

Fontenay-aux-Roses, le 31 mars 2016

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN n° 2016-00099

**Objet :** Transport - Modèle de colis TN G3 - Essais de cisaillement des vis de fixation du capot

**Réf.**

1. **Lettre ASN CODEP-DTS-2016-001819 du 20 janvier 2016.**
2. Règlement de transport des matières radioactives de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique - collection Normes de sûreté, N°SSR-6, édition de 2012.

Par lettre citée en première référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) demande l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le programme d'essais, présenté par la société AREVA TN, venant en appui du développement d'une nouvelle méthodologie pour justifier le comportement du système de fixation du capot amortisseur de tête du futur modèle de colis TN G3, lors des épreuves spécifiées dans la réglementation citée en seconde référence.

### Contexte

Le modèle de colis TN G3, qui est en cours de développement, est destiné au transport de combustibles irradiés des centrales à eau sous pression (REP) françaises. Il est constitué d'une virole cylindrique de forte épaisseur, d'un fond soudé et de deux couvercles de fermeture (concept de double barrière). Il est équipé de capots amortisseurs de chocs, au niveau du fond et du couvercle secondaire (tête).

Des spécimens d'une maquette représentative de ce modèle de colis ont subi plusieurs campagnes d'essais de chute, visant à étudier son comportement lors des épreuves précitées.

Toutefois, depuis ces campagnes de chutes, des modifications ont été apportées au système de fixation du capot amortisseur de tête de l'emballage TN G3 (augmentation du diamètre des vis...) par la société AREVA TN, dénommée ci-après le requérant. Sur la base de simulations numériques, elle a estimé que ces modifications ne mettaient pas en cause la représentativité de la maquette utilisée lors des essais de chute ainsi que le caractère majorant des déformations relevées à l'issue notamment de la chute libre en position inclinée de 45° (par rapport à l'horizontale). À cet égard, compte tenu des modifications apportées, la configuration de chute du modèle de colis avec une

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

inclinaison de 30° conduit à présent à des déformations au niveau des vis de fixation du capot de tête supérieures à celles déterminées pour une inclinaison de 45°. Néanmoins, sur la base des calculs réalisés, le requérant estime que ces déformations restent inférieures à celles obtenues lors de l'essai de chute réalisé avec la maquette (concept non modifié) pour une inclinaison de 45°.

Comme indiqué dans son avis de septembre 2015, l'IRSN estime que le modèle numérique utilisé pour cette analyse n'est pas adapté pour prédire, dans les configurations des essais de chute en position inclinée réalisés, les déformations des vis de fixation du capot amortisseur de tête. En effet, pour les conceptions initiale et modifiée, les déformations maximales calculées de ces vis sont très supérieures à l'allongement à la rupture de leur acier. Ceci signifie que des ruptures de vis auraient dû être observées lors des essais, ce qui n'a pas été le cas. Aussi, du fait que les phénomènes physiques rencontrés ne sont pas bien reproduits, l'IRSN a estimé qu'une comparaison des résultats en relatif n'était pas justifiée et que le requérant devait étudier la tenue du système de fixation du capot de tête en s'appuyant sur un modèle numérique validé sur la base de résultats d'essais.

En ce sens, le requérant propose une démarche basée sur :

- une étude expérimentale du comportement (courbes effort/déplacement) de deux sous-systèmes représentatifs des systèmes de fixation du capot de tête (conceptions initiale et modifiée), visant notamment à élaborer un modèle numérique détaillé de ces systèmes et de le valider. Chaque sous-système retenu est composé d'une vis munie d'une rondelle, d'une pièce avec un taraudage simulant le couvercle secondaire du colis et d'une plaque simulant la couronne de support de serrage du capot, reprenant en particulier sa forme géométrique au voisinage de la tête des vis (cf. annexe 1 du présent avis),
- la définition, à partir des modèles numériques détaillés, de modélisations simplifiées des systèmes de fixation du capot de tête, qui seront implantées dans le modèle numérique complet du modèle de colis (intégrant tous les composants). Ce modèle complet est utilisé notamment dans le cadre de la justification du comportement du modèle de colis lors des épreuves réglementaires (caractère pénalisant des essais réalisés, évaluation de l'influence de certains paramètres...). Ce modèle complet est validé globalement sur la base des résultats des essais de chute réalisés avec la maquette du colis (conception initiale).

Dans ce cadre, le requérant a transmis un programme d'essais pour les sous-systèmes, visant à notamment évaluer expérimentalement les efforts qui conduisent au cisaillement des vis du système de fixation du capot de tête, qui est leur mode de sollicitation principal lors de la chute du colis en position inclinée.

