement réduire la génération d'hydrogène. Il en résulterait que la probabilité d'un accident grave avec des rejets radioactifs serait considérablement réduite. Un programme systématique de recherche et développement devrait être mis en place pour trouver un substitut au zircaloy avec pour objectif de significativement réduire la probabilité d'un accident grave entraînant la fusion du cœur.

**Le combustible MOX :** vingt-deux réacteurs, tous 900 MWe sont autorisés à utiliser, et vingt-et-un utilisent effectivement un combustible mixte de dioxyde de plutonium et d'uranium (MOX) jusqu'à 30 % du cœur du réacteur. Le combustible MOX pose un ensemble de problèmes de sûreté lors d'un accident, et l'entreposage du combustible usé MOX est plus compliqué de part sa charge thermique plus grande. Les conséquences de la fusion du cœur chargé en combustible MOX ou d'incendies de combustible usé MOX pourraient aussi être beaucoup plus graves que celles avec du combustible de dioxyde d'uranium (UOX). Les documents ECS ne prennent pas compte de ces différences. Cette problématique est importante pour tous les réacteurs chargés en MOX, mais encore plus pour le site de Gravelines, où six réacteurs sont autorisés à utiliser du MOX et cinq d'entre eux l'utilisent. Cette situation est également importante pour La Hague, où au moins 900 tonnes de MOX, principalement du combustible usé, sont

entreposées. Cela représente plus que le MOX engagé ou entreposé dans l'ensemble des sites utilisant le combustible MOX. Bien que la charge thermique du combustible MOX utilisé entreposé sur les sites des réacteurs soit trop grande pour être entreposé à sec, la plupart du MOX à La Hague pourrait être entreposée de cette façon. L'entreposage à sec présente globalement une meilleure sûreté que l'entreposage en piscine.

### ***Recommandations sur le MOX :***

1. Les risques et les conséquences de l'utilisation du MOX, y compris le combustible utilisé MOX, doivent être évalués explicitement dans le cadre du processus des ECS.
2. La réduction des risques qui accompagnerait l'arrêt de l'utilisation du combustible utilisé MOX devrait être également considérée dans les ECS.
3. En outre, la réduction de la quantité de combustible utilisé entreposé dans les piscines permettrait également de réduire les risques et les conséquences d'accidents de piscine d'entreposage du combustible utilisé. Les ECS devraient examiner la diminution du risque que pourrait procurer l'entreposage à sec une fois suffisamment refroidi, sur les sites ou à La Hague, du combustible MOX utilisé.

**La conception et le dimensionnement des réacteurs :** les choix de conception et de dimensionnement qui ont été retenus lors de la construction des différentes installations ont un rôle déterminant sur leur capacité à résister aux scénarios non envisagés à l'époque considérés dans les ECS. Par exemple :

a) Des différences ont été introduites entre les différents paliers du parc de réacteurs d'EDF. Les réacteurs 1 300 et 1 450 MWe ont une double paroi de béton respectivement précontraint et armé alors que les réacteurs 900 MWe ont une simple paroi en béton armé dont la surface intérieure est recouverte d'une peau métallique destinée à assurer l'étanchéité. La double paroi a été conçue notamment pour mieux résister aux agressions externes. Par contre, l'absence de peau métallique intérieure est susceptible de les rendre plus vulnérables aux agressions internes telles qu'une explosion d'hydrogène. EDF n'a pas examiné les conséquences en termes de robustesse de ce type de différences dans le dimensionnement des paliers du parc français.

b) Les piscines d'entreposage du combustible utilisé n'ont pas été conçues et ne sont pas traitées avec le même degré de préoccupation vis-à-vis de la sûreté que les réacteurs, car durant les premières décennies de l'énergie nucléaire, seuls les accidents de réacteurs étaient considérés comme importants. Par conséquent, les piscines et les bâtiments combustibles ne sont pas dimensionnés au même niveau que les enceintes de confinement des réacteurs et n'offrent donc pas le même degré de résistance aux agressions externes ou internes. Fukushima a clairement démontré les risques associés aux piscines de combustible utilisé. De plus, la quantité des radionucléides à vie longue du combustible en piscine, notamment l'inventaire du césium 137 (le principal contaminant à vie longue après Tchernobyl et Fukushima) à La Hague est beaucoup plus important que dans n'importe quel réacteur. Face à cette situation, il convient à la fois de réfléchir au renforcement et d'adapter les méthodes de gestion.

