

Fontenay-aux-Roses, le 14 mars 2017

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2017-00088

Objet : Risques liés aux tornades sur les installations d'AREVA, du CEA et d'EDF Aléas à retenir pour les SSC « hors noyau dur » et les SSC « noyau dur »

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

En application de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base, les exploitants nucléaires doivent « *prendre en considération dans la démonstration de sûreté nucléaire [...] les conditions météorologiques ou climatiques extrêmes* ». Par ailleurs, dans les décisions du 21 janvier 2014 et du 8 janvier 2015 faisant suite aux Évaluations complémentaires de sûreté (ECS) menées en 2011, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a indiqué que les agressions naturelles externes, dont la sévérité dépasse celle considérée dans les référentiels de sûreté des installations et retenues pour la conception du noyau dur, sont : le séisme, l'inondation, la neige, les vents extrêmes, la foudre, la grêle et la tornade. En particulier, l'ASN a demandé qu'AREVA, le CEA et EDF prennent en considération le risque lié aux tornades dans le cadre de la mise en place du noyau dur.

Par lettre citée en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) d'examiner les éléments présentés par AREVA, le CEA et EDF concernant la prise en compte des risques liés aux tornades, dans les termes suivants :

« *Dans un souci de cohérence et afin que tous les exploitants puissent bénéficier des meilleures méthodes disponibles, j'ai l'honneur de solliciter votre avis sur les éléments méthodologiques [...] :*

- *de 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 situations relevant des agressions « noyau dur » ;*
- *de prise en compte des effets des tornades sur les [Structures, systèmes ou composants (SSC)].*

Votre analyse se prononcera notamment sur les caractéristiques des projectiles associés aux tornades à retenir.

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 B 440 546 018

À cet égard, vous apprécierez les différentes hypothèses retenues dans les méthodes proposées par les exploitants au regard de l'état de l'art et des pratiques en vigueur. Enfin, vous pourrez apprécier dans le cadre de cette analyse le caractère majorant des effets des tornades retenues pour le noyau dur par rapport aux niveaux de vents extrêmes retenus par les exploitants dans ces mêmes études, en considérant les effets directs et indirects des vents extrêmes. »

La réponse de l'IRSN à la demande de l'ASN est formalisée par deux avis distincts : le présent avis qui porte sur « les aléas » retenus par les exploitants (AREVA, CEA et EDF) pour considérer dans les analyses de sûreté le phénomène de tornade et un second avis qui porte sur la méthodologie de prise en compte des effets des tornades sur les SSC à protéger.

Une synthèse de l'analyse menée par l'IRSN et des principales conclusions associées, relatives aux caractéristiques des tornades et des projectiles à retenir par AREVA, le CEA et EDF, est présentée ci-après.

ÉLÉMENTS PREALABLES

Déroulement de l'instruction

Dans le cadre de cette instruction, il a été distingué, pour les SSC nécessitant d'être protégés contre les risques liés aux tornades :

- les SSC « hors noyau dur » ;
- les SSC faisant partie ou étant en interface avec le « noyau dur », dénommés par la suite comme les SSC « noyau dur ».

Les SSC nécessitant d'être protégés contre les risques liés aux tornades dépendent des spécificités de chaque installation et doivent être identifiés en préalable à l'évaluation de leur comportement (pour les SSC existants) ou de leur dimensionnement (pour les nouveaux SSC). La démarche d'identification de ces SSC n'a pas été traitée dans la présente instruction.

L'analyse de l'IRSN a été menée sur la base des dossiers des exploitants complétés au cours de l'instruction, pour 5 sites d'AREVA et du CEA (La Hague, Saclay, Cadarache, Marcoule, Pierrelatte), et les 19 sites de centrales nucléaires en exploitation d'EDF. Elle a également tenu compte de l'état de l'art international sur le sujet et du retour d'expérience associé aux tornades en France métropolitaine. Sur la base des éléments proposés par les exploitants, qui ne sont pas homogènes, et des discussions de l'instruction, l'IRSN a identifié des caractéristiques de tornades et de projectiles jugés pertinents pour les SSC « hors noyau dur » ou « noyau dur » à protéger des risques liés aux tornades. Cette analyse a été menée indépendamment du type d'installation et sans distinction entre les SSC existants et les nouveaux SSC. En effet, l'IRSN considère que les éventuelles différences de traitement dans la

démonstration de sûreté ne doivent pas porter sur la définition de l'aléa. À 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.