Le programme d'essais, la représentativité des sous-systèmes et la démarche présentés par le requérant ont été expertisés par l'IRSN. De cette expertise, il ressort les points importants ci-après.

### Démarche du requérant

Comme indiqué ci avant, la démarche du requérant repose sur deux séries d'essais réalisées avec des sous-systèmes représentatifs des systèmes de fixation du capot de tête (conceptions initiale et finale), l'élaboration et la validation de modèles numériques détaillés de ces systèmes puis des modèles simplifiés utilisés dans le modèle complet du colis (conceptions initiale et finale).

L'IRSN estime que la qualité des modèles simplifiés (caractère majorant pour les démonstrations de sûreté, maîtrise des biais et incertitudes...), et donc des modèles globaux, repose sur celle des modèles détaillés. À cet égard, les phénomènes mis en jeu sont multiples et potentiellement complexes (déformation et plastification de composants...), ce qui peut rendre délicat l'élaboration de ces modèles. Aussi, l'IRSN considère que, dans une démarche dont l'objectif doit être d'élaborer des modèles simplifiés conservatifs :

- les modèles détaillés des sous-systèmes devraient représenter, aussi précisément que raisonnablement possible, les essais réalisés et leur comportement. En particulier, le requérant devrait développer des modèles détaillés intégrant l'ensemble des composants des sous-systèmes ayant une influence (par exemple le taraudage et le filet des vis), ou à défaut justifier le caractère enveloppe des simplifications réalisées ;
- les sous-systèmes utilisés lors des essais devraient présenter des caractéristiques aussi proches que possible des configurations dans lesquelles les modèles globaux sont utilisés, en termes de géométrie, de matériaux et de sollicitations mécaniques. Ce principe vise à limiter les extrapolations réalisées à l'aide des modèles détaillés et donc les incertitudes associées.

Ces points sont détaillés dans la suite du présent avis. Ils font l'objet des recommandations 1 et 2 de l'annexe 2 au présent avis.

### Description du dispositif expérimental et représentativité des composants testés

#### Description du dispositif expérimental

Chaque sous-système est positionné sur une machine de traction/compression. La partie supérieure de la plaque simulant la couronne de support de serrage du capot est rendu solidaire d'une pièce, aux moyens de liaisons boulonnées, sur laquelle est appliqué un effort de compression. La pièce simulant le couvercle secondaire est boulonnée à une pièce solidaire du bâti de la machine de test. Un schéma du dispositif expérimental proposé par le requérant est présenté en annexe 1 au présent avis.

La plaque simulant la couronne de support de serrage du capot est, dans le dispositif du requérant, libre dans la direction transverse, ce qui laisse une possibilité de flambement. Or, une déformation de cette plaque est de nature à dissiper de l'énergie et, par conséquent, à entraîner une surestimation de l'effort qui conduit à la rupture de la vis testée. Outre le fait que le comportement en flexion de cette plaque n'est pas représentatif de celui de la couronne de support de serrage du capot, cette couronne est dans la configuration du modèle de colis en contact avec le couvercle secondaire et avec la tôle inférieure du capot, ce qui limite ses déplacements dans la direction transverse.

Aussi, l'IRSN recommande que le requérant, soit, à l'issue de chaque essai, vérifie l'absence de déformations de la plaque simulant la couronne de support de serrage du capot de tête, soit modifie le dispositif expérimental afin d'introduire un système de guidage de cette plaque. Ce point fait l'objet de la recommandation 4 de l'annexe 2 au présent avis.

Enfin, le sous-système testé est solidaire des pièces permettant d'appliquer l'effort de compression et de le fixer au bâti de la machine de test. Des déformations plastiques significatives de ces composants ou des boulons de liaison associés sont de nature à mettre en cause la validité des résultats obtenus. De même, des interactions mécaniques entre les pièces, par exemple entre la plaque simulant la couronne de support de serrage du capot et la pièce simulant le couvercle secondaire, pourraient conduire à surestimer l'effort conduisant à la rupture de la vis.

Aussi, l'IRSN estime que le requérant devra confirmer que les éléments de liaison (pièces et boulons) des sous-systèmes avec la machine de test subissent des déformations négligeables lors des essais et que des interactions mécaniques entre les pièces du sous-système n'ont pas modifié son comportement lors de l'essai, ou que ces phénomènes sont sans influence sur le comportement du sous-système étudié. Ce point fait l'objet de la recommandation 5 de l'annexe 2 au présent avis.

