

## Sûreté du réacteur EPR

Une récente polémique a porté sur la question de la prise en compte du risque de chute d'un avion gros porteur sur le réacteur EPR. « Sauvons le Climat » avait, à l'époque (voir le communiqué de « Sauvons le Climat » du 25/03/08 sur le site <http://www.sauvonsleclimat.org>), rappelé un de ses anciens communiqués démontrant qu'effectivement un tel risque avait bien été pris en compte. Une ingénieure d'EDF nous avait alors signalé que le Rapport Préliminaire de Sûreté (RPS) de l'EPR était disponible sur le site de l'EDF. Elle a bien voulu extraire les points essentiels de ce rapport pour « Sauvons le Climat ». Nous l'en remercions et présentons ce résumé ci-dessous. La responsabilité de Sauvons le Climat n'est, bien entendu, pas engagée ni par le texte ci-dessous, ni par le Rapport Préliminaire de Sûreté d'EDF qu'il résume.

### Prise en compte des agressions internes et externes dans les études de sûreté EPR

*Hélène GUEGUIN*

*EDF - DIN*

*Centre National d'Équipement Nucléaire*

*Service Contrôle Commande*

*165-173 avenue P Brossolette*

*92 542 Montrouge*

Les agressions internes et externes ne doivent pas constituer une part importante du risque de fusion du cœur ni de rejet radioactif inadmissible. L'atteinte de cet objectif est rendu possible sur le parc en exploitation par un ensemble de moyens et de procédures dits « d'urgence », mis en œuvre à la suite de l'accident de Three Miles Island aux États-Unis. Sur le projet EPR, l'Autorité de sûreté a demandé que cet objectif soit pris en compte dès la conception.

**Important : Toutes les informations du présent document sont disponibles dans le Rapport préliminaire de sûreté version publique consultables sur [www.edf.com/html/epr/rps/index.pdf](http://www.edf.com/html/epr/rps/index.pdf)**

#### *Les agressions internes*

Les agressions internes prises en compte dans le dimensionnement sont les suivantes :

- l'incendie,
- l'inondation,

- les ruptures de tuyauteries haute énergie, de réservoirs, pompes et vannes,
- les missiles et explosions internes,
- les chutes de charge.

Remarque : les agressions internes sont considérées de la même manière que les défaillances de composants et de système. Le cumul d'une agression et d'une défaillance avec la réalisation systématique d'opérations de maintenance, réacteur en marche, des systèmes de sûreté, conduit obligatoirement à une installation de l'îlot nucléaire à quatre trains de sûreté (sur les réacteurs existants, équipés de deux trains de sûreté, leur maintenance se fait obligatoirement à l'arrêt).

Un récapitulatif de l'ensemble des agressions prises en compte est présenté en annexe 1.

### *Les agressions externes*

Les agressions externes considérées dans la conception de l'installation et dans la démonstration de sûreté sont les suivantes :

- Les séismes,
- Les chutes d'avion,
- Les explosions externes,
- La foudre et les interférences électromagnétiques,
- Les remontées de nappe phréatique
- Les inondations externes,
- La sécheresse et la formation de glace,
- Les gaz toxiques, corrosifs ou inflammables
- Les conditions météorologiques extrêmes (température, neige, vent, pluie, ...).

Elles sont étudiées, comme sur le parc en exploitation, par des cas de charge<sup>1</sup> représentatifs des différentes agressions définies ci-dessus. Pour chacun de ces cas de charge, les mesures de prévention ou de protection sont complétées par une analyse détaillée des conséquences, tant sur l'installation que pour l'environnement extérieur.

L'EPR apporte sur cette prise en compte du risque d'agression externe, les améliorations suivantes :

- **Cas de charge supérieurs** : les niveaux des cas de charge retenus pour le dimensionnement de l'EPR sont au moins égaux à ceux pris en compte sur le Parc en exploitation, et souvent significativement supérieurs notamment pour les agressions externes (séisme, explosion externe, avion).