Phénomène de tornade

Une tornade est un phénomène rare, se formant dans une atmosphère fortement instable. Elle se caractérise par un tourbillon de vents violents se développant sous la base d'un cumulonimbus (nuage d'orage) et se prolongeant jusqu'à la surface terrestre. Ce phénomène météorologique peut être très destructeur, mais il est de durée et d'étendue limitées. Il a en effet une durée de vie dépassant rarement 15 minutes et concerne un corridor relativement étroit : en moyenne, de 40 à 250 m de large sur 2 à 25 km de long, selon l'intensité de la tornade. En France, on constate que les tornades sont légèrement plus fréquentes sur une large diagonale partant des Charentes maritimes jusqu'au nord de la France et englobant la Normandie, principalement pendant la saison chaude de mai à octobre. Il n'y a pas à ce jour d'étude disponible établissant un lien entre le changement climatique et une variation du nombre ou de l'intensité des tornades en France et dans le monde : l'augmentation du nombre de tornades recensées depuis quelques années est plus vraisemblablement due au développement des réseaux d'observations des tornades et orages violents.

Les tornades sont quantifiées sur l'échelle « améliorée » de Fujita (échelle « EF ») : cette échelle, créée en 1971 puis revue par la NOAA¹ aux États-Unis, classe les tornades par ordre de gravité, en fonction des pires dégâts qu'elles occasionnent et non pas en fonction d'observations directes du phénomène. L'échelle améliorée de Fujita comporte six degrés, notés EF0 à EF5 (par ordre croissant des dommages) ; les vitesses de vent estimées pour une intensité donnée correspondent aux vitesses maximales du vent généré par une tornade de cette intensité et sont, par convention, assimilées à des vitesses de vent à 10 mètres au-dessus du sol. Les intensités de tornade présentées dans les dossiers des exploitants et décrites dans cet avis sont issues de cette échelle.

L'observatoire français des tornades et orages violents, Keraunos, est une association fondée en 2009 dont la vocation consiste à promouvoir la connaissance des orages en France et en Europe. Une des missions de l'observatoire est de constituer et d'alimenter une base de données nationale des phénomènes orageux et des tornades : à l'été 2016, la base de données de Keraunos comptait 681 tornades en France, depuis 1680. Selon Keraunos, 40 à 50 tornades se produiraient en moyenne chaque année sur le territoire métropolitain. La majorité des tornades recensées sont d'intensité faible (EF0 et EF1), bien que l'exhaustivité de leur recensement ne soit pas assurée du fait des dommages limités. Pour les intensités plus fortes, Keraunos estime que les intensités EF2 et EF3 représentent environ 5 % des tornades recensées en France, tandis que les intensités EF4 et EF5 représentent moins de 0,5 % d'entre elles.

¹ La National Oceanic and Atmospheric Administration est l'agence américaine responsable de l'étude de l'océan et de l'atmosphère.

MODELISATION PHYSIQUE DU PHENOMENE DE TORNADE

L'analyse de l'IRSN a porté sur les modèles retenus par les exploitants pour représenter le phénomène de tornade et pour évaluer ses effets sur les structures du génie civil, avec l'objectif de caractériser la pression aérodynamique (effets du vent sur les parois d'un bâtiment) et la variation de pression barométrique (pression atmosphérique ambiante).

Afin d'évaluer les effets du vent sur les SSC, les exploitants retiennent le modèle de Rankine : la tornade est assimilée à un vortex de rayon R_m , pour lequel la vitesse du vent est maximale ; cette vitesse de vent dépend de la vitesse de translation de la tornade ainsi que de la vitesse de rotation générée par le vortex au rayon R_m . La vitesse de rotation ne tient compte que d'une composante tangentielle et elle est considérée constante sur la hauteur de la tornade.