#### Représentativité des composants testés

Pour ce qui concerne le sous-système représentatif de la maquette, le requérant indique que les vis et les rondelles testées sont prélevées dans le lot approvisionné pour les essais de chute, ce qui assure leur représentativité. Concernant le sous-système représentatif du modèle de colis, il indique que les dimensions des composants testés sont conformes aux spécifications présentées dans le dossier de sûreté du modèle de colis. Enfin, il précise que les caractéristiques réelles des pièces testées sont utilisées pour le recalage des modèles numériques détaillés.

L'IRSN estime que, dans les dossiers à venir, le requérant devra préciser les propriétés mécaniques (limite d'élasticité, résistance et allongement à la rupture) et géométrique de l'ensemble des composants des sous-systèmes (vis, rondelles, plaques simulant la couronne de support de serrage du capot, taraudage de la pièce simulant le couvercle secondaire...) et justifier leur représentativité. Ce point fait l'objet de l'observation 1 présentée en annexe 3 au présent avis.

En dehors des principes présentés ci-avant, le requérant a indiqué au cours de l'instruction que les composants testés seront approvisionnés sans exigence particulière relative aux tolérances de fabrication et que l'influence des caractéristiques mécaniques et géométrique des composants est examinée par calculs (à l'aide des modèles détaillés).

L'IRSN estime que cette approche est recevable sous réserve que les modèles détaillés reproduisent de manière satisfaisante les phénomènes observés lors des essais. À cet égard, comme indiqué précédemment, l'IRSN considère que les sous-systèmes devraient présenter des caractéristiques aussi proches que possible des configurations, en termes de géométrie et de matériaux, dans lesquelles les modèles globaux sont utilisés.

En particulier, les caractéristiques mécaniques et géométriques des composants des sous-systèmes représentatifs de la maquette utilisée lors de l'essai de chute devraient être aussi proches que possible de celles des composants de cette maquette. Ce point est intégré à la recommandation 2 de l'annexe 2 au présent avis.

En outre, l'IRSN estime que le requérant devrait, pour les sous-systèmes représentatifs du modèle de colis, approvisionner des composants dont les caractéristiques, en termes de propriétés mécaniques et géométriques, sont proches des valeurs pénalisantes des spécifications à l'égard des sollicitations du système de fixation du capot de tête (configurations utilisées pour la démonstration de sûreté). En particulier, le requérant devrait tenir compte des tolérances d'approvisionnement pour les composants de modèle de colis. Ce point est intégré à la recommandation 2 de l'annexe 2 au présent avis.

En tout état de cause, le requérant devra présenter les études évaluant la sensibilité du comportement des systèmes de fixation du capot, aux variations dimensionnelles et de propriétés mécaniques de ses composants, en tenant compte des tolérances de fabrication ou d'approvisionnement, et préciser comment ces études sont prises en compte pour définir les modèles simplifiés. Ce point fait l'objet de la recommandation 3 de l'annexe 2 au présent avis

Lors des essais, le requérant détermine les efforts conduisant à la rupture des vis (courbes effort/déplacement). À cet égard, même en considérant une sollicitation en cisaillement uniquement, selon l'IRSN, la partie « décollée » des vis et leur filet sont également sollicités respectivement en flexion et en traction. De ce fait, des écarts de représentativité de ces composants pourraient induire des biais dans la détermination des déformations notamment au niveau de la pièce simulant le couvercle secondaire et de son filetage. Ceci pourrait conduire à surestimer l'effort conduisant au cisaillement de la vis. À cet égard, le requérant ne prévoit pas d'équiper les pièces représentatives du couvercle secondaire avec des inserts, comme cela est prévu pour le modèle de colis.

Aussi, l'IRSN recommande que le requérant garantisse la représentativité du taraudage de la pièce simulant le couvercle secondaire. En particulier, il devrait mettre en place, lors des essais réalisés avec le sous-système représentatif du modèle de colis, les inserts prévus pour le modèle de colis dans les taraudages des couvercles secondaires. Ce point est intégré à la recommandation 2 de l'annexe 2 au présent avis.

#### **Sollicitations appliquées lors des essais et mesures réalisées**

##### **Configurations de chargement**

Lors des essais, une sollicitation verticale est appliquée au sous-système avec une vitesse de chargement de 5 mm/minute. Le requérant ne justifie pas cette valeur. À cet égard, lors des essais de chutes, le colis a impacté la cible avec une vitesse égale à 13,3 m/s. De ce fait, la réalisation d'essais en régime pseudo-statique ne permet pas d'évaluer formellement le comportement dynamique du système étudié. Le requérant a indiqué que ces vitesses de chargement ne mettent pas en cause l'objectif des essais, dont les mesures sont comparées à des résultats de calculs réalisés sans tenir compte du comportement dynamique des composants en acier.

