

# VALIDATION DE MOYENS D'ARRIMAGE POUR LE TRANSPORT DES PANIERS ET CADRES DE BOUTEILLES DE GAZ

Bien qu'il n'existe pas de données statistiques sur les accidents mettant en cause l'arrimage des charges transportées, on estime qu'ils s'élèvent à 10 000 par an, dont 25 % à l'origine du heurt d'un tiers par déversement ou échappement des charges.

Les normes en vigueur ou les guides de bonnes pratiques ne sont pas toujours directement applicables pour garantir la sécurité des chargements complexes. Des études plus poussées sont alors nécessaires.

C'est ainsi que l'INRS a réalisé une étude pour assister une compagnie internationale spécialiste des gaz industriels dans sa démarche de validation d'une nouvelle remorque pour le transport des paniers et cadres de bouteilles de gaz. Cette étude est fondée sur une démarche de modélisation.

Un modèle numérique d'arrimage a été établi. La comparaison avec des résultats d'essais réalisés sur piste avec un véhicule, une remorque instrumentée et des chargements types a permis de valider ce modèle. Les simulations ont ensuite confirmé qu'en cas d'accélération intense, la remorque étudiée et le mode d'arrimage sont sûrs.

L'étude a été étendue au transport des cadres sur les remorques conventionnelles. En cas de freinage intense, les efforts calculés dans les sangles sont élevés et les mouvements des chargements importants.

Une étude paramétrique a alors permis de dégager des principes généraux de sécurité portant sur le transport des paniers et des cadres.

Le résultat le plus important concerne le rôle de l'inclinaison des moyens d'arrimage et du coefficient de frottement entre les cadres et le plancher de la remorque. Par rapport à la méthode usuelle de sangle transversal des cadres, les simulations montrent qu'une inclinaison longitudinale de 27° et un coefficient de frottement de 0,75, comparable à celui obtenu avec un tapis anti-dérapant, réduisent de manière significative les efforts engendrés. Par conséquent, la sécurité du transport est accrue et le nombre de sangles utilisées est moindre, d'où une diminution des risques liés à la manutention.

**B**ien qu'il n'existe pas de données statistiques sur les accidents mettant en cause l'arrimage des charges transportées, on estime qu'ils s'élèvent à 10 000 par an [1], dont 25 % à l'origine du heurt d'un tiers par déversement ou échappement des charges.

L'INRS contribue à l'amélioration de la sécurité des méthodes d'arrimage en portant assistance aux entreprises, lorsque les problématiques qui lui sont

soumises dépassent le cadre des bonnes pratiques répertoriées dans les normes et autres guides disponibles dans la littérature spécialisée et si des enseignements peuvent être tirés de ces contributions pour les professionnels du transport.

C'est dans ce cadre qu'une compagnie internationale effectuant des livraisons de paniers ou cadres de bouteilles de gaz sur l'ensemble du territoire français, s'est adressée à l'INRS. Elle sou-

- Arrimage
- Modélisation
- Gaz sous pression
- Transport

► *Pierre LEMERLE, INRS, département Ingénierie des équipements de travail*

## VALIDATION OF SECUREMENT SYSTEMS FOR TRANSPORTING GAS BOTTLE CAGES AND FRAMES

There are no statistical data on accidents involving securement of transported loads, but it has been estimated that there are approximately 10,000 such accidents per year, 25% of which cause third party injury through spilling or release of transported products.

Current standards or guides to best practices are not always directly applicable to guaranteeing the safety of complex loads. More detailed studies are therefore necessary.

INRS has thus conducted a study to assist a specialist international company producing industrial gases in its approach to validating a new trailer for transporting gas bottle cages and frames. Study methodology was based on a modelling approach.

A digital model of the securement system was developed. This model could be validated based on comparison with the results of test-track trials using a vehicle, an instrumented trailer and typical loads. Simulations then confirmed that the studied trailer and securement system are effectively safe in the event of rapid acceleration.

The study has been extended to transportation of bottle frames on conventional trailers. When braking hard, the calculated strap forces are large and load movements are extensive.

A parametric study subsequently revealed general safety principles applicable to transporting bottle cages and frames.

The most significant finding involved the part played by the securement system inclination and the friction coefficient between the bottle frames and the trailer floor. In relation to the usual method of cross-strapping bottle frames, our simulations show that a 27° longitudinal inclination and a 0.75 friction coefficient, comparable to that obtained with an anti-slip mat, reduce significantly the induced forces. This ensures in greater transport safety and fewer straps, leading to a reduction in handling-related risks.

- Securement
- Modelling
- Pressurized gas
- Transport

haite améliorer l'aménagement de ses véhicules pour augmenter la sécurité des arrimages et réduire les contraintes ergonomiques résultant des manipulations lourdes et répétées des sangles et des charges. En outre, son engagement dans un processus de conception de véhicules transportant des paniers ou cadres de bouteilles de gaz vise à répondre aux exigences de la norme NF EN 12195-1 [2] sur les dispositifs d'arrimage des charges à bord des véhicules routiers.

Un prototype de remorque a été réalisé. Il reste à valider dans ses principes. En particulier, les modes de transport doivent être conformes aux normes en vigueur spécifiant le nombre et les caractéristiques mécaniques des moyens de sécurisation des charges pour chaque type d'amarrage.

L'étude présentée dans cet article, porte sur la validation du nouveau modèle de remorque et de la procédure d'arrimage associée.

Afin de prendre en compte la multiplicité des configurations de chargement, l'INRS propose d'établir un modèle de calcul prenant en compte la remorque et son mouvement, les charges et les sangles. Ce modèle numérique, validé par comparaison avec des résultats d'essais réels effectués sur piste, est ensuite utilisé pour conduire une étude paramétrique.

L'objectif est alors d'évaluer la sécurité du transport de chargements types en caractérisant le rôle de chacun des paramètres, tels le nombre de sangles utilisées, leur tension ou leur orientation. Les résultats de cette étude sont directement applicables pour l'élaboration de procédures d'arrimage à l'usage des transporteurs.

## CADRE DE L'ÉTUDE

Le nouveau modèle de remorque repose sur le principe consistant à subdiviser la charge totale en deux sous-ensembles distincts, à l'aide d'une paroi intermédiaire (cf. Figure 1). Les efforts transmis sur les parois frontales, en cas de freinage par exemple, sont alors deux fois moindres, par rapport à l'utilisation d'une remorque conventionnelle.

FIGURE 1

### Vue d'ensemble du prototype de remorque



Le second aspect innovant du prototype réside dans l'utilisation de câbles d'acier pour maintenir le chargement en cas de glissement ou de renversement latéral, sous l'effet de l'accélération centrifuge, notamment en cas de virages.