L'IRSN considère que, au vu des éléments expérimentaux et théoriques disponibles dans l'état de l'art, l'utilisation du modèle de Rankine pour caractériser les effets du vent d'une tornade est acceptable. Par souci de simplification dans la suite de cet avis, la « vitesse de vent » caractérise la vitesse maximale du vent généré par une tornade au rayon de vortex R_m .

Afin d'évaluer les effets d'une diminution puis d'une augmentation soudaines de la pression sur les parois d'un bâtiment, les exploitants déterminent une variation maximale de pression (au centre du vortex) et une vitesse associée à cette variation, également appelée « vitesse de chute de pression ».

Pour calculer la variation maximale de pression, les exploitants modifient le modèle de Rankine en considérant une composante radiale de la vitesse de rotation du vortex, égale à la moitié de la composante tangentielle. L'IRSN convient que la prise en compte d'une vitesse radiale correspond à une démarche cherchant à représenter la physique du phénomène de tornade de manière plus réaliste que ne le permet le modèle de Rankine. Cependant, des modèles plus réalistes que celui de Rankine recensés dans la littérature tiennent compte d'autres paramètres comme la vitesse verticale du vent et présentent différentes formulations théoriques concernant les composantes de vent. Par ailleurs, l'hypothèse retenue par les exploitants sur la vitesse radiale, provenant de travaux anciens, débutés dans les années 70, est assujettie à de nombreuses incertitudes selon les dires mêmes des auteurs. Enfin, la variation maximale de pression calculée par les exploitants est inférieure de 20 % aux valeurs obtenues selon la réglementation nucléaire américaine *Regulatory guide* (RG) 1.76 ou la documentation associée, qui ne tient pas compte de la vitesse radiale du vent. En conclusion, au vu de la difficulté à retenir un modèle de tornade réaliste et robuste vis-à-vis des différentes composantes du vent et des fortes incertitudes concernant notamment la vitesse radiale du vent, **l'IRSN estime qu'il convient de retenir un modèle simplifié et conservatif pour estimer la variation maximale de pression, à savoir ne considérant pas de composante radiale de la vitesse.**

À partir de la variation maximale de pression dp , ainsi que de la vitesse de translation de la tornade et du rayon de vortex R_m , les exploitants estiment la vitesse de chute de pression selon la formule préconisée dans la réglementation RG 1.76, c'est-à-dire en retenant un rayon de vortex unique et relativement faible. **À l'issue de l'instruction, les exploitants ont néanmoins proposé de retenir des rayons de vortex dépendant de l'intensité de la tornade, tels que présentés dans les règles de conception et réalisation « RCC-CW 2015 » émises par l'AFCEC², ce que l'IRSN estime acceptable.** En effet, la prise en compte d'un rayon de vortex unique et relativement faible, conduisant à pénaliser les vitesses de chute de pression, n'est pas physiquement réaliste.

Les différents éléments mentionnés supra ont été pris en compte par l'IRSN pour définir les variations maximales de pression et les vitesses de chute de pression caractérisant les tornades à retenir par les exploitants, qui sont précisées dans la recommandation n°1 en annexe.

CARACTERISTIQUES RETENUES PAR LES EXPLOITANTS

Les caractéristiques présentées par les exploitants dans les dossiers transmis au début de l'instruction sont hétérogènes, tant pour définir les tornades que les projectiles associés.

En particulier, pour les SSC « hors noyau dur », soit aucune agression tornade n'est retenue (en considérant que les risques liés aux tornades sont couverts par le dimensionnement des SSC aux exigences de sûreté du référentiel, en particulier vis-à-vis des niveaux de vent de tempête définis dans les règles Neige et Vent), soit les caractéristiques diffèrent significativement avec notamment l'intensité de la tornade variant entre EF0 et EF2.

Pour les SSC « noyau dur », les caractéristiques sont moins hétérogènes : les trois exploitants retiennent une même vitesse de vent pour 11 sites, caractérisant une tornade d'intensité EF3 (pour les douze autres sites, EDF retient une tornade d'intensité EF4) ; les projectiles sont tous issus de la réglementation RG 1.76. Il est cependant à noter que, contrairement au CEA et à EDF, AREVA ne réalise pas d'analyse de comportement des SSC « noyau dur » vis-à-vis de l'ensemble des effets combinés d'une tornade (effets de pression, de dépression, d'impact des projectiles) et ne retient pas de projectile de type « automobile ».

