

Fontenay-aux-Roses, le 14 mars 2017

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2017-00087

Objet : Risques liés aux tornades sur les installations d'AREVA, du CEA et d'EDF
Méthodologie de prise en compte des effets sur les structures de génie civil
et les équipements.

Réf. Lettre ASN CODEP-DRC-2016-015589 du 15 avril 2016

Par lettre citée en référence, l'autorité de sûreté nucléaire (ASN) demande l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les éléments méthodologiques présentés par AREVA, le CEA et EDF concernant :

- la définition du niveau de l'aléa tornade et, in fine, des niveaux d'aléa tornade pouvant être retenus au titre du dimensionnement des installations et des équipements relevant du noyau dur ;
- la prise en compte des effets des tornades sur les structures, systèmes et composants (SSC).

La réponse de l'IRSN à cette demande fait l'objet de deux avis distincts :

- un premier avis porte sur « les aléas » retenus par les exploitants (AREVA, CEA et EDF) pour considérer le phénomène de tornade ;
- le présent avis concerne l'évaluation par l'IRSN des méthodologies proposées par ces exploitants pour déterminer les effets des tornades sur les SSC. Toutefois, les effets d'une tornade sur la fonctionnalité d'équipements, tels que les ventilations, ne sont pas traités. Le comportement de tels équipements sous l'effet d'une tornade, qui dépend de l'installation considérée, est en effet un sujet spécifique qui sera à examiner au cas par cas. L'identification des cibles à protéger des tornades n'est également pas traitée dans le cadre de cet avis, pour les mêmes raisons.

L'examen des dossiers des exploitants par l'IRSN porte plus particulièrement sur la détermination des différents effets d'une tornade, leurs cumuls et sur les méthodes servant à analyser le comportement des SSC.

Adresse Courrier
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex France

Siège social
31, av. de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses

Standard +33 (0)1 58 35 88 88
RCS Nanterre 8 440 546 018

A la fin de l'instruction, les exploitants ont transmis, sur un certain nombre de points, des positions et engagements qu'ils doivent confirmer à l'ASN.

Définition des effets d'une tornade

Pour déterminer leurs effets sur les SSC, les tornades sont caractérisées par la vitesse maximale du vent de tornade (V_m), le rayon de vortex associé (R_m), la variation maximale de pression atmosphérique (ΔP_{max}) et la vitesse de variation de pression ($\Delta P/\Delta t$).

Les méthodes proposées par les trois exploitants pour déterminer ces effets sont très similaires et basées sur des approches développées aux États-Unis.

Les effets sur les SSC sont :

- les effets directs de la pression induite par le vent de tornade ;
- les effets de la variation de la pression atmosphérique, appelée dépression, lors du passage de la tornade ;
- les effets des « missiles » projetés par le vent de la tornade.

Pour l'évaluation de ces méthodes, il convient de distinguer, d'une part les SSC « hors noyau dur », d'autre part les SSC faisant partie ou étant en interface avec le « noyau dur », dénommés ci-après SSC « noyau dur ».

L'IRSN souligne que les effets d'une tornade (effets directs du vent, variation de pression et missiles) sont à retenir pour dimensionner tous les nouveaux SSC, ainsi que pour évaluer le comportement de tous les SSC « noyau dur » dans le cadre des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) et le comportement de tous les SSC « hors noyau dur » dans le cadre des réexamens de sûreté des installations.

Effets directs du vent de tornade

Les actions dues à l'effet direct du vent de tornade sont déterminées à partir de la vitesse maximale du vent de tornade (V_m). La pression due à ce vent est considérée constante sur la hauteur de la tornade.

L'effort dû à la pression du vent de tornade sur une paroi est obtenu en considérant des coefficients de pression, déterminés pour tenir compte de la forme du SSC, et un coefficient de taille pour prendre en compte la variation de vitesse du vent de tornade sur la longueur de la paroi. Ce coefficient dépend du rapport entre la longueur de la structure et le rayon de vortex (R_m).

Dans les méthodes présentées, AREVA, le CEA et EDF prévoient de déterminer le coefficient de taille en considérant un rayon de vortex variant selon le niveau de tornade. Cette hypothèse est cohérente avec la physique du phénomène. Aussi, **l'IRSN estime que la méthodologie présentée par les exploitants visant à déterminer les effets directs du vent de tornade en fonction du niveau de tornade est satisfaisante.**

Effets de la variation de pression atmosphérique

AREVA, le CEA et EDF ont présenté un exemple d'évaluation des effets de la dépression d'une tornade sur un bâtiment en fonction de la perméabilité de ses parois. Il en ressort que la différence de pression obtenue entre les parois intérieures et extérieures pour le bâtiment étudié n'est pas toujours négligeable, notamment dans le cas

d'un bardage double peau et d'une couverture revêtue d'un complexe d'étanchéité. Par contre, les structures avec un bardage simple peau sans isolation thermique et une couverture sans revêtement d'étanchéité ont une perméabilité telle que l'effet de la dépression conduit à un faible chargement des parois qui peut être *a priori* négligé.