Enfin, l'immobilisation des charges en cas d'accélération, donc de forces d'inertie dirigées vers l'arrière du véhicule, est assurée par arrimage sur le plateau de la remorque à l'aide de sangles à cliquet.

Les charges transportées sont de formes et de dimensions diverses.

Un chargement peut être constitué d'un ensemble de paniers de différents types, dont la répartition sur le plateau influe sur l'équilibrage de la remorque et sur la transmission des efforts dans les moyens d'arrimage et les charges en contact.

Dans la pratique, par souci de simplification des procédures d'arrimage, on répertorie les différents types de charges en trois catégories, en fonction de leur élanement. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi d'étudier des chargements composés de diverses combinaisons formées à partir de deux charges de catégories différentes, soit un cadre métallique comprenant 9 bouteilles (noté cadre V9 par la suite) et un cadre comprenant 18 bouteilles (noté V18).

Les risques de renversement ou de glissement latéral des cadres, tout comme les risques de déformation ou de rupture des parois frontale et intermédiaire de la remorque sortent du cadre de cette étude. Ces derniers peuvent

survenir en cas de freinage, lors de mouvements des cadres vers l'avant du véhicule. Les deux types de risques ont été étudiés en préalable par le partenaire industriel, indépendamment de ces présents travaux.

Le cadre de l'étude se limite à la sécurisation des charges par rapport au **risque de glissement ou de basculement vers l'arrière**, risque lié à l'accélération du véhicule et pris en compte par des moyens d'arrimage adaptés.

## MÉTHODE

L'étude présentée ici repose sur une approche de modélisation. D'une manière générale, la simulation numérique permet d'analyser l'influence de nombreux paramètres, indépendamment les uns des autres, sans les contraintes temporelles ni les coûts engendrés par une approche purement expérimentale. Cette démarche comprend plusieurs étapes. La première étape consiste à élaborer le modèle de calcul à partir d'hypothèses simplificatrices. L'étape de validation consiste ensuite à vérifier la fiabilité du modèle en comparant des résultats de simulations à des résultats d'essais. Le modèle validé peut enfin être utilisé pour entreprendre des études paramétriques visant à prédire l'influence des paramètres sur une performance attendue, ici l'immobilisation des charges sur la remorque.

TABLEAU I

Valeurs des coefficients de Coulomb mesurés par Rakheja *et al.* [3]

Type de contact	Coefficient de Coulomb	
	Coefficient statique	Coefficient dynamique
Métal/Métal	0,4	0,37
Métal/Bois	0,57	0,52

## CARACTÉRISATION DES PARAMÈTRES PHYSIQUES INFLUENTS

### DISTRIBUTION DE MASSE DES CHARGES

Les bouteilles de gaz sont supposées être fixées rigidement dans des cadres indéformables, le tout constituant ainsi un corps rigide et indéformable. Ces hypothèses sont réalistes, compte tenu des efforts et des accélérations mis en jeu dans les situations de circulation considérées par la suite.

La position du centre de gravité du cadre vide a été déterminée par une méthode de pendulation. Ses inerties ont été obtenues à l'aide d'un modèle de conception assistée par ordinateur (CAO) après recalage de la position du centre de gravité. Les propriétés massiques des bouteilles ont également été déduites de modèles CAO.

### Propriétés physiques d'un cadre Vg rempli de bouteilles de 50 litres

Hauteur : 1 940 mm  
 Largeur : 1 170 mm  
 Profondeur : 560 mm  
 Masse : 790 kg  
 Hauteur du centre de gravité : 710 mm  
 Inerties principales : 359 kg.m<sup>2</sup>, 292 kg.m<sup>2</sup>, 107 kg.m<sup>2</sup>  
 Hauteur du centre de gravité : 71 cm

Les propriétés physiques d'un cadre V18 ont été mesurées de la même manière.

### COEFFICIENTS DE FROTTEMENT

Les forces de frottement agissant au niveau des zones de contact entre les cadres et le plateau du véhicule d'une part (métal/bois) et entre les cadres eux-mêmes d'autre part (métal/métal) sont supposées suivre le modèle de Coulomb.

Le frottement de Coulomb est caractérisé par un coefficient statique qui intervient lorsque le mouvement relatif entre les corps en contact est nul et par un coefficient dynamique dans les autres cas.

Les valeurs des coefficients de Coulomb n'ont pas été mesurées mais sont directement issues de la littérature scientifique [3]. Les valeurs publiées ont été mesurées avec des échantillons de matériaux utilisés dans l'industrie pour la fabrication des planchers de véhicules porteurs.

De manière générale, les coefficients de frottement jouent un rôle très important dans le comportement dynamique global des chargements. Dans la pratique, ils peuvent fluctuer, pour un couple de matériaux donné, en fonction des états de surface locaux des corps en contact. En réalité, les vibrations verticales du véhicule porteur, résultant de l'état du revêtement routier, influent sur la nature et l'intensité des forces de frottement (des mesures de vibrations sur remorques ont été réalisées et publiées par l'INRS dans le cadre d'études antérieures [4]). Cet effet peut être pris en compte et intégré dans la valeur du coefficient de Coulomb. C'est l'approche choisie par Rakheja *et al.* [3] qui ont réalisé les mesures de coefficients de frottement sous environnement vibratoire simulé à l'aide d'un exciteur dynamique vertical. L'étape de validation du modèle permet également de recalibrer ces paramètres a posteriori, c'est-à-dire de les ajuster pour obtenir les corrélations optimales entre les résultats de calculs (force et mouvements des chargements) et les mesures.

Les valeurs des coefficients de Coulomb issues de la publication scientifique citée en référence [3] sont récapitulées dans le *Tableau I*.

## CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SANGLES D'ARRIMAGE

Des essais de traction ont été réalisés en laboratoire avec des sangles du commerce, afin de déterminer la loi d'évolution de la force de tension en fonction de l'élongation.

Les mesures ont été réalisées avec deux sangles du même modèle, dans des conditions quasi-statiques, en accroissant la force d'élongation par palier jusqu'à une valeur de 2 000 daN.

L'étiquette CE apposée sur les sangles indique les caractéristiques de résistance, conformément à la norme de sécurité EN 12195-2 [5] :

- LC (capacité d'amarrage) : 5 000 daN
- SHF (force manuelle normalisée) : 50 daN
- STF (force de tension normale) : 900 daN
- Allongement < 7 %

Dans l'intervalle de force testé, les sangles ont un comportement linéaire et une raideur linéique<sup>1</sup> identique égale à 90 000 daN environ. En extrapolant la valeur de l'allongement pour une tension de 5 000 daN, on obtiendrait une valeur de 5,5 % ce qui est conforme à l'indication d'un allongement maximal inférieur à 7 %.

## ÉLABORATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

Le modèle numérique complet est constitué :

- des charges (= corps rigides indéformables ayant des propriétés massiques équivalentes aux cadres V9 ou V18 remplis de bouteilles de gaz),
- du plateau de la remorque (corps rigide indéformable),
- des sangles (= éléments unidimensionnels déformables à raideur linéique constante en tension et nulle en compression).

Le plateau de la remorque est modélisé sans masse. Son mouvement est imposé, rectiligne unidirectionnel et à

<sup>1</sup> Raideur par unité de longueur

accélération constante. L'intensité de l'accélération est un paramètre d'entrée du modèle et doit être choisi comme représentatif des conditions de circulation du véhicule.

Tous les calculs ont été effectués à l'aide du solveur physique multibody temps réel Newton Game Dynamics™ (NGD), disponible sous forme de librairie dynamique (dll) et intégré dans un code de calcul développé pour les besoins de l'étude. Les corps rigides indépendants sont traités comme des contours parallélépipédiques aux propriétés massiques. Les collisions sont gérées par NGD de manière autonome en détectant les interpénétrations géométriques corps à corps de ces contours et en restituant les forces de liaison résultant des contacts. Les charges sont visualisées à chaque instant de la simulation sous forme de représentations 3D grâce à la bibliothèque de composants graphiques GLScene (bibliothèque OpenGL pour Delphi).

Pour ce qui concerne les forces de frottement, NGD intègre un modèle de Coulomb exact avec prise en compte des phases de glissement à l'aide d'un coefficient de Coulomb statique et d'un coefficient de Coulomb dynamique.

Les sangles sont modélisées en appliquant des forces sur les charges aux points de passage. La direction et l'intensité des efforts sont calculées à chaque pas de temps<sup>2</sup>. Les efforts appliqués sont orientés selon la direction de chaque portion de la sangle (cf. Figure 2). Ils ont tous la même intensité : on suppose que les efforts sont intégralement transmis tout au long de la sangle. Cela revient à négliger la friction aux points de passage. L'intensité est calculée en fonction de l'élongation totale de la sangle en appliquant la formule :

$$\begin{cases} \text{si } L > L_0, F = k \frac{L}{L_0} \\ \text{si } L \leq L_0, F = 0 \end{cases}$$

Avec L longueur de la sangle,  $L_0$  longueur à vide de la sangle et k raideur linéique ( $k = 90\ 000$  daN).

Dans l'exemple de la Figure 2, deux cadres V9 sont arrimés à l'aide d'une seule et même sangle. La prétension de la sangle a pour effet d'augmenter les efforts de contact entre les deux cadres.

FIGURE 2

Modélisation des sangles : forces de même intensité appliquées aux points de passage sur les charges (dans le cas illustré, le chargement est composé de deux cadres V9)



Un coefficient d'amortissement visqueux linéique est également introduit et une valeur arbitraire a été choisie :

$$\begin{cases} \text{si } L > L_0, F = -C \frac{dL}{dt} \\ \text{si } L \leq L_0, F = 0 \end{cases}$$

avec  $C = 10\ 000$  N/s.

Les contours de collisions des deux charges sont matérialisés par les lignes blanches.

Le chargement complet est initialement mis en position sur un plan horizontal infiniment rigide simulant le plateau de la remorque. Puis les prétensions sont appliquées dans les sangles en diminuant progressivement la longueur  $L_0$ .

Lorsque les valeurs de prétensions nominales sont atteintes, le calcul dynamique peut alors débuter : le plan est guidé horizontalement (un seul degré de liberté) et mis en mouvement en appliquant une accélération horizontale constante égale à 0,5 g, valeur indiquée dans la norme EN 12195-1.

## VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

Trois configurations de chargement ont été choisies pour valider le modèle

de calcul. Ces cas de chargement ont été modélisés afin de calculer les efforts subis par les sangles d'arrimage et les mouvements relatifs des charges sur le plateau de la remorque. Par la suite, des essais ont été réalisés sur piste pour reproduire ces mêmes cas de chargement et pour comparer les résultats des mesures d'efforts aux simulations numériques.

Les trois cas de chargement ont été choisis pour mettre en évidence plusieurs modes de mouvement des charges : glissement, basculement ou absence de mouvement relatif.

La configuration n°1 comprend deux cadres V9 disposés sur une même rangée perpendiculaire au sens du mouvement et sangles. Une deuxième rangée constituée de deux cadres V9 est disposée contre la première rangée et non arrimée (cf. Figure 3.1).

Une rangée supplémentaire constituée de deux cadres V9 non arrimés est ajoutée à la configuration de chargement précédente pour constituer la configuration de chargement n° 2 (cf. Figure 3.2).

La configuration n°3 est obtenue en ajoutant une rangée de deux cadres V18 non arrimés à la configuration n°1 (cf. Figure 3.3).