À l'issue de l'instruction, les exploitants ont proposé des engagements conduisant à des évolutions de leurs démarches et notamment à des positions plus homogènes.

Ainsi, les trois exploitants considèrent que la prise en compte d'une tornade d'intensité EF0 serait suffisante pour protéger les SSC « hors noyau dur » des risques liés aux tornades, en termes d'objectif probabiliste et de prise en compte du retour d'expérience régional le plus fréquent, afin notamment de répondre aux préconisations faites par WENRA³. Ils proposent néanmoins, pour couvrir un retour d'expérience régional plus étendu ainsi que certaines

² Association Française pour les règles de conception et de construction des matériels des Chaudières ÉlectroNucléaires

³ Association des chefs d'autorités de sûreté nucléaire européennes

incertitudes, de retenir une tornade d'intensité EF1, caractérisée notamment par une vitesse de vent de 45 m/s. En complément d'un projectile de type « bille d'acier », EDF et le CEA retiennent un projectile de type « planche de bois » tandis qu'AREVA retient des projectiles « réalistes » de masse inférieure à 50 kg (tels que considérés lors des réexamens de sûreté vis-à-vis de l'agression « vent de tempête »).

Pour les SSC « noyau dur » de la majorité des sites, les trois exploitants définissent une tornade d'intensité EF3, caractérisée notamment par une vitesse de vent de 65 m/s. Pour les SSC « noyau dur » des sites de Gravelines, Paluel, Penly et Chooz, EDF retient une tornade d'intensité EF4, caractérisée notamment par une vitesse de vent de 81,5 m/s. Les trois exploitants proposent des projectiles de type « bille d'acier », « tube d'acier » et « automobile », mais l'analyse d'impact du « tube d'acier » arrivant perpendiculairement à l'ossature des charpentes métalliques est écartée, cette configuration étant jugée très peu vraisemblable.

Les conclusions de l'analyse de l'IRSN sur les caractéristiques des tornades et des projectiles à retenir par les exploitants sont présentées dans la suite de cet avis.

CARACTERISTIQUES DES TORNADES ET DES PROJECTILES A RETENIR SELON L'IRSN

Sur la base des propositions de chaque exploitant et des discussions techniques de l'instruction, l'IRSN a identifié les caractéristiques des tornades et des projectiles qui seraient à retenir pour les SSC « hors noyau dur » et les SSC « noyau dur ».

Les caractéristiques des tornades ont été identifiées par l'IRSN en regard d'une part des particularités du phénomène et des tornades recensées en France (présentées supra) et d'autre part des fréquences associées aux vitesses des vents générés par les tornades (présentées ci-après). Les caractéristiques des projectiles à considérer ont été évaluées notamment en regard des pratiques internationales et du retour d'expérience pour les intensités de tornade considérées.

Fréquences associées aux vitesses de vent de tornade

Dans le cadre de l'analyse des risques liés aux tornades, chaque exploitant a développé sa propre méthodologie pour évaluer les fréquences de dépassement des vitesses de vent de tornade retenues sur les différents sites. Ces méthodologies reposent toutes sur des estimations statistiques à partir des surfaces dévastées par les tornades recensées en France mais traitent différemment certains aspects comme la prise en compte des dimensions typiques des structures cibles ou la variation d'intensité des tornades le long de leurs parcours. Le CEA et EDF tiennent compte d'une régionalisation du risque de tornade en France métropolitaine et déterminent ainsi les fréquences de dépassement des vitesses de vent de tornade sur plusieurs zones géographiques. Chaque exploitant prend en compte, avec des approches différentes, les

incertitudes sur le recensement des tornades d'intensités EF0 et EF1 (du fait de leurs dégâts limités). Enfin, les bases de données et les périodes de recensement utilisées diffèrent entre les exploitants.

