



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 22 octobre 2024

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2024-00147

---

**Objet :** Transport - Étude générique  
**Comportement du bois des capots amortisseurs des modèles de colis de transport**

---

**Réf. :** Lettre ASN CODEP-DTS-2023-059803 du 17 novembre 2023.

---

Par lettre citée en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) sollicite l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les compléments apportés par la société Orano NPS, dénommée ci-après « le requérant », à l'étude générique relative au comportement du bois des capots amortisseurs des modèles de colis de transport.

Les capots amortisseurs des modèles de colis de transport du requérant, généralement constitués de blocs de bois, assurent plusieurs fonctions de sûreté, notamment la protection mécanique contre les chocs en dissipant l'énergie de chute par l'écrasement du bois. L'étude générique relative aux capots amortisseurs vise à répondre aux questionnements récurrents sur la modélisation du comportement du bois soulevés lors de l'expertise des dossiers de sûreté des modèles de colis de transport.

L'ASN demande en particulier à l'IRSN d'examiner les réponses du requérant relatives à la définition des paramètres de la loi de comportement du bois, à la modélisation du bois en comportement dynamique et à la validité du modèle numérique après le point de seuil de talonnement du bois des capots amortisseurs.

De l'évaluation des documents transmis, tenant compte des éléments apportés par le requérant au cours de l'expertise, l'IRSN retient les principaux éléments suivants.

### 1. DÉFINITION DES PARAMÈTRES DE LA LOI DE COMPORTEMENT

Pour mémoire, afin de simuler les chutes de 9 mètres des modèles de colis, le requérant modélise l'écrasement des capots amortisseurs à l'aide de lois de comportement du bois représentant la contrainte en fonction de la déformation. Ces lois présentent d'abord une augmentation linéaire de la contrainte d'écrasement par rapport à la déformation, puis un plateau où le bois subit de larges déformations à contrainte quasi-constante, dite « contrainte plateau », et enfin une augmentation de la contrainte d'écrasement. Le requérant décompose l'augmentation finale de la contrainte en deux zones : la zone de talonnement qui débute au point de seuil de talonnement et la zone de compaction qui commence au niveau du point de compaction.

En réponse à une demande de l'ASN relative à la définition précise des points de seuil de talonnement et de seuil de compaction, le requérant définit tout d'abord le seuil de talonnement comme étant le point où la contrainte

MEMBRE DE  
**ETSON**

d'écrasement s'écarte sensiblement par rapport à la contrainte plateau, sur la base d'essais de compression en conditions quasi-statiques sur des échantillons de bois. **Pour l'IRSN, la méthode utilisée par le requérant pour déterminer le point de seuil de talonnement permet de retranscrire correctement le comportement du bois en compression quasi-statique.** Pour déterminer le point de seuil de compaction, le requérant considère que ce point est atteint lorsque la masse volumique du bois écrasé atteint celle de la cellulose. Il détermine ainsi l'écrasement et la contrainte au seuil de compaction en se basant sur les caractéristiques mécaniques de la cellulose issues de la littérature. **Ceci est acceptable dans le principe.** Aussi, **l'IRSN estime que les éléments apportés par le requérant permettent de répondre de manière satisfaisante à la demande de l'ASN.**

## 2. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU BOIS

Le requérant détermine les lois de comportement du bois par essais de compression en conditions quasi-statiques. Or, lors d'une chute de 9 m, le bois est sollicité de façon dynamique avec une vitesse de déformation importante. À cet égard, l'ASN a demandé au requérant de « *démontrer que le recalage du modèle numérique exploité avec des données statiques permet de conclure sur le comportement mécanique du bois en conditions dynamiques* » en précisant que la « *justification peut être apportée par l'étude de comportement d'échantillons de bois en conditions d'écrasement dynamique* ».

Pour répondre à cette demande, le requérant s'appuie sur des exemples de modélisations numériques représentant différentes configurations de chute et différentes essences de bois. L'IRSN relève que les exemples retenus sont représentatifs d'une grande diversité des configurations rencontrées dans les dossiers de sûreté des modèles de colis du requérant. Toutefois, dans les calculs numériques de chute de 9 m des modèles de colis, le requérant ne tient pas compte de la sous-estimation des calculs numériques obtenue lors du recalage du modèle sur les essais de chute, **ce qui n'est pas satisfaisant.** Aussi, **l'IRSN estime que le requérant devrait prendre en compte, dans les calculs numériques de chute de 9 m du modèle de colis, les incertitudes obtenues lors de l'étape de validation du modèle numérique.**

