

1 Simulations du comportement mécanique de colis de transport de matières radioactives en cas de chutes sur cibles réelles¹

• R. VALLÉE (IRSN)

• L. PIOT (IRSN)

L'IRSN contribue au contrôle de la sûreté des transports de matières radioactives en réalisant les expertises techniques des dossiers de sûreté des modèles de colis, en support à la délivrance des agréments par les autorités compétentes. Par ailleurs, l'IRSN participe par ses travaux de recherche à la gestion des risques liés aux transports.

La présente étude consistait à simuler le comportement mécanique de colis de type B (colis renfermant des matières radioactives de haute activité) lors d'une grande variété d'accidents de manutention choisis parmi les accidents les plus sévères susceptibles de se produire lors d'un transport. L'objectif final était de s'assurer du conservatisme des épreuves de chute libre imposées par la réglementation (l'une de 9 m de haut sur une cible plane indéformable et l'autre de 1 m de haut sur un poinçon cylindrique de 15 cm de diamètre), auxquelles ce type de colis doit résister pour être qualifié.

Deux modèles courants de colis de type B (TN 12 et FS 47) ont été retenus pour cette étude : l'emballage TN 12 (masse en charge de 103 tonnes) est utilisé pour le transport d'assemblages combustibles usés depuis les réacteurs de puissance jusqu'à l'usine de retraitement. L'emballage FS 47 (masse en charge de 1 500 kg) est utilisé pour le transport de poudre de dioxyde de plutonium depuis l'usine de retraitement vers les usines de fabrication de combustible MOX.

Château de transport TN12.



1 - La majeure partie de cette étude a été réalisée dans le cadre d'un programme d'intérêt commun regroupant l'IRSN et COGEMA.

Quatre familles de cibles ont été envisagées : sols (argile, sable et roche), différentes structures métalliques, une structure en béton armé et un emballage de même type.

- Quatre familles de cibles ont été envisagées : des sols (argile, sable et roche), différentes structures métalliques représentatives de l'environnement industriel des colis, une structure en béton armé et un emballage de même type. Compte tenu du nombre important de configurations à étudier, l'approche par simulation numérique a été privilégiée. Chaque cible a été modélisée à l'aide de lois de comportements spécifiques. Chaque modèle numérique d'emballage a été recalé sur les résultats des essais de chutes de 9 m sur cible indéformable de maquettes d'emballages ; le châssis du TN 12 (qui apparaît en **figure 5**, page 107) et le râtelier du FS 47 (qui apparaît en **figure 6**, page 107) ont également été modélisés afin de prendre en compte l'environnement réel des emballages. Après simulation des différentes configurations d'impact, une analyse des résultats est effectuée et, si nécessaire, les modèles numériques sont affinés et les calculs poursuivis.

Maillages et lois de comportement mécanique

Dans une première phase, un modèle numérique simplifié d'un emballage type de transport de combustibles usés est réalisé afin de simuler (avec le code ABAQUS) des chutes verticales et des chutes en coin sur différents types de sol. Ce modèle simplifié comprend le corps de l'emballage

lage et les capots amortisseurs en bois confiné dans des caissons métalliques. Le corps et les caissons sont modélisés à l'aide d'éléments coques 3D, tandis que le bois est modélisé à l'aide d'éléments volumiques 3D. Une loi de comportement isotrope élastique (module de Young $E = 210$ GPa, coefficient de Poisson $\nu = 0,3$) est associée au corps. Le comportement du bois est considéré comme étant élasto-plastique, avec des caractéristiques mécaniques ajustées en fonction de l'orientation de l'emballage lors de la chute.

Dans une seconde phase, les modèles numériques complets des emballages TN 12 et FS 47 sont réalisés. Comme les calculs sont réalisés avec deux codes de mécanique dynamique dissemblables (DYNA3D et PAM-CRASH), du fait des natures de cibles différentes, deux modèles distincts ont dû être développés et recalés pour chacun des emballages. Les modèles des emballages TN 12 et FS 47 sont réalisés avec sensiblement le même niveau de détail ; à titre d'exemple, ceux de l'emballage TN 12 sont décrits ci-après.