---

<sup>1</sup> Les cas de charge (mécaniques, thermiques) correspondent aux efforts et moments, déformations imposées ou aux distributions de températures non uniformes dans la mesure ou ils induisent des contraintes et des déformations des composants

- **Le retour d'expérience** des événements rencontrés sur les tranches en exploitation : il est naturellement pris en compte , ce qui est un des avantages d'un projet qui se situe dans la continuité du parc existant.
- **Cumuls entre agressions et événements internes ou externes** : la prise en compte de cumuls d'évènements est développée. Elle se traduit par le renforcement de certaines des exigences de conception des matériels (élargissement des critères de classement, permettant d'exclure le risque) ou des études de scénarios.
- **Anticipation des évolutions climatiques** : de manière générale, la problématique liée à l'évolution du climat est prise en compte dès la conception sur EPR. L'anticipation des évolutions climatiques permet notamment de retenir des cas de charge suffisamment enveloppes vis-à-vis des agressions externes de type « météorologiques » (grands chauds, grands froids, grand vents, inondations, autres agressions de site). Compte tenu de la durée de fonctionnement envisagée d'une tranche EPR (60 ans) ce sont des projections « fin de siècle » qui sont analysées sur la base des modèles climatiques nationaux et internationaux disponibles à ce jour.

Un récapitulatif de l'ensemble des agressions prises en compte est présenté en annexe 1. Ci-après, on détaille quelques cas d'agressions externes

### *Quelques cas d' agressions externes*

- **Séisme** : le niveau de séisme, caractérisé par l'accélération horizontale en champ libre, est pris égal à  $0,25g^2$  contre  $0,15g$  pour le Parc actuel. Cette valeur a été retenue à l'origine pour permettre au réacteur EPR d'être construit dans des pays où les risques sismiques sont nettement supérieurs à ceux encourus en France. Pour les sites en France, ce choix induit une robustesse supplémentaire.

La fréquence d'occurrence du « Spectre De Dimensionnement » - SDD - de  $0,25g$  sur le site de Flamanville a été déterminée en s'appuyant sur les statistiques de l'ensemble des séismes historiques survenus sur le dernier millénaire (inférieurs à  $0,25g$ ) et en majorant fortement les effets de ces séismes historiques (translation au plus près du site, majoration de l'intensité). Au final, on considère que le choix d'un SDD calé à  $0,25g$  pour le dimensionnement de l'îlot nucléaire EPR sur le site de Flamanville conduit à se prémunir d'un événement sismique d'une fréquence inférieure ou égale à  $10^{-5}$ /année.réacteur.

---

<sup>2</sup> l'accélération horizontale en champ libre est un paramètre standard des normes de construction parasismique (il n'existe aucune formule simple permettant de le lier directement à la magnitude traduite par l'échelle de Richter mieux connue du grand public).

Le dimensionnement au séisme de l'installation est réalisé selon une démarche déterministe conservative, tant sur le plan des chargements que sur celui des méthodes et des critères. Dans ces conditions, ce dimensionnement conduit, vis-à-vis du comportement de l'installation, à un niveau de confiance au moins égal à celui garanti par la mise en œuvre de méthodes probabilistes utilisées généralement en vérification d'installations existantes

Sur cette base, le dimensionnement au séisme de l'installation conduit à une probabilité conditionnelle de conséquence inacceptable, pour un événement du niveau du SDD, inférieure (voire très inférieure) à  $5.10^{-2}$ .

Compte tenu des éléments précédents, le risque de fusion lié au séisme est estimé, pour la tranche EPR de Flamanville, inférieur à  $5.10^{-7}$ /année réacteur ( $10^{-5} * 5.10^{-2}$ ).

