

Fontenay-aux-Roses, le 13 mai 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00106

Objet : Transport - Étude générique
Méthode des inéquations pour démontrer le respect des limites de débit de dose autour d'un colis de transport

Réf. : [1] Lettre ASN CODEP-DTS-2021-035342 du 27 juillet 2021.
[2] Règlement de transport de l'AIEA - SSR-6 - Édition de 2012.

Par lettre citée en première référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) sollicite l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur la pertinence des réponses apportées par la société Orano Nuclear Packages and Services, dite « Orano NPS » et dénommée ci-après le requérant, aux demandes de l'ASN formulées en 2017, afin de se prononcer sur la validité de la méthode des inéquations en matière de radioprotection. Cette méthode générique a été développée par le requérant afin de démontrer la conformité aux exigences du règlement, cité en deuxième référence, relatives aux limites de débits d'équivalent de dose (DED) autour d'un colis en conditions de transport de routine (CTR) avant le chargement de l'emballage.

Pour rappel, cette méthode vise à définir, pour les emballages destinés aux transports d'assemblages combustibles irradiés, des contenus radioactifs maximaux admissibles permettant notamment de respecter les paragraphes 617 et 659 du règlement précité. À ce jour, la méthode a été utilisée par le requérant dans les démonstrations de radioprotection des modèles de colis TN 9/4, TN G3, TN 24 BH, TN 17 MAX et TN 24 XLH version S+, et récemment pour les modèles de colis TN 24 XLH, TN 24 DH et TN 24 SH dont les demandes de renouvellement d'agrément sont en cours d'expertise.

De l'évaluation des documents transmis par le requérant en réponse aux demandes de l'ASN, tenant compte des informations complémentaires transmises au cours de l'expertise, l'IRSN retient les principaux éléments suivants.

1. RAPPEL DE LA MÉTHODE DES INÉQUATIONS

La méthode développée par le requérant vise à établir un système d'inéquations permettant à un expéditeur de justifier le respect des limites réglementaires en termes de débits d'équivalent de doses autour d'un colis à partir des caractéristiques réelles des assemblages devant être transportés. Cette vérification est réalisée avant le chargement de l'emballage. Les dossiers de sûreté des modèles de colis, s'appuyant sur cette méthode, ne définissent donc pas de contenu enveloppe en termes de radioprotection de manière explicite, mais uniquement au travers du respect d'un système d'inéquations. Ce système d'inéquations repose sur des ratios, associés aux différents types de rayonnements ionisants (principalement les neutrons, les gamma primaires du combustible et les gamma d'activation des matériaux), permettant de comparer les activités (ou termes sources) des

assemblages combustibles devant être transportés à des termes sources dits « de référence », correspondant à un chargement complet et homogène d'assemblages combustibles représentatifs selon le requérant des contenus à transporter (notamment en termes de spectre d'isotopes radioactifs et de répartition axiale des termes sources).

L'IRSN relève que la prise en compte des demandes de l'ASN a conduit le requérant à faire évoluer la définition des paramètres de la méthode examinée lors de la première instruction, notamment par la définition de marges pour prendre en compte les incertitudes des calculs. Eu égard à la complexité de la méthode et à la diversité des assemblages combustibles transportés, l'IRSN considère que l'exploitation du retour d'expérience de l'application de cette méthode (détermination des paramètres de la méthode, détermination des points de mesure et des mesures...) serait utile pour sa déclinaison à tout nouveau modèle de colis. Aussi, l'IRSN estime que l'exploitant devrait constituer un dossier autoportant présentant la méthode des inéquations, intégrant les évolutions récentes, les éléments justifiant sa validité et le retour d'expérience associé à son application aux différents modèles de colis. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 1 en annexe au présent avis.**

2. VALIDITÉ DE LA MÉTHODE

2.1. INCERTITUDES

En réponse à une demande de l'ASN relative à la prise en compte des incertitudes des différents calculs réalisés lors de l'établissement des inéquations, le requérant a présenté des études additionnelles visant à justifier la validité de la méthode pour la majorité des modèles de colis qui en font usage. De l'analyse des résultats de ces études, qualifiées d'« études de robustesse », le requérant a défini des marges de sûreté qu'il applique aux inéquations, dans les cas où il observe une sous-estimation de la méthode pour les contenus présentant des caractéristiques d'irradiation (taux de combustion et durée de refroidissement) plus pénalisantes que le contenu de référence.