Le modèle numérique complet de l'emballage TN 12 comprend le maillage de la virole, du fond, du bouchon, de la bride, du couvercle, du blindage neutronique, des tourillons et des capots amortisseurs. Les ailettes en cuivre ne sont pas modélisées, mais leur masse est prise en compte. La virole, les tourillons, le blindage neutronique et le bois des capots amortisseurs sont modélisés à l'aide d'éléments volumiques 3D. Des "éléments coque" sont utilisés pour les caissons des capots.

Pour le modèle numérique de l'emballage TN 12, développé avec DYNA3D, le contenu (panier et assemblages combustibles) est modélisé par un cylindre rigide à l'intérieur de la cavité ou par des masses nodales liées au corps de l'emballage. Pour le modèle développé avec PAM-CRASH, la masse du contenu est prise en compte par une modification de la densité du corps.

Les lois de comportement mécanique associées aux composants en acier et en aluminium sont de type élasto-plastique. La loi de comportement du blindage neutronique est élasto-linéaire pour le modèle PAM-CRASH et élasto-plastique pour le modèle DYNA3D. Le comportement mécanique du bois des capots amortisseurs est modélisé par une loi orthotrope non linéaire. Les vis de fixation du système de fermeture sont modélisées par des éléments rigides.

Pour les deux modèles de l'emballage FS 47 développés avec DYNA3D et PAM-CRASH, le corps et le système de fermeture ont été modélisés à l'aide d'éléments volumiques. Ces modèles sont constitués respectivement de 48 000 et de 16 000 éléments.

Impacts sur sols naturels

Neuf types de cible ont été étudiés afin de couvrir une gamme de sols naturels aussi étendue que possible, argile, sable et roche, chacun possédant trois niveaux de dureté : tendre, mi-dur et dur. Une loi bilinéaire élasto-plastique est utilisée pour modéliser ces matériaux, avec une limite élastique définie par un critère de Mohr-Coulomb ($\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$), excepté dans le cas de la roche, pour laquelle le critère de Von Mises est utilisé (tableau 1).

Trois orientations de chutes ont été considérées : verticale, en coin et horizontale. Les hauteurs de chutes envisagées étaient de 9 m, de 20 m et de 40 m. Seul l'emballage type destiné au transport d'assemblages combustibles usés a été étudié, et les principaux résultats sont présentés ci-après.

• Chutes verticales

Pour les trois types de sable, les trois types d'argile et la roche tendre, le comportement de l'emballage est pratiquement le même et ne varie que très progressivement avec l'augmentation de la hauteur de chute : à 9 m, le capot amortisseur s'écrase d'environ 10 mm tandis que la

Tableau 1

Valeurs numériques des lois de comportement.				
Sol naturel	E (MPa)	ϕ (°) ou σ_e (MPa)	c (MPa)	ν
Argiles	50 - 150 - 300	0	0.1 - 0.3 - 0.8	0.3
Sables	50 - 250 - 500	15 - 25 - 35	0	0.3
Roches et béton	2500 - 34000 - 30000	10 - 26 - 70	X	0.3

Lors des impacts sur les cibles non perforantes plus de 96 % de l'énergie d'impact est dissipée dans la cible et le châssis.

pénétration de l'emballage dans le sol varie entre 80 et 510 mm. Les cinématiques d'impacts sont essentiellement gouvernées par la rigidité des cibles. Dans le cas des roches mi-dures et dures, le comportement de l'emballage est caractérisé par un écrasement de 45 mm du capot amortisseur pour une hauteur de chute de 9 m ; cet écrasement augmente rapidement avec la hauteur de chute, et les cinématiques d'impact sont gouvernées par la capacité d'amortissement du bois. La hauteur de chute pour laquelle l'écrasement du capot est identique à celui résultant d'une chute de 9 m sur cible indéformable, soit un écrasement de 60 mm, est de 13,5 m.

• Chute en coin

Les impacts sur sable et argile conduisent à un écrasement faible du capot amortisseur et à un enfoncement de l'emballage dans le sol plus important que lors des chutes verticales (effet de coin). Pour une hauteur de chute de 9 m, les impacts sur roche engendrent un écrasement du capot amortisseur de 380 mm, semblable à celui résultant d'une chute sur cible indéformable. La relation entre la hauteur de chute et l'écrasement du capot n'est cependant plus pertinente dès lors que le talonnement du bois survient¹.