L'IRSN recommande néanmoins que le requérant réalise des essais complémentaires considérant des vitesses de chargement supérieures à 5 mm/minute, afin d'évaluer l'influence de ce paramètre, et que les essais soient enregistrés à l'aide d'une caméra rapide afin d'observer la cinématique de déformation des sous-systèmes testés. Ce point fait l'objet des recommandations 2 et 7 de l'annexe 2 au présent avis.

En outre, le requérant propose uniquement un chargement perpendiculaire à l'axe des vis testées. Bien que les vis de fixation du capot soient principalement sollicitées en cisaillement dans les configurations de chute libre du colis en position inclinée, ces dernières sont également sollicitées en flexion. L'IRSN estime que l'influence de cette composante d'effort doit être analysée.

**Aussi, l'IRSN considère que le requérant devrait réaliser des essais complémentaires cumulant une sollicitation de flexion à la sollicitation de cisaillement appliquée aux sous-systèmes. Ce point est intégré à la recommandation 2 de l'annexe 2 au présent avis**

#### Mesures réalisées

Le requérant prévoit de réaliser trois essais par sous-système étudié. Il ne justifie pas la suffisance du nombre d'essais réalisés, ni la méthode d'interprétation des résultats, en particulier au regard de leur dispersion.

**L'IRSN estime que le requérant devra interpréter les résultats des essais sur la base d'une analyse statistique des résultats et, sur cette base, justifier la suffisance du nombre d'essais réalisés par sous-système testé. Ce point fait l'objet de la recommandation 6 de l'annexe 2 au présent avis.**

À cet égard, en l'absence de retour d'expérience et sans préjuger des résultats de l'approche statistique, l'IRSN considère que le requérant devrait augmenter le nombre d'essais réalisés par sous-système (par exemple en le doublant). Ce point fait l'objet de l'observation 2 de l'annexe 3 au présent avis.

Par ailleurs, l'IRSN estime que le requérant devrait instrumenter des vis de sous-systèmes, typiquement lors de deux essais pour sous-système, afin d'estimer les déformations de celles-ci au regard des déformations du système de fixation du capot. Ce point fait l'objet de la recommandation 8 de l'annexe 2 au présent avis.

Enfin, après les essais, outre les courbes effort/déplacement et l'effort conduisant à la rupture de la vis du sous-système, le requérant réalise des relevés dimensionnels des pièces et des photographies des composants testés, notamment des vis.

**L'IRSN estime que ces observations devront inclure un examen approfondi des vis (profil de rupture, endommagement des filets, dommages sous tête...). Ce point fait l'objet de la recommandation 9 de l'annexe 2 au présent avis.**

### Conclusion

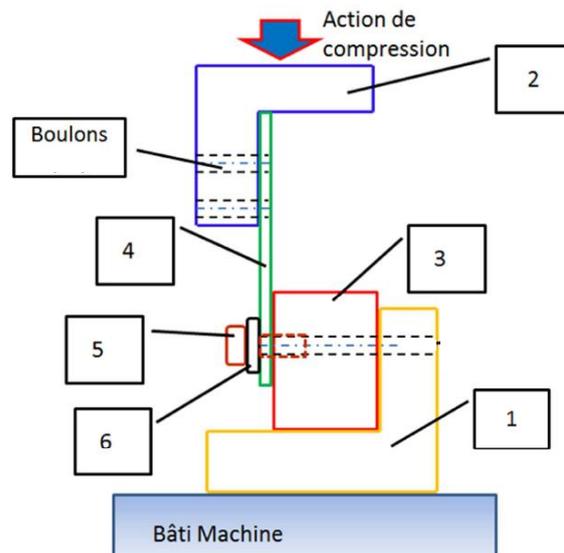
En conclusion, compte tenu des justifications présentées, l'IRSN considère que la démarche expérimentale sur laquelle s'appuie la société AREVA TN pour caractériser le comportement du système de fixation du capot amortisseur de tête de l'emballage TN G3 doit être complétée en tenant compte des recommandations présentées dans le présent avis, reprises en annexe 2.

Par ailleurs, l'IRSN estime que le requérant devrait consolider ses justifications en tenant compte des observations listées en annexe 3 au présent avis.