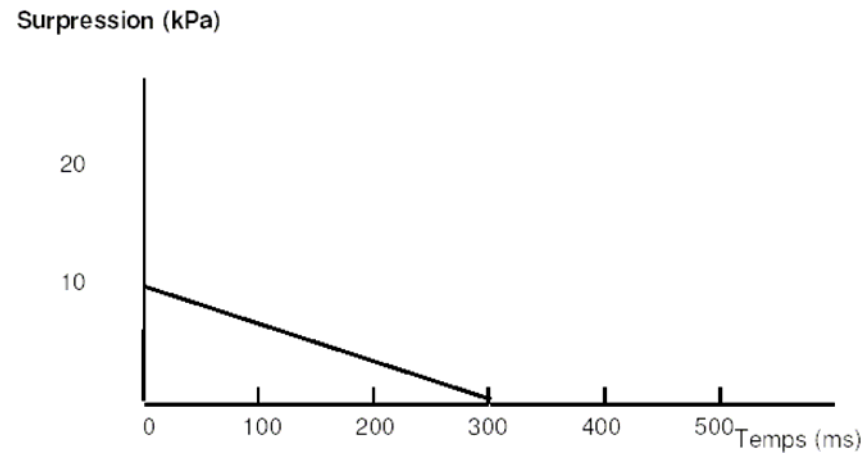
• **Explosions externes** : le cas de charge retenu correspond à une onde de pression significativement plus contraignante que sur le Parc : onde de pression triangulaire à front raide de 100 mbar / 300 ms

- Pour une explosion sur place (sans dérive de nuage au préalable) l'approche est déterministe : la conception de l'enceinte réacteur et la protection envisagée des différentes fonctions de sûreté permet de repousser le seuil d'intégrité de ces dernières à 100 mbar.

- Lorsque la distance d'impact est supérieure, l'étude probabiliste est nécessaire. L'analyse probabiliste consiste à évaluer la fréquence d'occurrence d'un accident tout en prenant en compte les fréquences d'occurrence des conditions météorologiques qui régissent la dispersion du nuage toxique ou explosif (cas de la dérive du nuage).

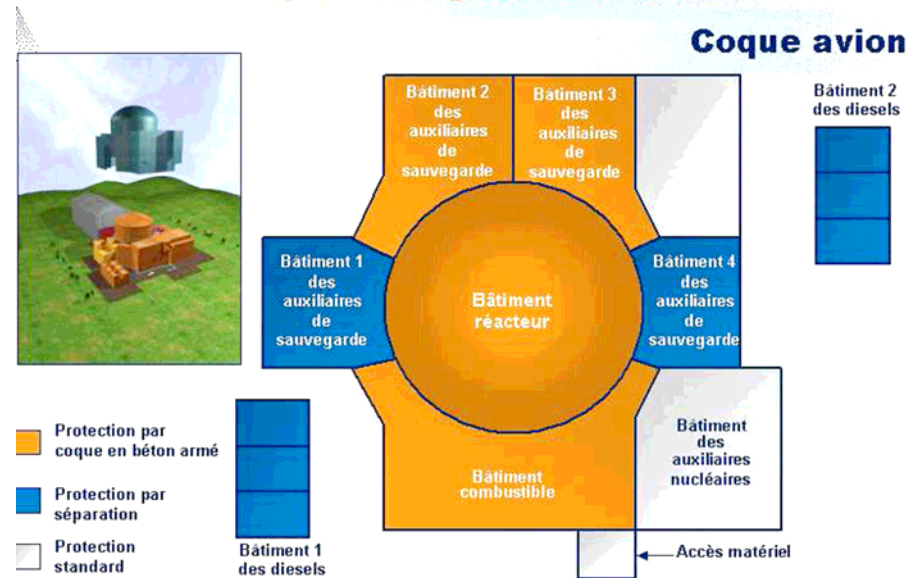
La probabilité d'agression d'une des fonctions de sûreté est, selon cette étude, de l'ordre de  $5.10^{-10}$ /année réacteur (cette valeur inclut aussi les risques industriels et voies de communications).