Sur le principe, l'IRSN relève que le requérant a pris en compte des incertitudes liées aux différents calculs par la définition de coefficients pour les différents modèles de colis, à l'exception du modèle de colis TN 17 MAX. Pour ce dernier, le requérant ne retient pas de marge dans la déclinaison de la méthode, alors qu'il n'a pas réalisé d'étude de robustesse, ni constitué de retour d'expérience pour justifier la validité de l'application de cette méthode à ce modèle de colis. Le requérant devra compléter sa réponse pour ce modèle de colis en définissant une marge liée aux incertitudes inhérentes à la méthode des inéquations appliquée à ce modèle de colis ou, à défaut, en justifiant que la prise en compte d'une marge n'est pas nécessaire.

D'une manière générale, l'IRSN relève que les études de robustesse sont réalisées pour un seul contenu par modèle de colis, conduisant par conséquent le requérant à définir, pour chaque emballage, une marge (prise en compte dans les inéquations) qui n'est fondée que sur un seul calcul. En outre, les caractéristiques des contenus retenus dans les études de robustesse ne correspondent pas nécessairement à celles des combustibles transportés. L'IRSN estime que le requérant devrait conforter ses études pour des contenus présentant des temps de refroidissement plus élevés et des enrichissements initiaux plus réalistes. Enfin, la marge retenue n'est pas toujours appliquée aux combustibles dont les caractéristiques d'irradiation sont moins pénalisantes que celles du contenu de référence, alors que le requérant n'a pas réalisé d'étude de sensibilité pour ces contenus.

Aussi, l'IRSN estime que les éléments apportés par le requérant ne permettent pas de répondre de manière complète à la demande de l'ASN.

2.2. DÉTERMINATION DES POINTS DIMENSIONNANTS

Pour rappel, les points de l'emballage où les débits de dose sont maximaux sont déterminés pour un contenu constitué d'assemblages combustibles usés identiques. Or, les agréments des modèles de colis permettent de charger conjointement des assemblages ayant des caractéristiques différentes. À cet égard, l'ASN a demandé au requérant de justifier, dans le dossier de sûreté, que la détermination des points de l'emballage, où les débits d'équivalents de dose sont maximaux, couvre les configurations de chargement hétérogène possibles.

En réponse à cette demande, le requérant a indiqué qu'il apportera, lorsque cela sera nécessaire, des compléments de justification directement dans les dossiers de sûreté des emballages. L'IRSN relève que seuls les modèles de colis TN G3 et TN 17 MAX pourraient présenter des points dimensionnants qui ne couvrent pas tous les cas de chargements. En tout état de cause, la justification des points dimensionnants retenus pour les calculs de débit d'équivalent de dose n'est pas spécifique à la méthode des inéquations. Par conséquent, l'IRSN estime que la prise en compte de la demande de l'ASN sera à examiner, de manière spécifique aux modèles de colis TN G3 et TN 17 MAX, dans le cadre de la prochaine demande de renouvellement d'agrément de ces emballages. **Aussi, l'IRSN estime que la demande de l'ASN ne peut être considérée que partiellement soldée à ce stade.**

2.3. RECALAGE

Dans la méthode des inéquations, lors de l'étape relative au calcul des termes sources maximaux admissibles, le requérant retient des facteurs de recalage pour corriger les écarts, liés à la méthode elle-même, entre les DED calculés à partir des termes des inéquations et ceux obtenus par un calcul direct avec le code TRIPOLI. Ces écarts peuvent être dus à des causes intrinsèques aux méthodes utilisées (incertitudes liées à l'utilisation des méthodes type Monte Carlo ou au découpage énergétique utilisé pour les rayonnements gamma primaires) ou à des modélisations différentes dans les deux cas de la géométrie de l'emballage (y compris la composition des matériaux). Pour certains modèles de colis, le requérant a considéré des hypothèses de modélisation différentes lors de cette étape. Aussi, l'ASN a demandé au requérant de limiter autant que possible les écarts dus aux différences de modélisation géométrique de l'emballage.

En réponse à cette demande, le requérant a indiqué que la modélisation de l'emballage est autant que possible conforme aux plans, et que les différences de modélisation sont pénalisantes. Le facteur de recalage obtenu lors de cette étape considère ainsi un biais spécifique lié aux différences de modélisation, qui s'ajoute au biais dû aux incertitudes des méthodes utilisées. Aussi, l'existence de différences de modélisations, même si elles sont pénalisantes, ne permettent pas de s'affranchir de ce biais de modélisation. Sur le principe, ceci ne permet pas de répondre à la question de méthode soulevée par la demande. Cependant, le requérant a, depuis 2016, utilisé la méthode des inéquations pour d'autres emballages en effectuant un recalage à hypothèses identiques. Aussi, l'IRSN estime que ce point n'est pas de nature à mettre en cause l'acceptabilité de la méthode des inéquations. **L'IRSN estime donc que les éléments transmis par le requérant permettent de répondre à la question de sûreté soulevée par la demande de l'ASN.**