Impacts sur cibles métalliques

Six cibles représentatives de l'environnement des emballages durant le transport ont été étudiées (**tableau 2**) : palée de grue, flanc de navire, fond de navire, longeron de wagon, essieu de wagon (**figure 1**) et supports de tourillons (**figure 2**). Les quatre premières sont considérées comme non perforantes : ce sont des structures mécanosoudées en tôle d'acier ordinaire dont l'épaisseur typique est de 25 mm. En revanche, l'essieu de wagon, qui est un composant massif, et les supports de tourillons, réalisés en tôle épaisse (40 à 70 mm), sont considérés comme étant des cibles perforantes. Dans tous les cas, une loi de comportement bilinéaire élasto-plastique est utilisée pour modéliser l'acier de ces cibles.

- Lors des impacts sur les cibles non perforantes, et quelle que soit l'orientation testée, les paramètres caractéristiques des impacts sont similaires. Plus de 96 % de l'énergie d'impact est dissipée dans la cible et le châssis, la durée de l'impact est supérieure à 100 ms et l'accélération maximale subie par l'emballage est inférieure à 70 g : les contraintes dans l'emballage et dans les vis du couvercle sont très inférieures aux valeurs acceptables. Les effets secondaires pouvant

Tableau 2

Configurations d'impacts considérées pour l'emballage TN12.

	Cibles	Haut.	Châssis	Orientation de l'emballage
	Palée de grue	3 m	oui	horizontale et \perp à la cible
	Fond de navire (plein)	19 m	oui	horizontale
	Fond de navire (vide)	19 m	oui	horizontale
		19 m	oui	+10° de l'horizontale
	Flanc de navire	6 m	oui	horizontale et \perp à la cible
		6 m	oui	-10° de l'horizontale et \perp à la cible
		6 m	oui	+10° de l'horizontale et \perp à la cible
Longeron de wagon	5 m	non	horizontale et // à la cible	
Essieu de wagon	5 m	non	verticale, impact côté fond	
	5 m	non	CdG à la verticale du point d'impact	
	Supports de tourillons	5 m	non	horizontale

1 - Pour les sols particulièrement mous, une chute ne produisant aucun dégât mécanique sur l'emballage peut néanmoins, du fait de l'enfoncement dans le sol, de la chaleur dégagée par le contenu et des entraves à la dissipation thermique, causer des augmentations de température inacceptables.

Tableau 3				
Configurations d'impacts étudiées pour l'emballage FS 47.				
	Cibles	Haut.	Râtelier	Orientation de l'emballage
Non perforante	Palée de grue	3 m	oui	verticale, impact côté fond
	Fond de navire (plein)	19 m	oui	verticale, impact côté fond
	Flanc de navire	6 m	oui	verticale, impact presque centré côté fond
		6 m	oui	verticale, impact centré côté fond

résulter de la destruction des cibles n'ont pas été étudiés.

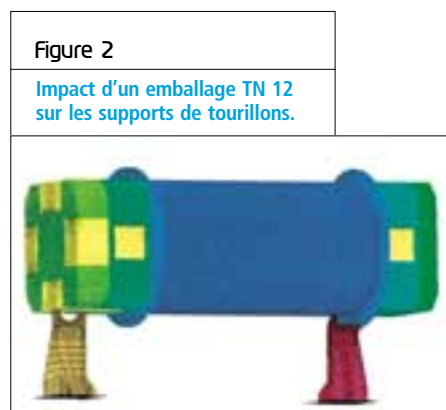
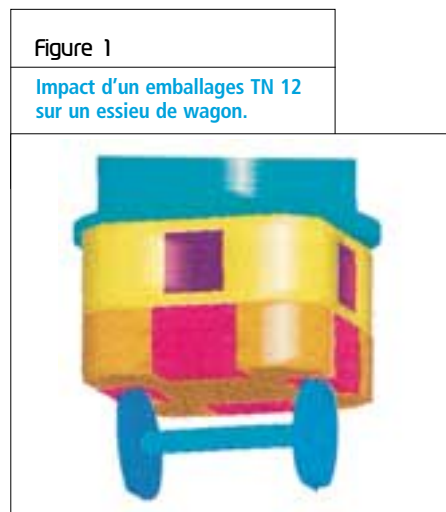
Lors des impacts sur cibles perforantes, le modèle numérique de l'emballage TN 12 a été amélioré afin d'intégrer les liaisons entre les différents composants du système de fermeture : les jeux et les vis ont été modélisés et les contacts, gérés (par une méthode dite de pénalité). Au niveau du couvercle, le maillage a été raffiné.

