



HAL
open science

Sécurisation des procédures d'arrimage de couronnes de fil d'acier.

P. Lemerle, D. Bruant

► **To cite this version:**

P. Lemerle, D. Bruant. Sécurisation des procédures d'arrimage de couronnes de fil d'acier.. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 304, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 2013, 26 p., ill., bibliogr. hal-01420499

HAL Id: hal-01420499

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420499>

Submitted on 20 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**Sécurisation
des procédures d'arrimage
de couronnes de fil d'acier**

NS 304

NOTE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Sécurisation des procédures d'arrimage de couronnes de fil d'acier

Pierre LEMERLE
Dominique BRUANT

NS 304
septembre 2013

Sécurisation des procédures d'arrimage de couronnes de fil d'acier.

Résumé

Une filiale française d'un groupe métallurgique européen a sollicité l'INRS pour l'aider à améliorer ses procédures d'arrimage de produits sidérurgiques expédiés par la route.

Il s'agit de couronnes de fil d'acier (utilisé pour le ferrailage d'ouvrages en béton), d'une longueur de 1,40 m, d'un diamètre de 1,20 m et pesant environ 1,8 T. Les couronnes sont transportées en roule sur la remorque d'un véhicule Poids Lourd. Un chargement comprend au maximum 13 couronnes dont 2 gerbées.

La procédure en vigueur au sein de l'entreprise impose l'utilisation d'un minimum de 8 sangles disposées transversalement à la remorque et traversant les couronnes. Les couronnes gerbées sont obligatoirement sanglées. Une dizaine de cales en bois sont utilisées pour limiter le roulement des couronnes sur la remorque. La répartition des cales sous le chargement ne répond pas à des consignes clairement établies.

L'étude se décompose en 3 phases :

Une phase initiale a consisté à réaliser des essais en vraie grandeur de freinage extrême de Poids Lourd avec chargements. Le but était d'acquérir des données expérimentales (déplacements, coefficients de frottement, efforts de tension dans les moyens d'arrimage) permettant par la suite de caractériser et valider des simulations d'essais de freinage en laboratoire. Les chargements étudiés ont été réduits à des ensembles de 1 à 3 couronnes. Ces essais ont par ailleurs démontré l'inefficacité des règles de sanglage actuelles qui ne permettent pas d'immobiliser les couronnes en cas de fortes décélérations.

Dans une seconde phase, un banc d'essai de freinage a été conçu et fabriqué pour réaliser des simulations à l'échelle 1/6. Dans son principe, ce banc consiste en une plateforme guidée sur rails et entraînée par gravité à l'aide d'un système de poids et de poulies. Ce banc a permis de tester une méthode d'arrimage originale consistant à regrouper les couronnes par 2 et à les arrimer en opposition à l'aide de deux sangles traversantes et croisées.

Cette méthode d'arrimage a été validée en vraie grandeur, dans une troisième phase, lors d'un essai de freinage extrême de Poids Lourd. Aucune cale n'a été nécessaire pour retenir les couronnes dans toutes les configurations d'essais testées.

Cette étude a conduit à des recommandations pour l'arrimage des couronnes de fil en roule, à savoir l'arrimage croisé systématique des couronnes (arrimage transverse traversant des couronnes gerbées). Le nombre de moyens d'arrimage est minimisé puisque la méthode ne nécessite qu'une sangle par couronne. Cette méthode est sûre et permet de s'affranchir de cales. Une attention particulière doit être portée à la fixation des crochets de sangles sur le bord de rive de la remorque pour éviter tout risque de glissement.

Securing of coils of steel wire for safe transport by road.

Abstract

A French company, member of a European group of the steel industry requested help from INRS to improve its procedures for securing steel products shipped by road.

These products take the form of coils of steel wire (used for reinforcement of concrete structures), with a length of 1.40 m, a diameter of 1.20 m and weighing about 1.8 T. The coils are transported with their axis horizontal and perpendicular to the direction of motion on the trailer. A shipment includes a maximum of 13 coils, with 2 coils stacked.