L'IRSN considère que les approches développées par les exploitants sont cohérentes avec l'état de l'art disponible sur les évaluations probabilistes du risque de tornade. Néanmoins, ces approches mettent en évidence les nombreuses incertitudes associées au phénomène de tornade (surfaces dévastées, variations d'intensité, régionalisation du risque), au recensement des événements en France et à la dimension des cibles de sûreté. Afin d'estimer l'impact de ces incertitudes sur les évaluations probabilistes des vents de tornade, l'IRSN a développé sa propre méthodologie qui reprend significativement les approches retenues par le CEA et EDF. Des études de sensibilité ont ainsi été réalisées par l'IRSN à partir de la base de données fournie par l'observatoire Keraunos en août 2016 et de différents cas d'étude cohérents avec les pratiques présentées dans la littérature scientifique. Pour chaque cas d'étude, des fréquences de dépassement des vitesses de vent de tornade ont été déterminées.

D'après les études de sensibilité menées, le choix de la base de données et la prise en compte de différentes hypothèses sur les étapes principales de l'évaluation conduisent à des variabilités dans les fréquences calculées, qui peuvent aller jusqu'à des écarts de l'ordre d'une décade lorsque toutes les hypothèses varient. Cependant, les fréquences moyennes et médianes déterminées sur l'ensemble des cas d'étude, très similaires, semblent adaptées pour estimer des fréquences représentatives du dépassement des vitesses de vent de tornade. **Les fréquences calculées par les exploitants et par l'IRSN sont globalement cohérentes pour les tornades d'intensité moyenne, les fréquences calculées par les exploitants étant plutôt inférieures pour les tornades de faibles intensités et légèrement supérieures pour les tornades de fortes intensités.**

Caractéristiques des tornades à retenir

D'après les évaluations probabilistes réalisées par les exploitants et par l'IRSN, les fréquences d'occurrence ou de dépassement des niveaux tornades retenues par les exploitants sont inférieures à 10^{-4} /an sur les ouvrages des sites nucléaires (elles peuvent atteindre 10^{-7} à 10^{-8} /an pour les tornades extrêmes).

Néanmoins, de très nombreuses tornades sont recensées sur l'ensemble du territoire métropolitain (hors Corse). Si une majorité de ces tornades a une intensité EF0 et EF1, le nombre de tornades d'intensité EF2 et EF3 reste significatif (environ 4 tornades EF2 et 2 tornades EF3 sont recensées chaque année).

Au vu de ces éléments, l'IRSN considère que la seule prise en compte d'un objectif probabiliste n'est pas suffisante pour définir les intensités et vitesses de vent de tornade pour les SSC « hors noyau dur ». À cet égard, si WENRA préconise que les aléas naturels à retenir pour le dimensionnement doivent avoir une fréquence de dépassement inférieure à 10^{-4} /an et être enveloppe des événements historiques extrêmes, avec une marge suffisante, WENRA préconise

également de faire l'évaluation des aléas en prenant en compte toutes les données pertinentes pour le site et sa région. Les exploitants, pour établir leurs propositions, ne se sont positionnés qu'en regard de l'objectif probabiliste.

L'IRSN relève qu'il n'est pas pertinent, pour les pour les SSC « hors noyau dur » de retenir, pour chaque site, systématiquement le retour d'expérience régional le plus pénalisant, étant donné le caractère rare du phénomène, l'étendue limitée des tornades et en conséquence les faibles fréquences associées pour un site particulier. Néanmoins, l'IRSN considère que les installations doivent pouvoir faire face à des tornades représentatives d'un retour d'expérience régional régulier. Étant donné les tornades recensées dans l'ensemble de la France métropolitaine, **l'IRSN estime que les SSC « hors noyau dur » doivent être protégés *a minima* pour une tornade d'intensité EF2, définie par la vitesse moyenne des vents caractérisant cette intensité (55,5 m/s).**

Par ailleurs, l'IRSN considère que les SSC « noyau dur » doivent être protégés pour des tornades plus sévères, qui tiennent compte du retour d'expérience régional. De façon analogue aux SSC « hors noyau dur », il n'est pas jugé pertinent de retenir le retour d'expérience le plus pénalisant à l'échelle de la plus grande région envisagée pour la caractérisation des tornades (France métropolitaine). Néanmoins, au vu de la proportion significative et de la répartition homogène des tornades d'intensité EF3 sur le territoire, **l'IRSN estime que les SSC « noyau dur » doivent être protégés *a minima* pour une tornade d'intensité EF3, définie par la vitesse moyenne des vents caractérisant cette intensité (68 m/s).** Cette vitesse de vent est légèrement supérieure à la vitesse de 65 m/s proposée par les exploitants.