Les deux orientations testées pour la chute sur l'essieu de wagon conduisent à des résultats identiques : 10 à 30 % de l'énergie d'impact est absorbée par la cible, le restant étant absorbé par l'emballage. La durée de l'impact est d'approximativement 55 ms et l'accélération maximale subie par l'emballage est de 30 g. L'essieu de wagon perce le capot amortisseur et engendre des déformations plastiques locales sur le système de fermeture (5-6 %). Les contraintes dans les vis sont maximales dans le cas de la chute avec orientation verticale, mais restent cependant inférieures à la limite de la rupture.

L'étude de l'impact de l'emballage TN 12 sur les supports de tourillons a, en fait, conduit à réaliser trois simulations dans le but d'obtenir une meilleure estimation de l'influence de la modélisation des vis sur les résultats des calculs. Les impacts ont les caractéristiques suivantes : 55 % de l'énergie d'impact est absorbée par la cible, la durée de l'impact est de 60 ms et l'accélération subie, de 45 g. Le support de tourillon perce le capot amortisseur et engendre des déformations plastiques. Cependant, contrairement au cas précédent, les contraintes dans les vis du couvercle (seconde barrière de confinement) incluent une forte proportion de cisaillement, de sorte que l'une des douze vis de fixation du couvercle devrait rompre ; les vis de fixation de la bride du bouchon (première barrière de confinement) ne présentent pas de signe de rupture, mais un nouveau modèle prenant en

compte la rupture des vis du couvercle serait nécessaire pour confirmer ce point.

Les configurations considérées pour l'emballage FS 47 ne provoquent pas de dégât inacceptable sur celui-ci (tableau 3). En revanche, son râtelier, qui se comporte comme un amortisseur, est fortement endommagé, en particulier lors de l'impact sur le fond de navire. La configuration la plus dommageable pour l'emballage FS 47 lui-même est la chute sur le flanc de navire lorsque l'impact est parfaitement centré.



Impacts sur une structure en béton armé

Les modèles de cible utilisés pour simuler les impacts sur des sols naturels sont trop simples pour s'appliquer au cas des structures en béton armé, qui ont chacune leur comportement propre. Il était donc nécessaire de traiter le cas des impacts sur cible béton au travers d'une structure spécifique.

Du haut vers le bas, la structure en béton choisie est constituée (figure 3) d'une dalle de revêtement, d'un remblai en tout-venant, d'une dalle épaisse, d'un réseau de poutres, de chapiteaux et enfin de pieux ancrés dans la roche ; la hauteur totale est de 20,8 m. Dans la zone d'impact, le maillage a été raffiné, et les armatures sont modélisées par des éléments poutre élastoplastiques, sans prise en compte de la rupture ni de la décohésion acier-béton. Dans les autres zones de la structure, une loi spécifique à l'étude des fondations en béton armé soumises à des chargements dynamiques est utilisée. Au total, la structure en béton est composée de 160 000 éléments et de 115 matériaux différents, du fait essentiellement des taux de ferrailage, très variables suivant les zones.