<sup>2</sup> Pas de temps constant =  $10^{-3}$  s

FIGURE 3

## Configurations de chargement retenues pour valider le modèle numérique

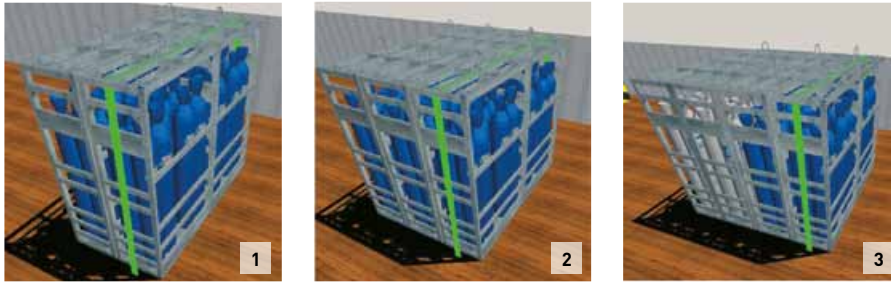


FIGURE 4

## Instrumentation de la remorque

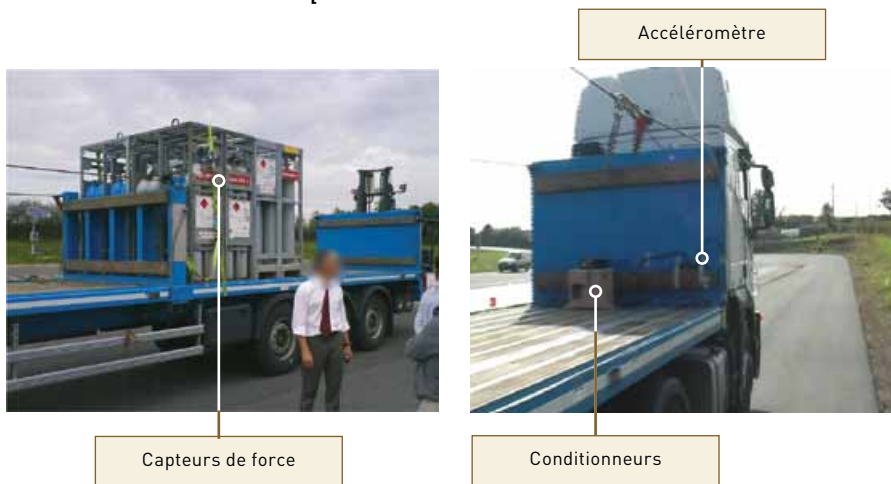


FIGURE 5

## Capture vidéo de la phase stationnaire d'un essai de freinage correspondant à la configuration de chargement n°1



Les extrémités de la sangle sont fixées sur les bords de la remorque.

La prétension exercée sur la sangle a été choisie égale à 500 daN. Des études antérieures ont montré que ce niveau d'effort était acceptable pour les opérateurs. Pour des niveaux supérieurs (niveau testé 750 daN), on considère que les efforts sont difficiles, voire impossibles à réaliser.

Les trois configurations ont été soumises à une accélération constante. Les calculs ont été effectués avec plusieurs valeurs de l'intensité de l'accélération autour de 0,5 g.

Les expériences de validation ont été conduites sur un site fermé dédié. Les trois configurations de validation ont été reproduites en grandeur nature. Comme le montre la Figure 4, la

remorque et les moyens d'arrimage ont été instrumentés pour mesurer la valeur de la décélération, c'est-à-dire l'intensité du freinage et l'évolution de l'effort dans la sangle. Deux capteurs de force ont été utilisés sur un même arrimage, de part et d'autre de la charge.

**Remarque :** il n'a pas été possible d'atteindre la valeur de 0,5 g avec le véhicule lancé à pleine puissance. Pour respecter cette valeur d'accélération prescrite dans la norme EN 12195-1, il a alors été nécessaire d'inverser le chargement et de conduire les essais en freinage. Une phase préalable d'apprentissage a été indispensable pour permettre au conducteur de maintenir la décélération souhaitée constante.

Comme l'illustre la Figure 5, le chargement a conservé toute son intégrité dans la configuration n°1. Aucun mouvement relatif ni basculement des charges n'a été constaté. De même, les simulations numériques ont confirmé l'efficacité des moyens d'arrimage dans cette configuration.

En revanche, l'ajout d'une rangée supplémentaire de cadres, correspondant au cas de chargement n°2, a eu un effet significatif sur la stabilité des cadres. Le basculement des cadres, d'environ 8° vers l'avant, a été observé pour les trois essais réalisés consécutivement dans des conditions de freinage identiques (cf. Figure 6). Simultanément, les sangles ont subi un effort d'environ 1 100 daN s'ajoutant à la prétension de 500 daN.

Les simulations numériques ont abouti à des résultats comparables, à savoir le basculement des cadres vers l'avant d'un angle de 8,6° et une surtension d'environ 1140 daN. La Figure 6 représente également la position des cadres calculée avec le modèle, pour la même valeur de décélération soit 0,55 g.

Dans les mêmes conditions de décélération, aucun mouvement significatif n'a été détecté lors des essais de freinage de la configuration de chargement n°3 (cf. Figure 7), alors que la troisième rangée de cadres V18 était deux fois plus lourde qu'une rangée de cadres V9. C'est l'épaisseur des cadres V18 qui a agi en empêchant leur basculement et, par conséquent, la transmission des efforts vers la rangée précédente.

Lors d'un essai suivant, l'augmentation de l'intensité du freinage a provoqué un glissement d'ensemble du même chargement. La *Figure 7* montre la position finale du chargement à la fin de l'essai. L'inclinaison de la sangle témoigne du glissement des cadres vers l'avant. Le mouvement d'ensemble a été arrêté par la paroi intermédiaire de la remorque.

Les simulations conduisent aux mêmes résultats, à savoir l'absence de mouvement des cadres pour une décélération de 0,5 g et le glissement vers l'avant pour une décélération de 0,7 g. La *Figure 8* décompose le mouvement des charges pour ce second cas de figure : pendant les sept premiers dixièmes de secondes, les deux premières rangées V9 de cadre basculent vers l'avant, libérant ainsi la troisième rangée de cadres V18 qui peut alors prendre de l'élan et entraîner l'ensemble du chargement vers l'avant.

La *Figure 9* représente l'évolution temporelle de l'effort dans la sangle au cours de l'essai réalisé avec le chargement n°3 et une décélération de 0,7 g. On remarque que l'effort maximal est atteint après 1 s environ. Il se produit à l'instant où l'inclinaison de la première rangée est maximale, juste avant le glissement d'ensemble.

Les cas de validation sont synthétisés dans le *Tableau II*. A chaque configuration de chargement et valeur d'accélération de la remorque correspondent les valeurs calculées et mesurées de surtension des sangles et d'inclinaison des cadres.

Les comparaisons entre résultats de simulations et d'essais ont été jugées assez satisfaisantes pour considérer le modèle d'arrimage comme validé et entreprendre des analyses paramétriques de chargements plus complexes.

## ETUDE PARAMÉTRIQUE

Plusieurs cas de chargements ont été choisis parmi les plus courants. Les chargements ont été modélisés et soumis à un calcul d'accélération à 0,5 g.

Dans un premier temps, l'objectif est de vérifier si le mode d'arrimage

FIGURE 6

A gauche, capture vidéo de la phase stationnaire d'un essai correspondant à la configuration de chargement n°2. A droite, simulation numérique du même essai

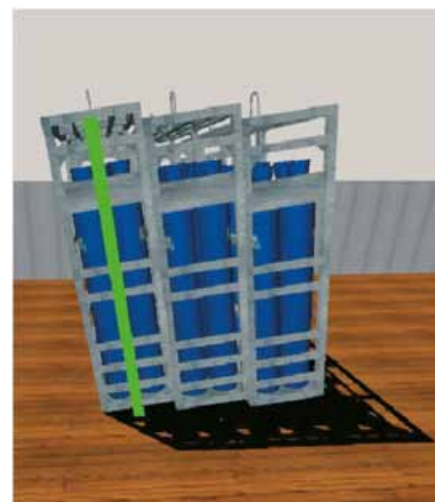


FIGURE 7

Capture vidéo de la phase stationnaire d'un essai correspondant à la configuration de chargement n°3 (à gauche, essai à 0,5 g. A droite, essai à 0,7 g)



proposé pour le nouveau modèle de remorque est efficace en cas d'accélération du véhicule, c'est-à-dire si le chargement est correctement maintenu sur le plateau et si les efforts subis par les sangles restent admissibles.