3. VALIDATION DES CODES DE CALCUL

En réponse à une demande de l'ASN, le requérant a transmis une note visant à justifier la validation du code d'évolution ORIGEN-ARP utilisé pour les applications relatives au transport d'assemblages combustibles irradiés. Il évalue l'éventuelle sous-estimation du code pour les termes sources des rayonnements gamma et neutron d'assemblages combustibles irradiés qu'il juge représentatifs de ceux susceptibles d'être transportés, en considérant :

- les différences entre les calculs et les mesures des compositions des isotopes ;
- la contribution de chaque isotope pour chaque bande d'énergie au terme source gamma et la contribution de chaque isotope au terme source neutron.

Les résultats obtenus montrent que le terme source des rayonnements gamma évalué par le code ORIGEN-ARP est sous-estimé pour tous les types de combustibles, de 3 % à 7 %, et que le terme source des neutrons est sous-estimé pour les combustibles irradiés dans des réacteurs à eau bouillante (REB) à base d'oxyde d'uranium (UOX). En outre, le requérant a indiqué, au cours de l'expertise, qu'il n'a pas pris en compte les incertitudes sur les mesures de composition isotopique des combustibles irradiés dans son évaluation de la sous-estimation du code ORIGEN-ARP. Par ailleurs, la sous-estimation du code ORIGEN-ARP pour les particules gamma a été évaluée en considérant la contribution de chaque bande d'énergie au terme source des rayonnements gamma et non au débit d'équivalent de dose à l'extérieur de l'emballage. Or, la sous-estimation du débit d'équivalent de dose peut

dans certains cas être beaucoup plus élevée que la sous-estimation du terme source évaluée par le requérant, compte tenu des éléments de blindage de l’emballage qui discriminent les basses énergies au profit des énergies plus élevées.

Enfin, le requérant a utilisé, pour ses calculs d’évolution, le code ORIGEN-ARP intégré dans une version ancienne du formulaire SCALE. L’utilisation d’une version plus récente du formulaire SCALE pourrait conduire à des termes sources plus pénalisants. **Aussi, l’IRSN estime que les réponses apportées par le requérant ne permettent pas de répondre de manière satisfaisante à la demande de l’ASN.**

Dans le cadre de l’étude générique sur les inéquations en matière de radioprotection, l’IRSN estime que le requérant devrait compléter son étude de validation du code ORIGEN-ARP pour les combustibles étudiés :

- en prenant en compte le blindage de l’emballage pour évaluer la contribution de chaque bande d’énergie au débit d’équivalent de dose à l’extérieur de l’emballage et en considérant les incertitudes de mesures sur les compositions isotopiques pour l’évaluation de la sous-estimation du code ORIGEN-ARP ;
- en justifiant que la version du formulaire SCALE, utilisée pour réaliser les calculs d’évolution avec le code ORIGEN-ARP, ne met pas en cause la pertinence des termes sources calculés avec une version plus récente du formulaire.

4. ACTIVATION DES EMBOUTS

Le ^{59}Co , isotope stable du cobalt contenu dans les parties métalliques des extrémités des assemblages (plenum, embouts de tête et de pied), s’active en réacteur, principalement en créant du ^{60}Co par capture neutronique, qui conduit à des émissions gamma. En réponse à une demande de l’ASN relative à la modélisation retenue pour les calculs d’activation, le requérant a indiqué que la méthode de calcul de l’activation des embouts a été présentée pour le modèle de colis TN G3. Celle-ci consiste à estimer le flux neutronique et la section efficace de capture du ^{59}Co dans les embouts en fin d’irradiation à l’aide du code de calcul APOLLO 2, en considérant une modélisation 1D axiale et un taux de combustion identique sur toute la hauteur du combustible. La composition du combustible irradié est déterminée en amont à l’aide d’un calcul d’évolution APOLLO 2. L’activité en ^{60}Co au niveau des embouts de l’assemblage est ensuite calculée à l’aide d’une formule déterministe en considérant de manière pénalisante que la section efficace de capture neutronique du ^{59}Co et le flux neutronique dans les embouts sont constants au cours de l’irradiation et sont égaux à leur valeur atteinte en fin d’irradiation.