Cependant, pour les sites situés sur des zones marquées par un retour d'expérience extrême significatif (par exemple, les sites pour lesquels une tornade d'intensité EF5 et/ou plusieurs tornades d'intensité EF4 ont été recensées dans un rayon de 50 km), l'IRSN considère que les SSC « noyau dur » doivent être protégés *a minima* pour une tornade d'intensité EF4, définie par la vitesse moyenne des vents caractérisant cette intensité (81,5 m/s). Cela concerne les sites de Gravelines, Penly, Paluel, Chooz et Saclay.

À partir des vitesses de vent précédemment citées, des variations maximales de pression et des vitesses de chute de pression associées doivent également être retenues pour protéger les SSC « hors noyau dur » et les SSC « noyau dur » des risques liés aux tornades, selon les conclusions de l'IRSN concernant la modélisation physique du phénomène de tornade.

L'ensemble de ces points fait l'objet de la recommandation n° 1 en annexe.

Caractéristiques des projectiles à retenir

Pour des intensités de tornade EF2 à EF4, de nombreux objets peuvent se transformer en projectiles pouvant agresser les SSC « hors noyau dur » et les SSC « noyau dur ». Ces projectiles peuvent être plus ou moins grands et lourds, avec des propriétés mécaniques différentes. Afin de couvrir les impacts de l'ensemble des projectiles potentiels sur un site nucléaire, l'IRSN

estime que des projectiles forfaitaires doivent être systématiquement pris en compte, dans le cadre d'analyses déterministes.

À l'issue de l'instruction, les trois exploitants ont proposé d'analyser l'impact, sur les SSC « noyau dur » uniquement, du projectile « automobile » défini par la réglementation RG 1.76 et se déplaçant jusqu'à une hauteur de 3 m pour une intensité EF3 ou 9 m pour une intensité EF4, avec une vitesse horizontale égale à 33 % de la vitesse du vent de tornade. **En regard des pratiques internationales et du retour d'expérience pour les intensités de tornade préconisées précédemment, l'IRSN considère que ces propositions sont satisfaisantes et que l'impact du projectile massif de type « automobile » n'a en effet pas à être analysé pour les SSC « hors noyau dur ».**

Néanmoins, l'IRSN note que le CEA retient une hauteur maximale de déplacement égale à 3 m, pour tous ses sites. L'IRSN considère cependant que les SSC « noyau dur » du site de Saclay doivent être protégés contre les risques liés à une tornade d'intensité EF4 et donc que l'impact du projectile « automobile » doit être analysé jusqu'à une hauteur de 9 m pour ce site. **Ce point fait l'objet de la recommandation n° 2 en annexe.**

À l'issue de l'instruction, les trois exploitants ont proposé d'analyser l'impact du projectile « tube d'acier » sur les SSC « noyau dur » et l'impact du projectile « bille d'acier » sur tous les SSC, avec les caractéristiques (dimensions, masses, hauteurs et vitesses de déplacement) issues des préconisations de la réglementation RG 1.76. **L'IRSN considère que ces propositions sont satisfaisantes.**

Par ailleurs, les exploitants considèrent que le tube d'acier défini dans la réglementation RG 1.76 ne constitue un projectile volant que pour des tornades d'intensité supérieure ou égale à EF3, du fait du poids élevé du projectile et du retour d'expérience pour ces types de tornades. **L'IRSN considère à cet égard acceptable la proposition du CEA et d'EDF de considérer, pour les SSC « hors noyau dur », un projectile de type « planche de bois »,** avec les caractéristiques proposées (issues du référentiel d'EDF sur les projectiles générés par le vent extrême), plus réaliste en regard des missiles générés par une tornade d'intensité EF2. Néanmoins, AREVA ne précise pas les types de projectiles « réalistes » qu'il retiendra en complément de la bille d'acier. L'IRSN considère donc que cet exploitant doit également tenir compte d'un projectile de type « planche de bois » pour les SSC « hors noyau dur ». **Ce point fait l'objet de la recommandation n° 3 en annexe.**