### ***Recommandations sur la prise en compte des choix de conception :***

1. Les ECS d'EDF devraient rendre compte des différences de conception et de dimensionnement et de leurs conséquences sur la capacité des installations à résister aux agressions internes et externes, afin de mesurer les écarts de robustesse des installations à différents scénarios d'accident grave envisagés dans le cadre des ECS actuelles et de leur révision.
2. Cette analyse devrait soutenir des réflexions sur les possibilités techniques et la faisabilité de renforcement des éléments constitutifs les moins robustes en cherchant à atteindre un niveau aussi élevé et homogène que possible des installations. Il s'agit notamment de palier aux faiblesses respectives des différents bâtiments (enceintes en fonction de leurs caractéristiques et bâtiments combustibles).
3. Parallèlement des réflexions doivent être menées pour adapter la gestion. Ainsi, le temps de refroidissement d'un cœur de réacteur avant son transfert dans la piscine devrait être révisé avec

comme objectif le maintien des rejets d'iode 131 à un niveau aussi bas que possible dans l'éventualité d'un accident. De plus, des études devraient explicitement évaluer quels arrangements du combustible usé dans la piscine réduiraient les risques de propagation d'un incendie.

**Les écarts de conformité et le vieillissement :** l'existence d'écarts entre le référentiel des installations sur lequel est basée l'évaluation de sûreté et leur état réel induit un risque important qui ne peut être réduit qu'en améliorant la connaissance détaillée des écarts pour les traiter d'une part, et en prenant en compte la possibilité d'écarts non détectés d'autre part.

De plus, le vieillissement et l'usure des différents dispositifs participant à la sûreté réduisent régulièrement les marges de sûreté réputées acquises à la conception et à la construction. À ce titre, il convient de rappeler que les réacteurs ont été conçus pour fonctionner au moins 30 ans mais pas plus de 40 ans. Or le vieillissement fragilise notamment des éléments non remplaçables et abaisse leur seuil de rupture aux chocs thermiques ou mécaniques, réduisant les marges de sûreté. Aucun renforcement ne semble à même de repousser les limites imposées par le vieillissement. Ainsi certaines enceintes des 1 300 MWe et 1 450 MWe apparaissent déjà dégradées, tandis que pour les cuves de plusieurs réacteurs de 900 MWe les marges estimées vis-à-vis du risque de rupture apparaissent parfois insuffisantes avant 40 ans. Par ailleurs, l'usure continue de l'ensemble des équipements crée un risque diffus et croissant avec le temps de défaillance de la sûreté.

#### ***Recommandations sur les conformités et le vieillissement :***

1. La démarche d'examen de conformité entreprise dans le cadre des rapports ECS doit être approfondie pour intégrer, au-delà du référentiel actuel, l'ensemble des éléments entrant en jeu dans les scénarios ECS ainsi que leurs supports. L'impact des non conformités connues ou envisagées devra être discuté.
2. Les mécanismes de vieillissement doivent être pris en compte dans la démarche ECS. Il s'agit d'une part d'envisager l'impact des mécanismes de vieillissement connus et identifiés sur les scénarios d'accident, et d'autre part d'étudier la sensibilité des scénarios d'accident à des défaillances dues à des effets de vieillissement non décelés. En particulier, les ECS devraient analyser la contribution potentielle de ces problèmes à l'apparition ou à l'accélération d'effets faibles dans les scénarios.
3. Le rôle des écarts de conformité et des effets du vieillissement dans la dégradation de la robustesse va à l'encontre de l'objectif de renforcement. La réflexion sur la définition de nouvelles exigences de sûreté doit prendre en compte ces phénomènes pour chercher à mieux définir les seuils acceptables dans ce domaine.

**Le réacteur EPR :** Le projet de réacteur EPR en cours de construction à Flamanville a été conçu dès l'origine pour mieux résister aux agressions diverses et réduire à la fois la probabilité et les conséquences de scénarios d'accidents graves. Toutefois, sa conception doit être confrontée au retour d'expérience de Fukushima. Des premiers éléments de discussion sont apparus sur l'implantation vulnérable à l'inondation de ses diesels de secours, sur la protection de sa salle de commande contre un accident du cœur ou sur le degré de sûreté de sa piscine d'entreposage. En amont de cette discussion, il faut rappeler que la démonstration générique de la sûreté de l'EPR n'est pas achevée sur des points aussi cruciaux que son système de contrôle commande ou son dispositif innovant de récupérateur de corium. Par ailleurs, le chantier de construction a été affecté par de nombreux problèmes entraînant d'importantes non conformités.