The procedure in force in the company requires the use of a minimum of 8 securing straps arranged transversely to the trailer through the coils. The stacked coils must be necessarily strapped. A dozen wedges are used to prevent the coils from rolling on the trailer. The way these blocks of wood are positioned is not clearly established.

The study was divided into three phases:

An initial step was to conduct full-scale tests of extreme braking with laden truck. The aim was to acquire experimental data (displacements, coefficients of friction, tension forces in lashings) to subsequently characterize and validate braking test laboratory simulations. Loads studied were limited to 1 to 3 coils. These tests also demonstrated the ineffectiveness of current strapping rules as they do not prevent the coils from rolling under high deceleration.

In a second phase, a brake test rig was designed and manufactured to perform simulations at 1/6 scale in the lab. Basically, this bench is a guided rail platform driven by gravity using a system of weights and pulleys. It was used to test an original method of lashing the coils by pairs with opposed cross straps.

This method of stowage was validated full-size, in a third phase, in an extreme braking test. No wedges were required to retain the coils in all test configurations tested.

This study led to recommendations for securing coils of steel wire, namely the systematic cross docking (transverse lashing through stacked coils). The number of lashings is minimized since the method requires only one strap per coil. This method is safe and does not require wedges. Particular attention should be paid to fixing the strap hooks on the side edge of the trailer to avoid slippage.

Sécurisation des procédures d'arrimage de couronnes de fil d'acier.

Securing of coils of steel wire for safe transport by road.

Sommaire

1.	Introduction	1
2.	Cadre de l'étude.....	2
3.	Méthode	4
3.1	Règles de similitude	4
3.2	Essais de référence en vraie grandeur	5
3.3	Description du banc d'essais d'arrimage	8
4.	Résultats des simulations à échelle réduite.....	11
4.1.	Arrimage d'une couronne selon les consignes édictées par l'entreprise	11
4.2.	Arrimage selon les consignes édictées par l'entreprise de 3 couronnes dont une gerbée	12
4.3.	Arrimage croisé de deux couronnes	14
4.4.	Arrimage croisé de deux couronnes en roule et une couronne gerbée arrimée transversalement.....	16
5.	Validation de la méthode d'arrimage croisé en grandeur réelle	19
6.	Recommandations et conclusion.....	24
7.	Références bibliographiques	26

1. Introduction

En France, le véhicule poids lourd reste le principal outil pour le transport de marchandises. En 2010, l'ensemble des transports intérieurs terrestres de marchandises (tous pavillons sur le territoire français) représentait 331,1 milliards de tonnes-kilomètres transportées dont 291,6 milliards de tonnes-kilomètres via le transport intérieur routier. La même année, le parc de véhicules immatriculés comprenait 211 918 tracteurs routiers, 51 959 remorques et 313 000 semi-remorques [1]. Selon ces mêmes sources et sur la même période, le chiffre d'affaires net des entreprises du transport routier s'établit à 41 206 M€.

Parallèlement, on estime à 10 000 le nombre d'accidents mettant en cause l'arrimage des charges transportées. Parmi ces accidents, 25 % résultent de l'échappement des charges et provoquent le heurt d'un tiers et 12 % sont dus à un déplacement intempestif de la charge, à l'origine d'un renversement du véhicule [2].

La loi d'orientation des transports intérieurs [3] fixe un principe général précisant les responsabilités des différents intervenants dans le transport des marchandises. Pour des chargements excédant 3 tonnes, les opérations de chargement, calage, arrimage d'une part, de déchargement, d'autre part, incombent respectivement au donneur d'ordre et au destinataire ou à leur représentant sous leur responsabilité. Le transporteur fournit au donneur d'ordre toutes indications utiles en vue d'une répartition équilibrée de la marchandise propre à assurer la stabilité du véhicule et le respect de la charge maximale par essieu. Il vérifie que le chargement, le calage ou l'arrimage ne compromettent pas la sécurité de la circulation. Dans le cas contraire, il doit demander qu'ils soient refaits dans des conditions satisfaisantes ou refuser la prise en charge de la marchandise.