Des simulations complémentaires ont été effectuées pour étudier l'effet des paramètres d'arrimage sur la sécurité des chargements, comme la périodicité, la rigidité, la prétension et l'inclinaison du sanglage. Ces simulations ont été effectuées dans des conditions de freinage d'urgence, soit une décélération de 0,8 g, en supposant que le maintien des charges est assuré par les sangles uniquement et non par une cloison

intermédiaire. Cette analyse vise à dégager des principes généraux applicables pour l'arrimage des remorques conventionnelles.

## SÉCURISATION DU CHARGEMENT COMPLET EN ACCÉLÉRATION

Les sangles utilisées dans la pratique par les transporteurs diffèrent de celles qui ont servi à valider le modèle d'arrimage. Elles ont une capacité

FIGURE 8

Configuration de chargement n°3. Calcul réalisé avec une décélération de 0,7 g (à gauche, à l'instant 0,7 s. A droite, à l'instant 1 s)

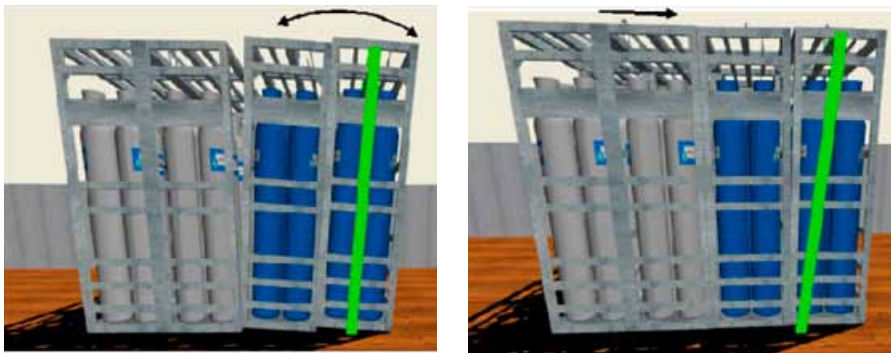


FIGURE 9

Evolution de l'effort dans la sangle au cours de l'essai. Comparaison calcul-mesure

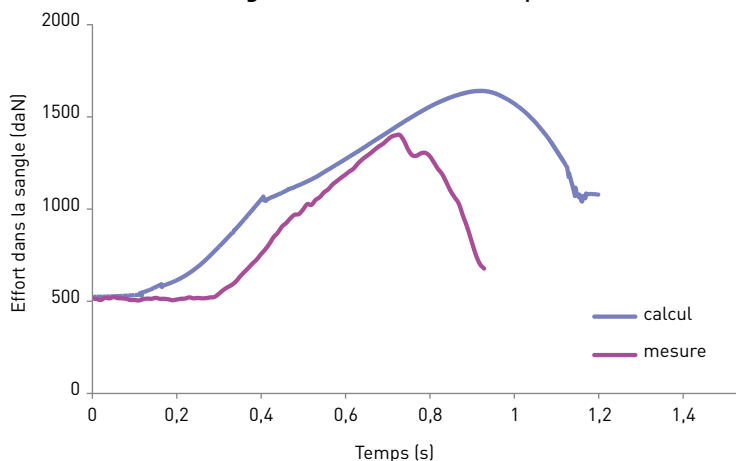


TABLEAU II

Comparaison des grandeurs physiques mesurées et calculées pour chaque cas de chargement

Type de contact	Accélération (g)		Surtension (N)		Inclinaison (°)	
	Calcul	Essai	Calcul	Essai	Calcul	Essai
Cas de chargement n°1	0,5	0,5	425	540	< 2	< 2
	0,55	0,56	2710	2970	< 2	< 2
Cas de chargement n°2	0,55	0,55	11400	9700 - 11400	8,6	8
Cas de chargement n°3	0,5	0,48	-0	1140	< 2	< 2
	0,55	0,52	1820	2740	< 2	< 2
	0,7	0,67	11200	8500	glissement	glissement

d'amarrage de 5 000 daN et un allongement maximal de 4 %. Dans l'étude paramétrique, la raideur linéique des sangles introduite dans le modèle a été calculée comme le rapport de la capacité d'amarrage par l'allongement maximal soit 125 000 daN.

Les calculs montrent que les quatre chargements étudiés restent intacts lorsqu'ils sont soumis à une accélération de 0,5 g (cf. Figure 10).

Dans tous les cas, les efforts maximum calculés dans les sangles sont inférieurs à 1 000 daN, valeur nettement inférieure à la capacité d'amarrage (5 000 daN) ce qui autorise une marge de sécurité.

Les allongements calculés sont également acceptables (maximum 0,9 %), donc les inclinaisons des cadres sont assez faibles (maximum 2,1°).

On observe que, pour un chargement donné, l'ordre d'agencement des rangées a un effet sur les forces subies par les sangles. Il s'avère préférable de réserver l'usage des sangles aux cadres les plus élancés (c'est-à-dire les moins stables), comme l'illustrent les simulations des configurations n°3 et 4.

## SÉCURISATION DES CHARGEMENTS EN FREINAGE PAR SANGLAGE. ANALYSE PARAMÉTRIQUE

### PÉRIODICITÉ DU SANGLAGE

Des simulations ont été effectuées afin d'étudier l'effet de la périodicité du sanglage sur la tenue du chargement dans le cas de décélération extrêmes, la périodicité étant caractérisée par le rapport du nombre de rangées de cadres sanglées sur le nombre total de rangées.

Les calculs montrent que, pour une accélération de 0,8 g, le fait de sangler une rangée de cadres sur deux ne réduit les efforts de tension que de 20 %, par rapport à un chargement composé d'une rangée de cadres sanglée sur trois (cf. Tableau IV). Seul le sanglage systématique de toutes les rangées de cadres agit notablement sur la réduction des efforts de tension (40 % de gain). Dans ce cas, le chargement est complètement sécurisé, dans la mesure où les efforts mis en jeu sont nettement inférieurs à la capacité d'amarrage des sangles (1 200 daN à comparer à LC = 5 000 daN) et où l'inclinaison des cadres est faible (3,7°).

L'augmentation de la périodicité du sanglage n'a donc un effet bénéfique notable que dans son expression la plus radicale, c'est-à-dire le sanglage systématique de toutes les rangées de cadres.