FIG 3 : DIAGRAMME DE CHARGEMENT DE L'ONDE DE SURPRESSION



• **Chute d'avion** La prise en compte de la chute d'avion sur EPR conduit à la conception d'une « Coque avion » destinée à protéger l'îlot nucléaire de cet événement. Pour l'EPR, la démarche générale d'amélioration significative de la sûreté a conduit à considérer le risque aérien (commercial compris) dans sa totalité indépendamment de la probabilité d'occurrence de l'événement, la protection de l'installation étant assurée soit par séparation géographique soit par l'existence d'un écran physique « coque avion ». Cette approche permet par conséquent la prise en compte à la conception d'un risque de chute d'avion commercial volontaire - risque rendu plus prégnant suite aux attentats du 11 septembre 2001.

## Prise en compte des agressions externes



Quelques extraits du RPS Chapitre 3 (version publique) en annexe 2 détaillent ce point

### Conclusions

L'amélioration de la défense en profondeur du réacteur EPR permet d'atteindre une fréquence globale de fusion du cœur inférieure à  $10^{-5}$  par année et par réacteur, en prenant en compte toutes les incertitudes et tous les types de défaillances et d'agressions internes et externes.

Le positionnement de l'EPR par rapport au parc nucléaire EDF en exploitation –dont le niveau de sûreté est déjà très élevé et conforté par des dizaines d'années de retour d'expérience - peut se résumer en deux points:

- Les accidents de fusion du cœur fortement énergétiques, très fortement improbables, mais susceptibles de conduire à des conséquences inacceptables sur le parc en exploitation, sont pratiquement éliminés sur EPR.
- les calculs de conséquences radiologiques réalisés sur EPR pour les accidents graves pris en compte à la conception mettent en évidence un gain supplémentaire par rapport au parc en exploitation.\*

*\* Ces objectifs probabilistes pour EPR correspondent grossièrement à un gain d'une décade par rapport aux cibles retenues pour le Parc nucléaire EDF en exploitation. De même le gain en terme de conséquences radiologiques est estimé à un facteur 10 pour un accident comme la RTGV (accident rupture GV) par rapport au Parc.*