L’IRSN a réalisé des calculs pour des combustibles, irradiés dans des réacteurs à eau pressurisée (REP), à base d’oxyde d’uranium (UOX) et d’oxydes mixtes d’uranium et de plutonium (MOX) en considérant des hypothèses plus réalistes (modélisation précise de la partie fissile, assemblage combustible en 3D, modélisation en zones axiales pour l’évolution du combustible). Dans la plupart des cas, la méthode de calcul utilisée par le requérant conduit à une activité plus faible que celle évaluée par l’IRSN (facteurs environ 2,5 pour la tête et 1,5 pour le pied). L’IRSN a notamment identifié que la prise en compte d’un taux de combustion identique sur toute la hauteur du combustible, considérée par le requérant, conduit à sous-estimer de manière significative l’activité en ^{60}Co . En outre, le requérant n’a pas n’indiqué certaines hypothèses et les détails des calculs spécifiques à chaque modèle de colis.

Le requérant a uniquement transmis ces informations pour le modèle de colis TN 24 BH dans le cadre de son renouvellement d’agrément, et a indiqué, au cours de l’expertise, qu’il précisera ces points dans les dossiers de sûreté des autres modèles de colis lors des prochaines demandes de renouvellement d’agrément. En tout état de cause, conformément à la demande de l’ASN, le requérant devra indiquer, dans les dossiers de sûreté des modèles de colis, la modélisation de l’assemblage retenue pour déterminer l’activation des structures après irradiation et justifier que la méthode d’évaluation de l’activation des structures des assemblages est qualifiée.

En conclusion, l’IRSN estime que les réponses apportées par le requérant ne permettent pas de répondre de manière satisfaisante à la demande de l’ASN.

5. PROFIL AXIAL DE TAUX DE COMBUSTION

Pour rappel, le système d'inéquations est établi à partir de calculs réalisés avec un contenu de référence. Dans le cas des assemblages combustibles usés, le contenu de référence correspond à des profils axiaux d'irradiation moyens, que le requérant estime représentatifs de l'ensemble des assemblages combustibles pouvant être transportés dans un modèle de colis donné. Les profils axiaux d'irradiation des combustibles usés peuvent s'écarter notablement des profils moyens utilisés et pourraient conduire à modifier notamment la répartition axiale des sources de rayonnement, et ainsi mettre en cause la détermination des points de l'emballage où les débits de dose sont maximaux et les coefficients utilisés dans les inéquations. Aussi, l'ASN a demandé au requérant d'étudier différents profils pour un des modèles de colis pour lesquels la méthode des inéquations a déjà été utilisée.

En réponse à cette demande, le requérant a notamment présenté une étude de la modification du profil de taux de combustion par l'insertion d'une grappe de contrôle pour des assemblages combustibles de type REP (profil dit « perturbé »). Les résultats montrent que le profil de taux de combustion retenu jusqu'alors dans les calculs de radioprotection maximise globalement le terme source au niveau central du combustible, mais le minimise significativement aux extrémités, en comparaison au profil perturbé. Or, pour les modèles de colis transportant des assemblages combustibles de type REP, les débits d'équivalent de dose sont plus élevés au niveau des tourillons qui sont proches des extrémités des assemblages. Sur ce point, le requérant a indiqué, au cours de l'expertise, qu'il transmettra, d'ici la fin de l'année 2022, des calculs réalisés avec le code TRIPOLI relatifs au modèle de colis TN G3 version L en prenant en compte le profil de taux de combustion perturbé. **La transmission de ces éléments devrait permettre de répondre complètement à la demande de l'ASN.** Toutefois, compte tenu de l'impact éventuel de la modification du profil du taux de combustion sur l'évaluation des débits de dose autour du colis, l'IRSN estime que le requérant devrait également étudier ce point pour les autres modèles de colis. Cette problématique avait notamment été soulignée par l'IRSN dans son avis de 2016 portant sur la validité de la méthode des inéquations.

6. UTILISATION PAR L'EXPÉDITEUR

Avant chargement d'un emballage, l'expéditeur définit le terme source de chaque assemblage combustible devant être transporté, à partir de ses caractéristiques et de ses conditions d'irradiation. Pour cela, il s'appuie sur des calculs réalisés avec des codes d'évolution et vérifie que les inéquations de transport, déterminées aux points dimensionnants et définies dans le dossier de sûreté, sont satisfaites. À cet égard, l'ASN a demandé au requérant de prescrire, dans le chapitre relatif aux consignes d'utilisation figurant dans les dossiers de sûreté des modèles de colis concernés par la méthode des inéquations, que les codes de calcul devront être qualifiés pour l'utilisation prévue, et que les incertitudes de calcul devront être prises en compte dans la vérification du respect des inéquations, ou, à défaut, de justifier que les conservatismes de la méthode des inéquations permettent de couvrir les incertitudes des calculs qui seront réalisés par l'expéditeur.