La norme européenne EN 12195-1 [4] décrit les méthodes d'assujettissement nécessaires à la sécurisation des marchandises transportées à bord des véhicules routiers. Ces principes généraux sont accompagnés de règles de calculs théoriques visant à prévoir les efforts subis par les moyens d'amarrage dans des sollicitations extrêmes.

Dans la pratique, pour des chargements complexes s'éloignant des formes géométriques élémentaires, ou mettant en jeu des conditions de contact incertaines, ces règles deviennent peu fiables ou au contraire très pénalisantes, si les incertitudes doivent être prises en compte en majorant les coefficients de sécurité. Dans ce cas, l'approche de simulation numérique prend tout son intérêt et nous avons montré dans des études antérieures qu'elle peut aider efficacement à vérifier la sûreté des procédures d'arrimage [5].

Une autre approche consiste à tester en vraie grandeur ou à échelle réduite la fiabilité de solutions techniques. C'est la mise en œuvre de cette approche qui est présentée dans cette étude, réalisée dans le cadre d'une assistance à une entreprise métallurgique.

2. Cadre de l'étude

Une entreprise française membre d'un groupe industriel européen et spécialisée dans la production d'acier pour béton armé entreprend de réviser en profondeur ses procédures d'amarrages de produits sidérurgiques transportés par la route.

Ces produits sont conditionnés sous la forme de couronnes qui, selon le diamètre de fil, peuvent atteindre jusque 10 km de longueur. La coulée continue permet également de produire des billettes (forme parallélépipédique) mesurant 14,8m de longueur avec une section de 130 mm², pour une masse de 2 tonnes.

Les couronnes sont conditionnées sous deux formes différentes, dépendant du type d'enroulement effectué :

- les fils en couronne/roulés de fil machine ont une masse inférieure à 1,9 tonnes,
- les couronnes trancannées sont, elles, enroulées de manière ordonnée, spire par spire et couche par couche. Leur masse varie de 1,5 tonne à 3 tonnes.

Les règles d'amarrage imposées par cette entreprise aux transporteurs assurant les livraisons aux clients sont les suivantes :

- les billettes sont transportées posées sur des bastaings en bois dur de la largeur du plateau. Au minimum 3 sangles maintiennent les billettes ainsi disposées,
- les couronnes trancannées sont posées verticalement sur deux bastaings en bois tendre de la largeur du plateau, pour reprise avec fourche, ou sans bois de calage pour reprise avec pince. Une sangle est utilisée pour maintenir une rangée composée de 2 couronnes au maximum,
- les couronnes de fil machine sont disposées en roule. Un chargement comprend au maximum 13 couronnes, dont deux sont gerbées, toutes les autres couronnes étant posées sur le plateau (cf. figure 1). Au minimum, 8 sangles doivent être utilisées et le sanglage des couronnes gerbées est obligatoire. Il s'effectue en passant la sangle à l'intérieur de la couronne, le long de la génératrice inférieure (celle en contact avec le plateau dans le cas des couronnes inférieures). Un certain nombre de cales en bois tendre de section carrée 8 cm x 8 cm sont réparties le long du plateau pour limiter le roulement des couronnes. Le nombre de cales par couronne varie de 0 à 2. La dernière couronne doit être systématiquement sanglée avec un angle d'inclinaison élevé, comme l'illustre la figure 1.

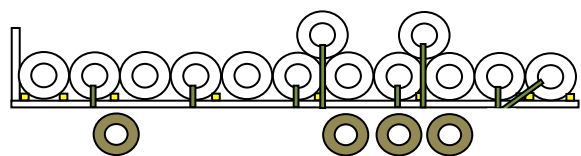


Figure 1. Schéma d'arrimage des couronnes de fil machine.

Les couronnes trancannées et les billettes sont des chargements ordinaires dont l'arrimage est documenté dans la norme européenne EN 12195-1 [4] et ne nécessitent aucune étude complémentaire.