Enfin, les exploitants ont indiqué qu'ils pourraient occasionnellement écarter l'analyse d'impact d'un projectile sur la base de critères qualitatifs ou d'analyses fonctionnelles. Les éléments présentés par les exploitants seront évalués au cas par cas, dans le cadre des évaluations réalisées spécifiquement pour chaque installation.

L'IRSN note à cet égard que les trois exploitants écartent l'impact du projectile du tube d'acier arrivant perpendiculairement sur l'ossature des charpentes métalliques. L'IRSN convient que, si cette situation est peu probable, l'impact du tube d'acier arrivant sur l'ossature avec un angle

quelconque ne peut néanmoins pas être écarté étant donné la longueur du projectile. Dans les cas où l'analyse d'impact du projectile « automobile » serait écartée par les exploitants (par exemple du fait de la présence d'obstacles proches des SSC à protéger), aucune analyse de stabilité des charpentes métalliques des SSC « noyau dur » ne serait alors réalisée. **Ce point fait l'objet de la recommandation n°4 en annexe.**

COMPARAISON DES VITESSES DE VENT RETENUES POUR L'AGRESSION « VENT DE TEMPÊTE » ET POUR L'AGRESSION « TORNADE »

Les vitesses de vent retenues sur chaque site pour l'agression « vent de tempête » ont été transmises par AREVA et le CEA au cours de l'instruction et lors du réexamen de sûreté VD3-1300 pour EDF. À 10 m au-dessus du sol, la vitesse de vent de tornade préconisée par l'IRSN est plutôt enveloppe des vitesses maximales du vent extrême ou accidentel retenu par les exploitants pour les SSC « hors noyau dur ». Pour les SSC « noyau dur » d'AREVA et du CEA, la vitesse de vent de tornade préconisée par l'IRSN pour les sites soumis à une tornade de niveau EF3 est légèrement supérieure aux vitesses maximales « noyau dur » retenues par les exploitants pour l'agression « vent de tempête ». Pour les sites EDF et CEA soumis à une tornade de niveau EF4, la vitesse de vent de tornade préconisée est beaucoup plus élevée que les vitesses maximales « noyau dur » retenues par les exploitants pour l'agression « vent de tempête ».

Néanmoins, la simple comparaison de ces vitesses de vent ne suffit pas pour comparer les effets de l'agression « tornade » et les effets de l'agression « vent de tempête » : une analyse complète doit notamment tenir compte d'une augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur pour l'agression « vent de tempête » (la vitesse du vent de tornade est quant à elle considérée constante avec la hauteur), tandis que les effets de la longueur de l'ouvrage, de la variation de pression et des projectiles doivent être intégrés pour l'agression « tornade ». Une analyse comparative plus détaillée a été réalisée par l'IRSN dans le cadre de l'instruction de la méthodologie de prise en compte des effets des tornades sur les SSC à protéger.

CONCLUSION

L'analyse de l'IRSN a porté sur les caractéristiques des tornades et des projectiles générés par celles-ci, à retenir pour protéger les SSC « hors noyau dur » et les SSC « noyau dur » des installations d'AREVA, du CEA et d'EDF. Cette analyse a été menée sur la base des dossiers des exploitants, de l'état de l'art international sur le sujet, du retour d'expérience associé aux tornades en France métropolitaine et de contre-calculs menés par l'IRSN sur les fréquences de dépassement des vitesses de vent des tornades.

Au vu des différentes démarches présentées par les exploitants et conformément à la demande de l'ASN, l'IRSN préconise des caractéristiques de tornades et de projectiles jugés pertinents pour les SSC « hors noyau dur » et les SSC « noyau dur ».