Enfin, au-delà de la démarche examinée dans le présent avis, il conviendra que formellement, dans les notes correspondantes, le requérant justifie que les configurations de calculs retenues dans le cadre de la démonstration de sûreté sont couvertes par les essais réalisés avec les sous-systèmes et les modélisations associées (nature des sollicitations, matériaux...). Ceci sera examiné dans le cadre des instructions à venir.

Pour le Directeur général, par ordre,  
Igor LE BARS,  
Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

Description du dispositif expérimental



- 1 : Montage base
- 2 : Support supérieur
- 3 : Plaque taraudée représentant le couvercle secondaire
- 4 : Plaque vissée représentant la plaque de support de serrage
- 5 : Vis de capot
- 6 : Rondelle

Annexe 2 à l'avis IRSN n° 2016-00099 du 31 mars 2016

**Recommandations**

L'IRSN recommande que :

- 1) avec un objectif de définir des modèles conservatifs, le requérant tienne compte, pour les modèles détaillés des sous-systèmes représentatifs du système de fixation du capot de tête, de l'ensemble de leurs composants (taroudage, filet des vis, insert associé...) ou justifie le caractère enveloppe des simplifications réalisées.
- 2) avec l'objectif que les sous-systèmes testés présentent des caractéristiques aussi proches que possible des configurations dans lesquelles les modèles globaux du modèle de colis sont utilisés, le requérant :
  - 2.2) pour les sous-systèmes représentatifs de la maquette, approvisionne des composants dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont le plus représentatif possible des composants de la maquette utilisée lors des essais de chute ;
  - 2.1) pour les sous-systèmes représentatifs du modèle de colis, mette en place des inserts représentatifs de ceux insérés dans les taroudages du couvercle secondaire ;
  - 2.3) pour les sous-systèmes représentatifs du modèle de colis, approvisionne des composants dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont proches des valeurs pénalisantes des spécifications du modèle de colis, à l'égard des sollicitations du système de fixation du capot (configurations utilisées pour les démonstrations de sûreté), en intégrant notamment les tolérances d'approvisionnement ;
  - 2.4) réalise des essais complémentaires cumulant une sollicitation de flexion à la sollicitation de cisaillement ;
  - 2.5) réalise des essais complémentaires en considérant des vitesses de chargement supérieures à 5 mm/minute.
- 3) le requérant présente des études évaluant la sensibilité du comportement mécanique du système de fixation du capot, aux variations géométriques et de propriétés mécaniques de ses composants, en tenant compte des tolérances de fabrication et d'approvisionnement, et précise la manière dont ces études sont prises en compte pour définir les modèles simplifiés.
- 4) le requérant, soit vérifie à l'issue de chaque essai l'absence de déformation de la plaque simulant la couronne de support de serrage du capot, soit modifie le dispositif expérimental afin d'introduire un système de guidage de cette plaque.

- 5) le requérant vérifie, à l'issue de chaque essai, que les éléments de liaisons (pièces et boulons) du sous-système avec la machine de test n'ont pas subi de déformation significative lors des essais et que des interactions mécaniques entre les pièces du sous-système n'ont pas modifié son comportement, ou que ces phénomènes sont sans influence.
- 6) le requérant interprète les résultats des essais sur la base d'une analyse statistique et, dans ce cadre, justifie la suffisance du nombre d'essais réalisés par sous-système, au regard notamment de la dispersion des résultats.
- 7) le requérant enregistre les essais à l'aide d'une caméra rapide afin d'observer la cinématique de déformation des sous-systèmes testés, notamment la déformée de la pièce simulant la couronne de support de serrage du capot.
- 8) le requérant, par série d'essai, instrumente les vis d'au moins deux sous-systèmes, afin d'estimer les déformations de celles-ci au regard des déformations du système de fixation du capot.
- 9) le requérant relève, à l'issue de chaque essai, les déformations des vis notamment le faciès de rupture, l'endommagement des filets et les dommages sous tête.

Annexe 3 à l'avis IRSN n° 2016-00099 du 31 mars 2016

**Observations**

- 1 Pour tous les sous-systèmes utilisés, le requérant devra préciser les propriétés mécaniques (limite d'élasticité, résistance et allongement à la rupture) et géométrique des composants utilisés (vis, rondelles, plaques simulant la couronne de support de serrage du capot, taraudages de la pièce simulant le couvercle secondaire, inserts) et justifier leur représentativité.
- 2 Sans préjuger de l'approche statistique d'interprétation des résultats, le requérant devrait augmenter le nombre d'essais réalisés par sous-système de manière à mieux appréhender la dispersion des résultats (par exemple en doublant le nombre d'essais prévu).