#### ***Recommandations pour l'EPR :***

1. Le rapport ECS d'EDF pour le projet de réacteur EPR devrait fournir un état aussi précis que possible des sujets restants ouverts dans le cadre de l'instruction du rapport de sûreté du réacteur. Ce bilan devrait permettre d'apprécier la sensibilité des résultats proposés par EDF aux incertitudes de cette instruction.
2. De même, le rapport ECS d'EDF pour l'EPR devrait fournir un état aussi précis que possible des non conformités identifiées au cours du chantier de construction et de leur traitement passé ou à venir. Le rapport devrait étudier au moins pour les plus importants d'entre eux leur influence sur le comportement du réacteur dans les scénarios considérés par les ECS, en particulier les éventuels effets

falaise ou les effets cumulatifs. De plus, considérant le risque que des non conformités ne soient pas décelées au cours du chantier, une analyse de sensibilité des résultats des ECS à des défauts non décelés devrait être proposée.

3. Par ailleurs, le champ des scénarios envisagés pour l'EPR devrait s'élargir pour prendre en compte l'ensemble des éléments recommandés plus haut pour les réacteurs existants (initiateurs, agressions induites, conséquences déterministes des phénomènes redoutés...).

**Les usines de retraitement de La Hague :** Mis à part le combustible usé stocké sur site, La Hague dispose d'un vaste inventaire de déchets liquides hautement radioactifs qui doivent être refroidis. La perte totale du refroidissement pendant plusieurs jours pourrait entraîner une explosion avec possibilité de dispersion de contamination sur une vaste étendue. En 1957, l'explosion d'une cuve contenant des déchets de retraitement en Union Soviétique a entraîné une contamination qui perdure des sols d'une vaste région. Les autorités norvégiennes en matière de radioprotection ont estimé qu'un rejet des déchets liquides hautement radioactifs stockés à Sellafield, au nord-ouest de l'Angleterre, pourrait produire une contamination au césium-137 correspondant à un dixième au moins et jusqu'à cinquante fois des retombées de l'accident de Tchernobyl en Norvège.

Par ailleurs, de « l'huile rouge » (ou « red oil ») est formée quand un mélange de produits chimiques organiques entre en contact avec de l'acide à des températures élevées. Le contrôle du flux des matières et de la température, ainsi que la capacité d'effectuer des mesures sont importantes pour éviter les explosions de red oil. Dans le passé, plusieurs se sont produites aux États-Unis, et plus récemment en Russie en 1993, lorsqu'une partie d'un bâtiment de retraitement a été détruite par la force de l'explosion. L'IRSN a publié un document technique sur ces sujets en 2008. Pourtant, Areva n'a pas examiné le problème des explosions de red oil dans le cadre de l'ECS post-Fukushima, c'est-à-dire dans le contexte de perte totale de refroidissement et/ou de l'alimentation électrique.

#### ***Recommandations pour La Hague :***

1. L'analyse ECS menée par Areva pour le site de La Hague devrait être renforcée sur les accidents et leurs conséquences pour les piscines de combustible usé. Le faible niveau de protection contre une vidange de piscine et ses conséquences devrait être pris en compte.
2. Areva devrait également examiner les arbres de défaillances des accidents potentiels, pour que des mesures d'atténuation plus complètes puissent être mises en place.
3. Areva devrait envisager la possibilité d'entreposage de faible densité du combustible usé dans ses piscines, laquelle augmenterait considérablement les délais d'ébullition, combiné avec l'entreposage à sec du combustible usé.
4. Areva devrait étudier la possibilité de réduire l'inventaire de l'entreposage du combustible usé à La Hague en favorisant des inventaires plus importants sur les sites des réacteurs en configuration à faible densité dans les piscines avec le reste en entreposage à sec. L'inventaire à la Hague pourrait être réduit au minimum des quantités requises pour des opérations de retraitement facilement gérables.
5. Si possible, certains termes sources secondaires mais quand même importants, devraient être éliminés dans des délais plus rapides, éliminant ainsi des sources, qui pourraient aggraver la gestion des situations accidentelles.