Ceci a conduit les exploitants à proposer de déterminer les effets de la dépression en tenant compte de la perméabilité des parois, établie en considérant l'ensemble des traversées susceptibles d'être ouvertes (grilles, fenêtres, portes, lanterneaux, ...). La différence de pression calculée serait jugée négligeable, pour la justification du comportement des SSC, dans le cas où elle est inférieure ou égale à 15 % de la pression liée à l'action directe du vent de tornade, ou dans le cas des structures ayant des façades en bardage simple peau sans isolation thermique.

L'IRSN estime que le principe de la méthode présentée par les exploitants pour l'évaluation du différentiel de pression en fonction de la perméabilité est acceptable. Toutefois, le taux de perméabilité devra être caractérisé à partir d'essais de parois représentatives de celles des SSC, en considérant une condition normale d'exploitation. En particulier, les portes sont généralement à considérer en position fermée.

L'IRSN considère en outre qu'une différence de pression évaluée à 15 % de l'action directe du vent, valeur établie pour une tornade de caractéristiques bien définies et pour un bâtiment particulier afin d'examiner le comportement d'un bardage simple peau sans isolation thermique, ne peut pas être généralisée comme seuil d'exemption d'étude à tout type de bâtiment. Aussi, l'IRSN estime qu'il n'est pas adapté de retenir ce critère.

En conséquence, l'IRSN considère que les exploitants doivent prendre en compte les effets de la variation de la pression atmosphérique due à une tornade en tenant compte de caractéristiques de perméabilité sur une base expérimentale et ce quel que soit le type de bardage, à l'exception des bardages simple peau sans isolation thermique et sans revêtement d'étanchéité. Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 1 formulée en annexe 1.

Effets des projectiles

Les effets des projectiles sont étudiés en considérant l'impact de différents types de missiles, notamment un tube métallique et une automobile.

Pour vérifier l'absence de perforation des parois en béton, des parois métalliques ou d'équipements, les exploitants se basent sur des formules analytiques couramment utilisées. **Ceci n'amène pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Concernant la possibilité d'écaillage des parois en béton armé impactées par un projectile, les exploitants ont des approches différentes.

AREVA propose de vérifier l'absence d'écaillage sous l'impact d'un tube pour les SSC hors noyau dur les plus importants pour la sûreté ainsi que pour les SSC noyau dur non redondants se trouvant sur la paroi impactée. Le CEA propose de s'assurer de l'absence de conséquence d'un éventuel écaillage du béton sur le supportage ou l'intégrité des SSC « noyau dur ». Enfin, EDF estime qu'il n'est pas nécessaire de réaliser d'étude spécifique sur le phénomène d'écaillage car ses conséquences pour la sûreté sont résiduelles.

L'IRSN estime que cette vérification ne présente pas de difficulté particulière et que les exploitants doivent s'assurer de l'absence de conséquence d'un éventuel écaillage du béton sur le supportage et l'intégrité de tous

les SSC proches de ou supportés par les parois impactées par des projectiles. Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation n°2 formulée en annexe 1.

Pour ce qui concerne l'impact de l'automobile, EDF et le CEA prévoient d'étudier le comportement des parois en béton armé, soit à l'aide d'une force statique équivalente, soit à l'aide du calcul de la réponse non linéaire d'une paroi en béton armé. **Ces méthodes et les critères associés n'amènent pas de remarque de la part de l'IRSN.**

AREVA prévoit d'étudier au cas par cas l'impact de l'automobile, mais ne précise pas la méthode retenue pour étudier les parois en béton armé. **Ce point fait l'objet de l'observation formulée en annexe 2.**

Dans le cas d'un impact d'automobile sur l'ossature métallique d'un bâtiment, les dommages potentiels considérés par les exploitants pour analyser le comportement de la structure sont, soit la perte d'un poteau et d'un élément de stabilité, soit la perte d'une poutre et d'un élément de stabilité. **Ceci n'amène pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Combinaisons d'actions

Les exploitants proposent de vérifier le comportement des « SSC hors noyau dur » et des SSC « noyau dur » en considérant notamment les deux effets suivants :

- au centre du vortex de la tornade : l'effet seul de la variation maximale de pression ;
- dans la zone de vitesse de vent maximale : le cumul des effets de vent de vitesse maximale, des missiles et de la moitié de la variation maximale de pression.