## Annexe 1 : Tableau de synthèse des agressions établi à partir du chapitre 18 du RPS version publique

Agressions internes	Fréquence de fusion du cœur. (r.a.)	Remarques	Agressions externes	Fréquence de fusion du cœur. (r.a.)	Remarques
Missiles internes : - missile turbine - autres	résiduelle sur la base d'une analyse qualitative analyse qualitative	la conception mécanique de la turbine et les dispositions concernant le contrôle et l'exploitation permettent de ne pas retenir le risque d'émission de projectiles	Séisme	$\approx 5.10^{-7}$	Voir page précédente
			Chute d'avion	$6,6.10^{-8}$	Voir annexe et page précédente
			Risques industriels-explosion externe	$5.10^{-10}$	Analyse basée sur une estimation enveloppe du risque de fusion du cœur engendré par l'environnement industriel et les voies de communication. Voir page précédente pour l'explosion externe
Chute de charge	analyse qualitative	Le risque associé à la chute de charge fait l'objet d'une analyse qualitative préliminaire basée sur les dispositifs de conception	Inondation externe	résiduelle	Les causes d'inondation externes sont -la houle: les dispositifs pris en compte à la conception (hauteur de la digue pare-houle) et la configuration du chenal d'amenée sont suffisants pour écarter le risque lié à la houle y compris en situation de tempête. - <b>Elévation du niveau de la mer :la démarche générale consiste à identifier les marges disponibles à échéance de 2030, en prenant en compte de façon enveloppe les évolutions climatiques. La quantification des marges existantes permet alors d'estimer la probabilité de dépassement du niveau de calage des équipements de la plate-forme de l'îlot nucléaire et de la station de pompage.</b> Les analyses montrent que les marges disponibles par rapport aux projections d'élévation du niveau de la mer sont importantes et permettent de couvrir les évolutions climatiques. <u>Le dépassement du niveau est hautement improbable.</u>
Explosions internes	sera analysé ultérieurement (caractère résiduel à confirmer)	Les dispositions prises en compte à la conception permettent néanmoins d'affirmer que le risque associé à cette agression devrait être résiduel	Condition climatiques extrêmes :  - canicule  - grands froids, neige et vent  - frasil - prise en glace  Foudre  Colmatage station de pompage	résiduelle	Les probabilités de dépassement des températures de dimensionnement à Flamanville à horizon 2030 ont été déterminées par extrapolation. Les valeurs obtenues sont suffisamment faibles pour repousser le risque associé dans le domaine résiduel.  Une analyse simplifiée du risque engendré par les grands froids, la neige et le vent sur Flamanville 3 a été conduite. De plus l'impact des agressions que sur les situations de perte de source froide et de perte totale des alimentations électriques externes est évalué dans l'étude probabiliste long terme de ces situations  Une analyse simplifiée probabiliste du risque engendré par le frasil sur Flamanville 3 a été réalisée l'épaisseur de glace conduisant à une perte de source froide dommageable à la sûreté de la tranche, est suffisamment importante pour écarter le risque
Incendie	$6,4.10^{-8}$	Une évaluation probabiliste du risque lié à l'incendie a été réalisée Les fréquences de base des départs de feu ont été calculées à partir de l'analyse des incidents survenus sur le parc nucléaire en exploitation			
Inondation interne	$2.10^{-8}$	La contribution de l'inondation interne au risque global est faible pour les tranches de conception récente (meilleure séparation physique des équipements redondants,...) Une évaluation probabiliste a cependant été menée en considérant que l'ensemble des équipements contenus dans un bâtiment affecté par l'inondation est perdu.			
Total	$8,4.10^{-8}$	Total			
Total		<b><math>7,2.10^{-7}</math></b>	Colmatage station de pompage	inclus dans le résultat de l'EPS N1	EPS niveau 1 :étude probabiliste de sûreté permettant d'identifier les séquences menant à la fusion du cœur et d'en quantifier leur fréquence
Total				$6,4.10^{-7}$	



Remarque : le terme de résiduel dans ce tableau signifie soit que le risque est écarté de façon déterministe, au titre des dispositions prises en compte à la conception, soit que le risque est repoussé dans un domaine de probabilité d'occurrence extrêmement faible, dit « résiduel »

## Annexe 2 : Extrait du RPS chapitre 3 sur la prise en compte du risque de chute avion

L'approche de la protection contre la chute d'avion est d'abord déterministe et basée sur des cas de charge associés à différentes familles d'avions. La protection est obtenue par un dimensionnement, vis-à-vis de ces cas de charge, des bâtiments classés sûreté ou par séparation géographique des systèmes redondants.

Les ouvrages de l'îlot nucléaire EPR renfermant les équipements nécessaires à l'atteinte de l'état sûr du réacteur et à la prévention de la fusion du cœur sont protégés vis-à-vis des risques induits par le trafic aérien.

Conformément aux termes de la RFS I.2.a, la prise en compte de ce risque s'appuie sur la répartition du trafic aérien en trois familles d'avions qui sont l'aviation générale (avions de masse inférieure à 5,7 tonnes), l'aviation militaire et l'aviation commerciale. La probabilité d'un dégagement inacceptable en limite de site à la suite d'une agression de ce type sert de base à la définition du cas de charge servant au dimensionnement de l'installation.

Pour l'EPR, la démarche générale d'amélioration significative de la sûreté a conduit à considérer le risque aérien dans sa totalité (à savoir militaire et commercial) indépendamment de la probabilité d'occurrence de l'évènement, la protection de l'installation étant assurée soit par séparation géographique soit par l'existence d'un écran physique appelé « coque avion ».