Au regard des différents exemples de modélisations, le requérant conclut que le recalage, réalisé avec les lois de comportement du bois obtenues par des essais quasi-statiques, permet de modéliser le comportement mécanique des capots amortisseurs en conditions dynamiques. Pour l'IRSN, la validation du modèle numérique réalisée par le requérant vise seulement à vérifier l'aptitude globale du modèle numérique à simuler correctement le comportement mécanique de la maquette. Or, d'autres paramètres de modélisation (autres que la loi de comportement du bois) peuvent entraîner des modifications importantes sur les accélérations obtenues par le modèle numérique. Ainsi, la concordance entre les résultats du modèle numérique et de l'essai de chute pourrait être liée à un phénomène de compensation des erreurs. Pour rappel, afin de limiter ce phénomène, le guide n° 28 de l'ASN, relatif à la qualification des outils de calcul scientifique utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire, indique que la validation d'outil de calculs scientifiques comprend, autant que possible, une validation à effets séparés des phénomènes physiques importants. Dans le cas présent, le requérant n'a pas effectué de validation à effets séparés des lois de comportement du bois dans les conditions de chute de 9 m. Pour les cas présentés par le requérant, l'IRSN convient toutefois que les accélérations maximales obtenues par le modèle numérique du requérant sont généralement enveloppes par rapport aux accélérations maximales obtenues lors de l'essai de chute de la maquette. En revanche, **l'IRSN estime que, dans les cas où les accélérations maximales obtenues par le modèle numérique ne sont pas enveloppes des accélérations maximales obtenues lors des essais de chute sur maquette, il appartient au requérant soit de consolider la validation du modèle numérique par une validation à effets séparés de la loi de comportement du bois en conditions dynamiques, soit de retenir des choix d'hypothèses permettant d'obtenir une valeur conservative des grandeurs d'intérêt afin de couvrir les lacunes de validation.**

En l'état, l'IRSN estime que les éléments présentés par le requérant ne permettent pas de répondre de manière totalement satisfaisante à la demande de l'ASN.

### 3. VALIDITÉ DU MODÈLE APRÈS LE SEUIL DE TALONNEMENT

Pour mémoire, même si l'écrasement global du capot amortisseur n'atteint pas le seuil de talonnement, certains éléments de maillage du modèle numérique utilisé par le requérant peuvent être écrasés au-delà de ce seuil. Aussi, l'ASN a demandé au requérant de justifier, dans le cas où certains éléments de maillage sont au-delà de ce seuil, la validité du modèle numérique utilisé. L'ASN précise toutefois que le cas où l'ensemble des éléments est au-delà du seuil de talonnement sur une section dite « complète<sup>1</sup> » est à traiter dans les dossiers de sûreté des modèles de colis concernés.

En réponse à cette demande, le requérant montre que, sur une section complète de bois, les éléments déjà talonnés ne peuvent s'écraser qu'à une contrainte plus grande que les éléments non talonnés et que, par conséquent, ce sont ces derniers qui s'écraseront tant qu'ils ne sont pas talonnés à leur tour. **Ceci est satisfaisant. Aussi, tant que l'ensemble des éléments d'une section complète de bois n'est pas au-delà du seuil de talonnement, l'IRSN estime que la validité du modèle numérique est justifiée, à l'exception des remarques formulées sur le comportement en conditions dynamiques. Ainsi, l'IRSN considère que le requérant a répondu dans le principe à la demande de l'ASN.**

S'agissant de cas de chute où l'ensemble des éléments de maillage est au-delà du seuil de talonnement sur une section complète, le requérant retient un point de compaction qui n'a pas fait l'objet d'essais expérimentaux de compression. À cet égard, il indique que la validation du point de compaction se fait *via* des recalages d'essais sur les maquettes d'emballage travaillant dans le même domaine de validité. Toutefois, la loi de comportement après le seuil de talonnement n'a pas fait l'objet de validation à effets séparés comme préconisé dans le guide n° 28 de l'ASN. En outre, les écrasements de la maquette obtenus lors des essais de chute sont généralement inférieurs aux écrasements du modèle de colis à la température atteinte en CNT (conditions normales de transport). Aussi, l'IRSN estime que le caractère conservatif de la loi de comportement du bois après le seuil de talonnement n'est pas justifié. **En tout état de cause, pour les cas où l'ensemble des éléments de maillage est au-delà du point de seuil de talonnement sur une section complète, il appartient au requérant de l'étudier dans les dossiers de sûreté des modèles de colis concernés, comme indiqué dans la demande de l'ASN.**

### 4. CONCLUSION

Sur la base des documents examinés, en tenant compte des informations transmises par la société Orano NPS au cours de l'expertise, l'IRSN estime que les compléments apportés par la société Orano NPS permettent d'améliorer les connaissances sur la modélisation du comportement du bois des capots amortisseurs des modèles de colis de transport.

Toutefois, la société Orano NPS ne répond que partiellement à la demande de l'ASN relative au comportement du bois des capots amortisseurs en conditions dynamiques.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Eric LETANG

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

---

<sup>1</sup> La section complète correspond à la colonne de bois reliant la cible à l'enveloppe de confinement.