Par ailleurs, les exploitants prévoient d'étudier le comportement des SSC en combinant le chargement « tornade », considéré comme une situation accidentelle, avec les autres charges concomitantes.

Ces éléments n'amènent pas de remarque de la part de l'IRSN.

Méthodes de calcul

Les exploitants n'ont pas transmis d'élément concernant les méthodes retenues pour analyser le comportement des SSC vis-à-vis de la tornade.

L'IRSN considère que, au regard de l'agression tornade retenue au titre du dimensionnement ou du réexamen de sûreté des installations, le respect des exigences de comportement attribuées aux SSC est à justifier en considérant le principe des règles de conception et de construction codifiées.

Concernant les SSC du noyau dur, l'IRSN considère que les effets d'une tornade de situation « noyau dur » devront être étudiés selon les principes des méthodologies retenues pour justifier les SSC pour les aléas de niveau ECS.

Comparaison des effets d'une tornade et d'un vent de tempête

L'IRSN a comparé les chargements obtenus sur des bâtiments pour différentes vitesses de vent de tempête et de vent de tornade. Les chargements sont établis différemment pour le vent de tornade ou le vent de tempête

(vitesse constante ou croissante avec la hauteur, coefficient réducteur du fait de la taille du bâtiment et prise en compte de la dépression pour une tornade). Il ressort de cette comparaison qu'une vitesse de vent de tempête inférieure à celle d'un vent de tornade peut conduire à un chargement plus sévère. Par ailleurs, une vitesse de vent de tornade inférieure à une vitesse de vent de tempête peut conduire à un chargement plus sévère avec la prise en compte de la dépression de la tornade.

L'IRSN souligne que, lorsque l'écart entre les vitesses de vent d'une tempête et d'une tornade n'est pas très important, il n'est pas possible de déterminer *a priori* quelle agression est la plus préjudiciable. En effet, cela dépend de l'écart entre les vitesses de vent, mais également des dimensions (longueur et hauteur) du bâtiment considéré et de la prise en compte de la dépression.

En outre, les effets des impacts de projectiles qui sont à cumuler avec les effets de pression associés au vent et ceux de la dépression peuvent être différents pour les tornades et les vents de tempête.

Les exploitants ont proposé, en fin d'instruction, de retenir les chargements issus des vents de tempête et des tornades ou, dans le cas où ils ne retiennent que l'un des deux, de justifier au cas par cas le caractère enveloppe d'un chargement par rapport à l'autre.

L'IRSN considère que ces propositions sont satisfaisantes et doivent s'appliquer à l'ensemble des SSC.

Conclusion

En conclusion de son évaluation, l'IRSN estime que les méthodes proposées par AREVA, le CEA et EDF pour évaluer les effets des tornades sur les SSC sont satisfaisantes, sous réserve de la prise en compte des recommandations formulées en annexe 1 et de la confirmation à l'ASN des engagements pris au cours de l'instruction.

Pour le Directeur général et par délégation,

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'Expertise de Sécurité

Annexe 1 à l'Avis IRSN/2017-00087 du 14 mars 2017

Recommandations

Recommandation n° 1 :

L'IRSN recommande que, pour les structures constituées de bardages métalliques et/ou de toitures métalliques, hormis pour les structures avec un bardage simple peau sans isolation thermique et sans étanchéité, les effets de la variation de la pression atmosphérique due à une tornade soient pris en compte :

- soit en évaluant la différence maximale de pression de part et d'autre des parois, en fonction du taux minimal de perméabilité caractérisé à partir d'essais de produits similaires à ceux mis en œuvre, dans la configuration de la structure en situation d'exploitation ;
- soit en considérant que la différence maximale de pression de part et d'autre de la paroi est égale à la variation maximale de la pression atmosphérique, dans le cas où le taux minimal de perméabilité ne peut pas être caractérisé.

Recommandation n° 2 :

L'IRSN recommande que les exploitants évaluent le risque d'écaillage du béton sous l'effet d'un projectile mis en mouvement par une tornade. Dans les cas où ce risque ne peut être écarté, les exploitants doivent étudier les conséquences sur le supportage et l'intégrité des SSC et, le cas échéant, mettre en œuvre des dispositions adaptées.

Annexe 2 à l'Avis IRSN/2017-00087 du 14 mars 2017

Observation

L'IRSN considère qu'AREVA devrait étudier le comportement des parois en béton armé sous l'impact d'une automobile avec des méthodes similaires à celles proposées par le CEA et EDF, qui tiennent compte des effets dynamiques de l'interaction entre le projectile (automobile) et la paroi impactée.