### RIGIDITÉ DU SANGLAGE

Une autre alternative à l'augmentation de la périodicité du sanglage est l'augmentation de la rigidité des sangles. Un moyen simple de doubler la rigidité consiste à doubler le nombre de sangles.

Deux séries de calculs ont été réalisées avec deux chargements composés,

pour le premier d'une rangée de cadres V9 sanglée et deux rangées libres et, pour le second, d'une rangée de cadres V9 sanglée et trois rangées libres (cf. *Tableau V*).

Chaque chargement a été soumis à une décélération de 0,8 g. Une première série de calculs a été effectuée avec une sangle simple, puis une seconde avec une sangle double. En pratique, dans la deuxième série de calculs, la raideur et l'amortissement linéiques de la sangle ont été multipliés par deux.

Dans la réalité, la deuxième configuration de calcul serait obtenue en arrimant la première rangée de cadres avec deux sangles identiques tendues avec une force initiale de 500 daN.

Les calculs montrent que l'effort dans chaque sangle est égal à la moitié de l'effort subi par la sangle unique. Par conséquent, il est réduit à un niveau acceptable par rapport à la capacité d'amarrage (1 155 daN pour trois rangées et 1750 daN pour quatre rangées, à comparer à LC = 5 000 daN).

De plus, dans le cas d'une sangle double, la rigidité globale de l'arrimage étant accrue, on remarque que les rangées de cadre s'inclinent d'autant moins (0,3° au lieu de 6,7° dans la configuration à trois rangées, 0,2° au lieu de 4,5° dans la configuration à quatre rangées).

Pour une configuration de chargement donnée, par exemple quatre rangées de cadres V9 et un nombre donné de sangles, par exemple deux sangles, on remarque que la **solution la plus efficace consiste à sangler la première rangée de cadres avec les deux sangles, plutôt que d'alterner une rangée sanglée et une rangée libre**. Les efforts de tension max sont respectivement de 1 750 daN et 2 500 daN, soit un gain de 30%.

3 Dans la configuration où toutes les rangées de cadres sont sanglées, les sollicitations sont identiques pour chaque sangle et indépendantes du nombre de rangées de cadres composant le chargement.

4 Dans toute la suite du rapport, l'effort maximum représente le pic d'effort subi par la sangle au moment de sa tension, sous l'effet de l'application d'une décélération constante égale à 0,8 g. Dans certains cas, cette valeur peut différer très sensiblement de la force stationnaire obtenue après un certain délai dans l'application de la décélération.

FIGURE 10

Résultats de calculs d'accélération à 0,5 g pour plusieurs configurations de chargement complet

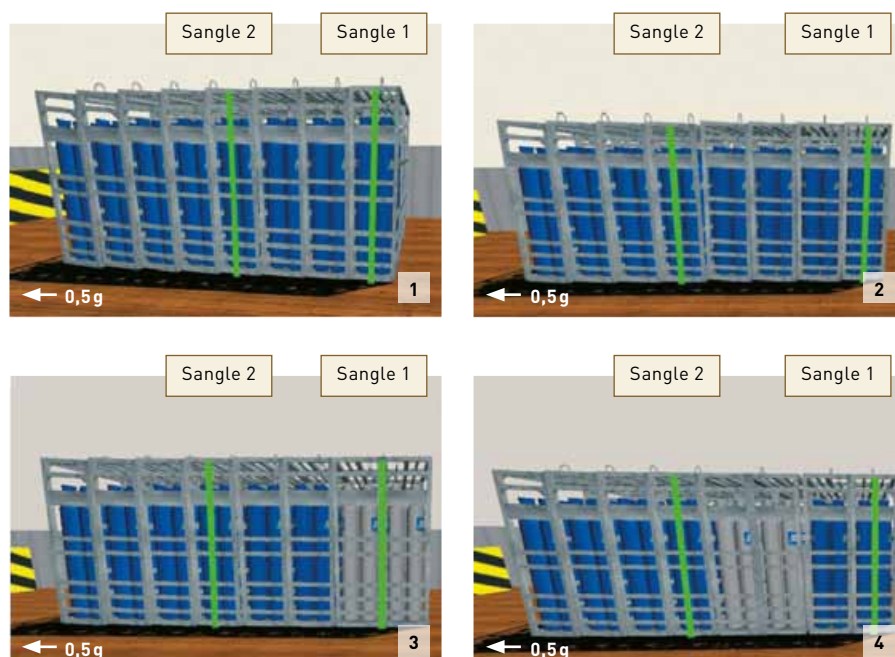


TABLEAU III

Réponse mécanique des sangles pour les calculs de chargements complets avec une décélération de 0,5 g

Config.	Sangle 1				Sangle 2			
	Pré-tension (daN)	Effort max (daN)	Allongement (%)	Inclinaison (°)	Pré-tension (daN)	Effort max (daN)	Allongement (%)	Inclinaison (°)
1	500	782	0,63	1,5	500	1096	0,88	3,1
2	500	851	0,68	1,8	500	890	0,71	2,1
3	500	518	0,41	0	500	838	0,67	1,7
4	500	509	0,41	0,1	500	688	0,55	1,1

TABLEAU IV

Effet de la périodicité du sanglage sur la réponse mécanique des sangles lors d'une décélération à 0,8 g

		Rangée n°1 sanglée Rangée n°2 libre Rangée n°3 libre Rangée n°4 sanglée Rangée n°5 libre Rangée n°6 libre	Rangée n°1 sanglée Rangée n°2 libre Rangée n°3 sanglée Rangée n°4 libre	Toutes les rangées sanglées <sup>3</sup>
<b>Sangle 1</b>	Prétension (daN)	500	500	500
	Effort max (daN) <sup>4</sup>	2 878	2 511	1 200
	Allongement (%)	2,3	2,02	0,96
	Inclinaison (°)	9,5	10	3,7
<b>Sangle 2</b>	Prétension (daN)	500	500	500
	Effort max (daN)	2 959	2 437	1 200
	Allongement (%)	2,37	1,96	0,98
	Technical report	10	9,5	3,7



TABLEAU V

Effet de la rigidité du sanglage sur la réponse mécanique des sangles lors d'une décélération à 0,8 g

		Sangle double	Sangle simple
Cadres Vg : 1 <sup>ère</sup> rangée sanglée 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> rangées libres	Prétension (daN)	500	500
	Effort max (daN) <sup>4</sup>	1155	3598
	Allongement (%)	0,95	1,45
	Inclinaison (°)	0,3	6,7
cadres Vg : 1 <sup>ère</sup> rangée sanglée 2 <sup>ème</sup> , 3 <sup>ème</sup> et 4 <sup>ème</sup> rangées libres	Prétension (daN)	500	500
	Effort max (daN)	1750	3055
	Allongement (%)	1,40	2,47
	Inclinaison (°)	0,2	4,5