**Dans le cadre de l'aviation militaire** qui constitue le cas de charge initial, l'orientation retenue au niveau de la protection de l'installation vis-à-vis de l'impact direct est la suivante :

- Protection complète pour les bâtiments susceptibles de contenir du combustible. Cette protection est assurée par une « coque avion » : c'est le cas du bâtiment réacteur et du bâtiment combustible,
- Protection pour les bâtiments renfermant des systèmes de sauvegarde, soit par leur protection par la coque avion, soit par

- La courbe C2 est, quant à elle, représentative d'un impact sur cible rigide et est utilisée pour vérifier la résistance ultime locale à la perforation des murs extérieurs avec une marge réduite. La démonstration de sûreté correspondante peut s'appuyer sur l'existence de murs ou parois situés sous la coque avion dans les bâtiments protégés.

**Dans le cadre de l'aviation commerciale** qui constitue un cas de charge complémentaire introduit à la suite des événements du 11 septembre 2001, la conception initiale a été vérifiée et adaptée pour tenir compte de l'ensemble des conséquences directes, indirectes et différées de l'agression. La définition d'un cas de charge correspondant a permis de confirmer la capacité de l'îlot nucléaire EPR et de son architecture générale à résister à une telle agression. Par contre, elle a conduit à un renforcement généralisé de la protection de l'installation vis-à-vis de l'impact direct et de ses conséquences.

En conclusion, les risques induits par l'ensemble du trafic aérien issus de l'aviation générale, militaire et commerciale sont pris en compte dans la conception de l'EPR.

### 3.2. ANALYSES DE SURETE

La vérification que les dispositions de dimensionnement sont suffisantes en termes de sûreté et d'exigences réglementaires est réalisée en suivant une méthodologie similaire à celle utilisée pour d'autres réacteurs français à eau sous pression. Le résultat de l'étude est présenté au § 8.

La vérification que les dispositions de dimensionnement sont suffisantes concernant les exigences complémentaires est réalisée dans un document spécifique à usage restreint.

une séparation géographique suffisante des systèmes de sauvegarde redondants,

- Intégration des équipements classés F1 et non redondants dans les bâtiments protégés par la coque avion : cela concerne principalement la salle de commande.

L'exigence de protection vis-à-vis du risque aérien est décrite dans le chapitre 3.5.0. Elle distingue les bâtiments protégés par séparation géographique et ceux protégés par la « coque avion ». Pour le dimensionnement des structures de protection de ces derniers bâtiments, l'impact de l'avion a été modélisé au travers de deux courbes (force en fonction du temps) C1 et C2.

Ces diagrammes de charge (figures de la section 3.5.0) ont pour objectif de représenter deux types d'effet qui sont, d'une part, un effet local de perforation au droit de l'impact et, d'autre part, un effet global de vibrations induites dans les bâtiments. Ils sont utilisés de la manière suivante :

- La courbe C1 sert au dimensionnement des structures internes des bâtiments vis-à-vis des vibrations induites. En prenant l'hypothèse, d'une part, d'un comportement élastique linéaire du matériau et, d'autre part, de différents points d'impact de l'avion sur chaque mur extérieur de protection, le spectre de réponse de la structure est déduit et est utilisé pour le dimensionnement des équipements concernés. Le découplage des structures internes des bâtiments concernés vis-à-vis des murs extérieurs supportant l'impact permet de réduire la sollicitation des équipements qui doivent être protégés.
- Pour les mêmes bâtiments, la courbe C2 est utilisée pour le dimensionnement des murs extérieurs vis-à-vis des charges générées par l'impact direct de manière à assurer, d'une part, qu'il n'y a ni pénétration ni création de missiles secondaires et, d'autre part, que les déformations des armatures et du béton restent limitées.

FIG 2 : DIAGRAMME DE CHARGEMENT DE L'AVIATION MILITAIRE