Ainsi, en regard des fréquences calculées et du retour d'expérience en France, l'IRSN considère que trois niveaux de tornade doivent être retenus : une tornade d'intensité EF2 pour les SSC « hors noyau dur » ; une tornade d'intensité EF3 pour les SSC « noyau dur », voire une tornade d'intensité EF4 pour les sites situés sur des zones marquées par un retour d'expérience extrême significatif (sites de Gravelines, Penly, Paluel, Chooz et Saclay). Ces tornades doivent être définies par la vitesse moyenne des vents caractérisant l'intensité considérée, ainsi que par la variation de pression et la vitesse de chute de pression calculées selon les préconisations de la réglementation nucléaire américaine RG 1.76, en tenant compte des rayons de vortex définis dans le guide RCC-CW 2015.

De plus, l'IRSN considère que des projectiles de type « planche de bois » et « bille d'acier » doivent être retenus pour les SSC « hors noyau dur », tandis que des projectiles de type « automobile », « tube d'acier » et « bille d'acier » doivent être retenus pour les SSC « noyau dur ». Le risque lié à l'impact du « tube d'acier » sur les charpentes métalliques des SSC « noyau dur » nécessite également d'être évalué par les exploitants, du point de vue de la stabilité de ces structures.

Ces conclusions et les recommandations présentées en annexe tiennent compte des engagements des exploitants transmis à l'issue de l'instruction, qui doivent être confirmés à l'ASN.

Pour le directeur général et par délégation,
Frédérique PICHEREAU
Adjoint au directeur de l'expertise de sûreté

Annexe à l'Avis IRSN/2017-00088 du 14 mars 2017

Recommandations

Recommandation n° 1 :

L'IRSN recommande qu'AREVA, le CEA et EDF retiennent *a minima* :

- pour les SSC « hors noyau dur » de chaque site : une tornade d'intensité EF2, définie par la vitesse moyenne des vents caractérisant cette intensité (55,5 m/s), une variation maximale de pression de 2,4 kPa et une vitesse de chute de pression associée de 0,38 kPa/s ;
- pour les SSC « noyau dur » de tous les sites sauf ceux de Gravelines, Penly, Paluel, Chooz et Saclay : une tornade d'intensité EF3, définie par la vitesse moyenne des vents caractérisant cette intensité (68 m/s), une variation maximale de pression de 3,6 kPa et une vitesse de chute de pression associée de 0,62 kPa/s ;
- pour les SSC « noyau dur » des sites de Gravelines, Penly, Paluel, Chooz et Saclay : une tornade d'intensité EF4, définie par la vitesse moyenne des vents caractérisant cette intensité (81,5 m/s), une variation maximale de pression de 5,2 kPa et une vitesse de chute de pression associée de 0,85 kPa/s.

Recommandation n° 2 :

Afin de protéger les SSC « noyau dur » du site de Saclay vis-à-vis des effets indirects d'une tornade d'intensité EF4, l'IRSN recommande que le CEA complète sa démarche de prise en compte du projectile de type « automobile », défini selon les caractéristiques préconisées dans la réglementation américaine RG 1.76 (masse de 1 180 kg, longueur de 4,5 m, largeur de 1,7 m, hauteur de 1,5 m), en tenant compte d'un déplacement jusqu'à une hauteur de 9 m avec une vitesse horizontale égale à 33 % de la vitesse du vent de tornade (et une vitesse verticale égale aux 2/3 de la vitesse horizontale du projectile).

Recommandation n° 3 :

Afin de protéger les SSC « hors noyau dur » des effets indirects d'une tornade d'intensité EF2, l'IRSN recommande qu'AREVA complète sa démarche de prise en compte des projectiles en tenant compte de l'impact du projectile de type « planche de bois », de dimensions 0,10 x 0,25 x 3,80 m et d'une masse de 50 kg, se déplaçant à toutes les hauteurs avec une vitesse horizontale égale à 33 % de la vitesse du vent de tornade (et une vitesse verticale égale aux 2/3 de la vitesse horizontale du projectile).

Recommandation n° 4 :

L'IRSN recommande qu'AREVA, le CEA et EDF identifient les points sensibles des charpentes métalliques des SSC « noyau dur » du point de vue de leur stabilité et évaluent la nécessité d'une protection à l'égard du projectile de type « tube d'acier ».