TABLEAU VI

Effet de la force de prétension sur la réponse mécanique des sangles lors d'une décélération à 0,8 g

		500	750
Cadres Vg : 1 <sup>ère</sup> rangée sanglée 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> rangées libres	Prétension (daN)	500	750
	Effort max (daN) <sup>4</sup>	3 598	3 356
	Allongement (%)	1,45	2,69
	Inclinaison (°)	6,7	0,2
cadres Vg : 1 <sup>ère</sup> rangée sanglée 2 <sup>ème</sup> , 3 <sup>ème</sup> et 4 <sup>ème</sup> rangées libres	Prétension (daN)	500	750
	Effort max (daN)	3 232	2 712
	Allongement (%)	2,59	2,18
	Inclinaison (°)	10,3	5,9

## FORCE DE PRÉTENSION DES SANGLES

L'effet de la force de prétension des sangles sur la sécurité du chargement a également été évalué par calcul (cf. *Tableau VI*).

Les cas de chargements précédents composés respectivement de trois rangées de cadres et de quatre rangées de cadres, dont la première rangée est sanglée, ont été soumis à un calcul de décélération à 0,8 g.

L'effort de prétension initial de 500 daN a été augmenté de 250 daN dans une seconde série de calculs, soit 750 daN de prétension.

Aucun effet significatif, dû à la valeur de la prétension, n'a été constaté sur la force de tension maximale subie par la sangle. Dans tous les cas, elle reste de l'ordre de 3 000 daN.

**L'augmentation de la prétension a pour effet de limiter l'angle d'inclinaison des cadres, mais le mouvement des cadres n'est pas pour autant contraint. Il s'opère par glissement vers l'avant de la remorque.**

## INCLINAISON DES SANGLES

L'angle d'inclinaison des sangles par rapport au chargement est un paramètre d'arrimage important. Il agit directement sur les moments mis en jeu en augmentant les bras de levier des efforts de tension dans les sangles et, par conséquent, diminue l'intensité de ces efforts.

Pour illustrer ce principe, deux cas de chargements ont été étudiés : le cas de chargement composé de huit rangées de cadres v9 dont seule la première ran-

gée est sanglée et un chargement composé de quatre rangées de cadres v9 dont également seule la première rangée est sanglée. Chacun de ces deux chargements a été soumis à une décélération de 0,8 g.

Dans chaque cas, l'effort maximal de tension a été calculé dans la sangle disposée verticalement, puis, le même effort maximal de tension a été calculé pour une inclinaison initiale de 27° de la sangle équivalent au recul des points d'ancrage d'une distance de 1 m sur la remorque.

Les *Figures 11 et 12* illustrent l'état des chargements au cours de la phase stationnaire de la décélération, pour chaque type de sanglage.

Les calculs montrent que l'inclinaison de la sangle tend à diminuer les efforts subis (cf. *Tableau VII*). **Cependant, son action bénéfique pour limiter le basculement est en partie compensée par le glissement du chargement sur le plancher.** La sangle n'agit alors plus pour limiter la rotation des cadres mais pour empêcher le mouvement d'ensemble de translation. Finalement, la réduction des efforts de tension n'est pas aussi importante qu'attendu.

Une solution consisterait alors à réduire le glissement des cadres en augmentant le coefficient de frottement avec le plancher. Dans la pratique, l'utilisation de tapis anti-dérapants permet d'obtenir ce résultat. Dans le même ordre d'idées, une cale disposée devant la première rangée de cadres pourrait jouer ce rôle.

## COEFFICIENT DE FROTTEMENT

Les deux cas de chargement précédents ont été soumis à la même valeur constante de décélération. La valeur du coefficient de frottement caractérisant le contact entre les cadres et le plancher a été augmentée pour simuler la présence d'un tapis anti-dérapant. Une valeur de 0,75, représentative de ce type de contact, a été choisie.

Les calculs effectués avec les deux cas de chargement montrent l'effet bénéfique de l'augmentation du coefficient de frottement (cf. *Tableau VIII*). L'effort dans les sangles a été réduit de moitié environ (2 520 daN au lieu de 4 450 daN pour 8 rangées et 1 400 daN

pic au lieu de 2 280 daN pour 4 rangées de cadres).

## CONCLUSION

Cette étude porte sur la validation d'un nouveau type de remorque conçu par une compagnie internationale spécialiste des gaz industriels pour le transport de paniers et de cadres de bouteilles de gaz. Elle s'attache plus spécifiquement à un aspect de la validation de la méthode d'arrimage, à savoir la sécurisation du chargement en cas d'accélération brusque du véhicule. Les autres aspects liés au dimensionnement des parois frontales et intermédiaires de la remorque et des moyens de retenue latéraux, tels les câbles, ne sont pas concernés par cette étude.

La démarche adoptée repose sur le développement, la validation et l'utilisation d'un modèle de calcul d'arrimage. Un modèle de calcul est indispensable dans la mesure où les règles de calcul édictées dans la norme internationale d'arrimage des charges ISO 12951-1 ne sont pas applicables, les chargements étant trop complexes (difficulté d'estimer les forces de contacts entre charges, élongation des sangles). Le modèle, fondé sur des hypothèses de corps rigides indéformables (pour les charges), prend en compte l'élasticité des sangles d'arrimage et les forces de contact, avec une formulation de type loi de Coulomb.

Des essais sur piste, en grandeur nature, ont permis de valider le modèle d'arrimage, en vérifiant que les efforts des sangles et les mouvements des chargements calculés sont bien réalistes. Le modèle a pu alors être utilisé pour calculer la résistance de chargements complets types soumis à une décélération de 0,5 g, conformément aux prescriptions de la norme ISO 12195-1.

Les calculs ont montré que tous les chargements sont maintenus dans des conditions acceptables, c'est-à-dire avec des déplacements minimes des charges et des efforts de tension (< 1 000 daN) inférieurs aux capacités d'amarrage des sangles (LC = 5 000 daN). Les calculs ont également montré l'intérêt d'ordonner la disposition des charges sur la remorque. Il faut sangler en priorité les charges les plus élancées et non pas les charges les

FIGURE 11

Simulation de décélération à 0,8 g. A gauche, sanglage vertical. À droite, inclinaison initiale de 27°.