Le requérant a indiqué que le retour d'expérience permet de conforter la robustesse de la méthode, et de montrer qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter d'incertitudes complémentaires. L'analyse du retour d'expérience fait l'objet du paragraphe suivant. Sur le principe, l'IRSN considère que cette orientation est satisfaisante. **Aussi, l'IRSN estime que les éléments présentés par le requérant répondent de manière acceptable à la demande de l'ASN.**

7. RETOUR D'EXPÉRIENCE

En réponse à une demande de l'ASN relative à la constitution d'un retour d'expérience de l'utilisation de la méthode des inéquations pour les transports opérés avant le 1^{er} janvier 2019, le requérant a réalisé des mesures de débits d'équivalents de dose autour des colis TN 24 BH et TN 9/4 afin de les comparer aux débits d'équivalents de dose théoriques calculés à l'aide de la méthode des inéquations. Ces retours d'expérience, qui ont fait l'objet d'expertises de l'IRSN dans le cadre des demandes de renouvellement d'agrément de ces deux modèles de colis,

ont montré que les débits d'équivalent de dose mesurés étaient inférieurs à ceux calculés avec les inéquations d'au moins 60 % pour le modèle de colis TN 24 BH et d'au moins 40 % pour le modèle de colis TN 9/4. **L'IRSN estime que les éléments transmis par le requérant répondent de manière satisfaisante à la demande de l'ASN.**

De fait, ce retour d'expérience semble montrer l'existence de marges suffisantes pour couvrir les incertitudes, inhérentes à la méthode des inéquations, relatives à la validité de sa méthode, à la validation du code de calcul d'évolution, au profil axial d'irradiation et au calcul de l'activité dans les embouts. Toutefois, l'IRSN estime que, d'une part ce retour d'expérience s'appuie sur un nombre limité de transports et de contenus, d'autre part, comme indiqué dans les chapitres précédents, les compléments transmis visant à apprécier la robustesse de la méthode mériteraient d'être complétés.

L'IRSN considère que la constitution d'un retour d'expérience plus complet, visant à couvrir une plage étendue de caractéristiques du combustible irradié, permettrait de consolider la pertinence de la méthode et des paramètres retenus. Par ailleurs, les comparaisons entre les calculs réalisés avant chargement et les valeurs indiquées dans les documents de transport, même si elles sont moins précises qu'une mesure dédiée à valider un retour d'expérience, devraient également permettre de renforcer le retour d'expérience ; en particulier, il serait représentatif des mesures *in situ* qui sont réalisées en pratique. **Ces éléments conduisent l'IRSN à formuler l'observation n° 2 en annexe au présent avis.**

8. CONCLUSION

Sur la base des documents examinés et en tenant compte tenu des informations transmises par le requérant au cours de l'expertise, l'IRSN considère que la méthode des inéquations définie par la société Orano NPS, visant à démontrer le respect des limites de débit d'équivalent de dose autour du colis avant le chargement de l'emballage, est acceptable sur le principe.

Toutefois, dans le cadre de son application et eu égard à la diversité des assemblages combustibles transportés, l'IRSN estime que le requérant n'a pas répondu de manière suffisante à certaines demandes de l'ASN formulées lors de la précédente instruction, notamment celles relatives à la détermination des incertitudes de calcul des paramètres des inéquations, à la validation du code d'évolution ORIGEN ARP et à l'évaluation du profil axial d'irradiation des assemblages combustibles.

Par ailleurs, afin de consolider la validité de la méthode et d'homogénéiser son paramétrage et sa mise en application, l'IRSN estime que le requérant devrait tenir compte des observations formulées en annexe au présent avis.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Eric LETANG

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2022-00106 DU 13 MAI 2022

Observations de l'IRSN

Observation N° 1

L'IRSN estime que le requérant devrait constituer un dossier autoportant présentant la méthode des inéquations (description, détermination des paramètres, etc.), les éléments justifiant sa validité (activation des coques et des embouts, validation des codes de calcul, recalage, etc.), ainsi que sa déclinaison aux différents modèles de colis et le retour d'expérience associé.

Observation N° 2

L'IRSN estime que le requérant devrait réaliser un retour d'expérience de l'utilisation de la méthode des inéquations pour les prochains transports des modèles de colis TN G3, TN 24 XLH, TN 24 DH et TN 24 SH, en plus de celui prévu sur les modèles de colis TN 17 MAX et TN 24 BH, en comparant les calculs réalisés avant chargement aux mesures des campagnes dédiées et à celles indiquées dans les documents de transport des expéditions réalisées par l'exploitant.