Dans le cas de l'emballage TN 12, cinq configurations de chute d'une hauteur de 8 m (correspondant à la hauteur maximale de manutention) ont d'abord été testées, afin de déterminer le point d'impact et l'orientation les plus pénalisants. En fait, les résultats ont montré que, dans tous les cas, l'endommagement du béton est très important (figure 4) : de nombreuses armatures plastifient, la flèche maximale atteint environ 1 m, et le risque de perforation de la dalle est important. Les dégâts sur le colis sont faibles en comparaison de ceux provoqués par une chute réglementaire de 9 m, et il n'y a pas de risque de relâchement de matière radioactive. Trois simulations supplémentaires ont ensuite été effectuées avec un colis en position horizontale, centré sur une travée, et ce, pour trois hauteurs de chutes : 6 m, 4 m et 2 m. Il apparaît que les risques de perforation totale et d'ébranlement

Figure 3

Impact d'un emballage TN 12 sur une structure en béton armé.

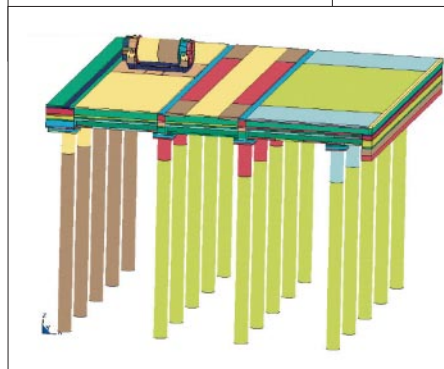
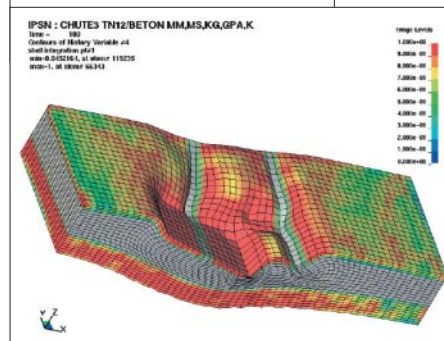


Figure 4

Dégâts sur la structure béton après une chute de 8 m.



généralisé de la structure en béton sont élevés pour des hauteurs supérieures ou égales à 6 m. Dans le cas de l'emballage FS 47, quatre simulations de chute d'une hauteur de 8 m, dans différentes configurations, ont montré que la chute en coin au centre d'une travée est la plus pénalisante, à la fois pour le colis et pour la dalle en béton : la pénétration du colis dans la dalle est de 200 mm, et les déformations plastiques en fond de colis atteignent 15 %. De nouvelles simulations ont alors été effectuées avec cette orientation, mais en augmentant la hauteur de chute afin de connaître la marge de sûreté du colis. Pour une hauteur de 50 m, soit $v = 113$ km/h, la pénétration du colis dans le béton est de 400 mm, tandis que l'endommagement du colis est comparable à celui qui résulte de la chute réglementaire de 9 m sur cible indéformable.

La structure en béton est composée de 160 000 éléments et de 115 matériaux différents.

Impacts de colis sur colis (TN 12 sur TN 12, FS 47 sur FS 47)

Les simulations d'impact de colis sur colis ont été réalisées à l'aide du logiciel DYNA3D. Dans la première simulation pour les colis TN 12, on considère des colis TN 12 avec leurs châssis, en position horizontale, leurs axes longitudinaux parallèles entre eux. Les châssis absorbent 50 % de l'énergie totale de chute. Le corps et le système de fermeture des emballages TN 12 ne sont pas endommagés. Dans la deuxième simulation, on considère un colis TN 12 sans son châssis qui chute sur un colis TN 12 avec châssis. Les deux colis sont horizontaux, mais leurs axes longitudinaux sont, cette fois, perpendiculaires (figure 5). Une ovalisation de plusieurs millimètres des viroles des emballages TN 12 est alors observée. Cette ovalisation ne dépend pas de la modélisation utilisée pour le contenu (cylindre rigide ou masses nodales), mais une modification de la loi de comportement du blindage neutronique (par augmentation de la limite d'élasticité de ce matériau) conduit à une ovalisation dix fois plus importante. Une amélioration de la connaissance et de la modélisation du comportement mécanique du blindage neutronique est donc nécessaire pour évaluer les déformations potentielles du contenu (panier et assemblages combustibles).