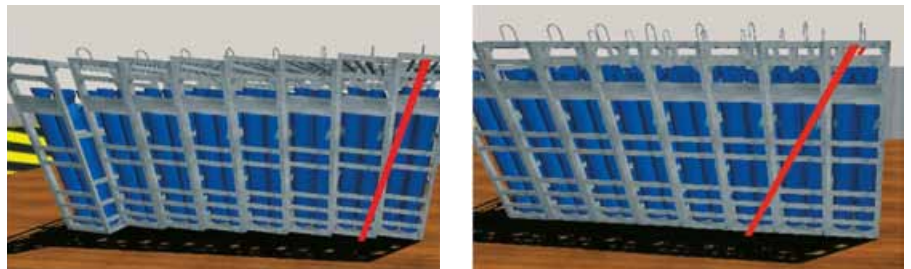


FIGURE 12

Simulation de décélération à 0,8 g. A gauche, sanglage vertical. À droite, sangle inclinée de 27°.

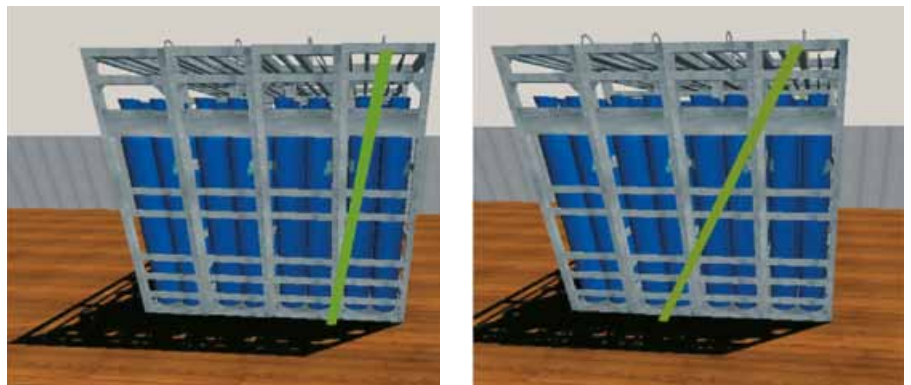


TABLEAU VII

Effet de l'angle d'inclinaison du sanglage sur la tension dynamique des sangles lors d'une décélération à 0,8 g.

		Sangle verticale	Sangle inclinée de 27°
Cadres Vg : 8 rangées	Prétension (daN)	500	0
	Effort max (daN)	Rupture (> 5000)	4 450
	Effort stat (daN)	Rupture (> 5000)	4 450
Cadres Vg : 4 rangées	Prétension (daN)	500	0
	Effort max (daN)	3 250	2 280
	Effort stat (daN)	2 160	2 280

TABLEAU VIII

Effet de l'augmentation du coefficient de frottement (0,75) entre les cadres et la remorque sur la tension dynamique des sangles lors d'une décélération à 0,8 g. L'angle d'inclinaison de la sangle est égal à 27°.

Cadres Vg : 8 rangées	Prétension (daN)	0
	Effort max (daN)	2 520
	Effort stat (daN)	2 520
Cadres Vg : 4 rangées	Prétension (daN)	500
	Effort max (daN)	1 400
	Effort stat (daN)	790

plus lourdes. Le simple fait de disposer les charges dans le bon ordre influe notablement sur les efforts engendrés dans les moyens d'arrimage.

Les investigations ont été poussées plus avant pour étudier la résistance de ces mêmes chargements sur les remorques actuelles, lors de sollicitations extrêmes. Contrairement au nouveau modèle, les remorques conventionnelles, dépourvues de cloisons intermédiaires, ne permettent pas de retenir les charges en cas de freinage intense. C'est donc le cas de freinage avec une accélération de 0,8 g qui constitue la situation la plus risquée. Les calculs ont conduit à des efforts de tension élevés dans les sangles et des mouvements importants des cadres. L'amplitude élevée des mouvements de charges pose problème.

La dernière partie de l'étude présentée ici a permis d'établir des principes généraux applicables à l'arrimage des cadres. Les études paramétriques réali-

sées à l'aide du modèle numérique ont conduit aux recommandations suivantes :

■ augmenter l'alternance des rangées de cadres sanglées et des rangées libres offre peu d'intérêt, sauf à considérer toutes les rangées sanglées. Il est plus efficace de rigidifier un arrimage en utilisant plusieurs sangles en parallèle sur une même rangée de cadres que de répartir ces mêmes sangles sur plusieurs rangées distinctes ;

■ l'intensité de la prétension des sangles influe peu sur la résistance du chargement. Bien entendu, il est important de respecter une force de prétension minimale pour éviter tout relâchement des moyens d'arrimage au cours du transport. Une force de prétension de 500 daN est acceptable ;

■ enfin, le principe le plus important mis en évidence consiste sans aucun doute à augmenter l'inclinaison des sangles et le coefficient de frottement entre les cadres et le plancher. Les simulations ont montré qu'une inclinai-

son de 27° et un coefficient de frottement de 0,75, comparable à celui obtenu avec un tapis anti-dérapant ou avec des cales fixées sur le plancher, suffisent à réduire considérablement les efforts subis par les moyens d'arrimage et, par conséquent, à réduire le nombre total de sangles. Par exemple, en cas de freinage intense, une seule sangle suffit à retenir un chargement composé de huit rangées de cadres avec une tension inférieure à 3000 daN (on suppose les ancrages adaptés sur la remorque et un minimum de précaution dans l'arrimage des cadres pour éviter tout glissement des sangles). Or, la méthode usuelle utilisant un arrimage transversal conduit à des efforts maximum de l'ordre de 3500 daN pour un chargement composé de quatre rangées seulement.

Reçu le : 12/04/2012

Accepté le : 03/07/2012

## BIBLIOGRAPHIE

[1] *Arrimage des charges sur les véhicules routiers*. ED 759, INRS, 2008, ISBN 978-2-7389-1627-3, 84 p.

[2] NF EN 12195-1. - *Dispositifs d'arrimage des charges à bord des véhicules routiers*. - Sécurité. Partie 1 : calcul des tensions d'arrimage. Juillet 2004.

[3] RAKHEJA S., SAUVÉ P. and JURAS D., *Experimental evaluation of friction coefficients of typical loads and trailer decks under vertical vibration*. CONCAVE Research Centre, CONCORDIA University, 1998. CANADIAN COUNCIL OF MOTOR TRANSPORT ADMINISTRATORS. CCMTA LOAD SECURITY RESEARCH PROJECT REPORT. Issue Number: 2. Publisher: Ontario Ministry of Transportation. 132 p.

[4] LEMERLE P., BOULANGER P., MISTROT P., GALMICHE J.P. *Sécurité du transport des produits papetiers*. INRS, Document de travail IET- NP/05DT-026/PLe, mars 2005.

[5] NF EN 12195-2. - *Dispositifs d'arrimage des charges sur véhicules routiers*. - Sécurité. - Partie 2 : Sangles en fibres synthétiques. Mars 2001.