Dans la troisième simulation, on considère un colis TN 12 sans châssis qui chute en position oblique sur le système de fermeture d'un second colis TN 12 avec châssis et en position horizontale. Le châssis absorbe 53 % de l'énergie totale de chute. L'emballage TN 12 qui chute est peu endommagé, mais le système de fermeture du second emballage TN 12 présente des déformations plastiques (environ 4 %) qui n'affectent toutefois pas l'étanchéité du colis.

Par ailleurs, en ce qui concerne la chute de l'emballage TN 12, la hauteur qui conduit à des dégâts équivalents à ceux résultant de la chute réglementaire a été recherchée. La première configuration a été retenue. Les critères de comparaison des dégâts sont : l'accélération, la déformation des tourillons et l'aire des surfaces impactées ainsi que la quantité d'énergie absorbée par l'emballage. Une hauteur d'environ 50 m est nécessaire pour produire des dommages équivalents à ceux résultant de la chute réglementaire de 9 m de haut.

Dans la première simulation pour les colis FS 47, on considère un colis FS 47 qui chute de 16 m en

position verticale, sans râtelier, sur un autre colis FS 47 qui repose en position verticale dans son râtelier. Le capot amortisseur et le râtelier du colis cible sont fortement endommagés et absorbent 99 % de l'énergie de chute. Néanmoins, le système de fermeture reste intègre.

Dans la seconde simulation, un colis FS 47 chute de 16 m en position oblique sur le capot amortisseur d'un second colis FS 47 reposant dans son râtelier. Le point d'impact est centré sur le système de fermeture (figure 6). Le colis FS 47 cible absorbe 70 % de l'énergie de chute, principalement au niveau de son capot amortisseur. La partie supérieure de son système de fermeture est impactée, mais la modélisation utilisée n'est pas assez précise pour permettre de déterminer l'endommagement causé et diagnostiquer une éventuelle perte d'étanchéité.

Figure 5

Impact de deux colis TN 12 l'un sur l'autre (axes \perp).

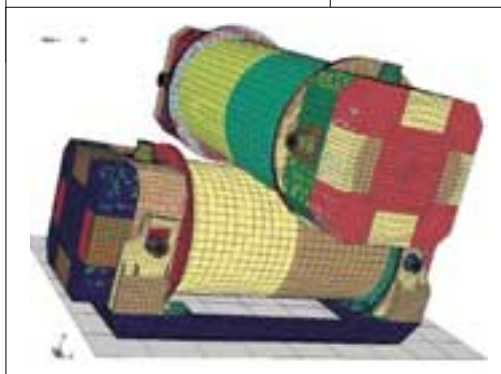


Figure 6

Impact de deux colis FS 47 l'un sur l'autre.



Les deux colis étudiés conserveraient leur capacité de confinement en cas d'accident réel, et leurs équipements additionnels (châssis et râtelier), ainsi que les cibles, absorberaient une part importante de l'énergie d'impact.

De même que pour le colis TN 12, on a recherché une hauteur de chute équivalente, les critères de comparaison des dégâts étant identiques. Des hauteurs de 35 m et de 40 m ont été déterminées respectivement pour la première et la seconde configuration.

Globalement, pour les différentes configurations considérées (figure 7), la répartition de l'énergie

de chute entre le colis cible et le colis projectile est la suivante : les colis cibles absorbent environ les deux tiers de l'énergie totale de chute, l'autre tiers étant absorbé par les colis projectiles.

Conclusion

L'étude de nombreuses configurations d'impact a permis d'identifier les cas les plus dommageables et a montré que les deux colis étudiés conserveraient leur capacité de confinement en cas d'accident réel et que leurs équipements additionnels (châssis et râtelier) ainsi que les cibles absorberaient une part importante de l'énergie d'impact et augmenteraient ainsi les marges de sûreté.

Pour les deux modèles de colis étudiés, les épreuves réglementaires de chutes apparaissent donc plus sévères que les accidents de manutention qui ont été simulés ; il convient toutefois de mentionner que certaines configurations de chute mériteraient des compléments d'étude pour mieux évaluer la gravité des dommages causés aux systèmes de fermeture des emballages TN 12 et FS 47 et au contenu de l'emballage TN 12 (panier et assemblages combustibles).

Figure 7

Comportement relatif colis cibles / colis projectiles.