Pour ce qui concerne les billettes, l'état de l'art recommande un arrimage en boucle au lieu de l'arrimage par frottement actuellement préconisé dans cette entreprise. L'arrimage en boucle consiste à arrimer la charge en écharpe à un côté du plateau, sur le bord de rive, pour l'empêcher de se déplacer dans la direction opposée. Deux paires de sangles doivent être disposées en opposition, de chaque côté de la remorque. Des dispositifs supplémentaires sont nécessaires pour assurer le blocage dans la direction longitudinale.

Pour ce qui concerne les couronnes trancannées, l'arrimage à effet anti-rebond est le plus adapté. Du fait que les couronnes à axe vertical n'offrent aucun point de fixation, elles peuvent être immobilisées au moyen d'une élingue à 4 brins placée sur leur face supérieure, permettant ainsi d'arrimer en boucle, à l'aide de 4 sangles ancrées de part et d'autre de la remorque (cf. [6]).

Les procédures de chargements de couronnes en roule, telles que spécifiées par l'entreprise sidérurgique, requièrent l'utilisation de cales et de sangles. Notons que la répartition et le nombre de ces systèmes d'arrimage reposent sur des considérations peu étayées, certaines couronnes n'étant uniquement maintenues que par contact avec les couronnes voisines. Le transport de couronnes gerbées est une difficulté supplémentaire qu'il convient d'appréhender avec précaution.

D'autre part, l'impact économique et ergonomique des procédures d'arrimage doit être pris en compte pour garantir leur acceptation par les transporteurs. Concrètement, le nombre de sangles et leurs modes de fixation peuvent avoir des répercussions importantes sur la durée du chargement et les risques encourus (Troubles Musculo-Squelettiques, chocs, chutes, etc.). De la même façon, le coût induit par la fourniture de bois de calage est un paramètre économique que l'exploitant doit prendre en considération.

La présente étude vise à analyser la pertinence des procédures en vigueur pour l'arrimage des couronnes de fil machine et à rechercher des pistes d'amélioration afin de garantir leur transport en toute sécurité, en anticipant les impacts des solutions proposées aux plans organisationnel, ergonomique et en tenant compte des contraintes d'ordre économique.

3. Méthode

Le transport des couronnes en roue se présente, d'un point de vue théorique, comme un problème multi-corps avec des contacts multiples. Ces derniers peuvent être difficiles à caractériser, en particulier les contacts entre couronnes assimilables à des engrenements entre surfaces irrégulières, du fait de la nature désordonnée de l'enroulement du fil d'acier.

D'autre part, la friction intervient dans toutes les zones de contact (couronne/cale, couronne/couronne, couronne/bouclier, cale/plateau). En conséquence, la connaissance de la configuration exacte du chargement -c'est-à-dire la position et l'orientation de toutes les charges, ainsi que celles des moyens d'arrimage- ne suffit pas à lever les indéterminations dans le calcul des efforts de contact. Ces derniers dépendent de l'histoire du chargement.

Pour ces raisons, l'approche de modélisation ne semble pas la mieux adaptée.

On lui a préféré l'approche expérimentale. Dans son principe, il s'agit de vérifier la tenue de chargements soumis à des sollicitations extrêmes se rapprochant des conditions d'accélération spécifiées dans la norme EN 12195 [4], comme des essais de freinage d'urgence par exemple.

Ces essais en vraie grandeur sont coûteux et surtout risqués.

Il semble alors intéressant de réaliser ces mêmes essais à échelle réduite. Le principe consiste à reproduire en laboratoire un essai de décélération contrôlée d'un modèle réduit de chargement.

Un banc d'essai constitué d'une plate-forme guidée sur rails, censée simuler un plateau de semi-remorque et supportant le modèle de chargement, peut être accéléré et freiné dans un espace restreint. Il peut également être instrumenté pour mesurer des grandeurs physiques, comme les déplacements, les forces de contact ou les forces de tension dans les moyens d'arrimage, qui fourniront une estimation des grandeurs réelles en leur appliquant les règles de restitution d'échelle.

Cette méthode nécessite au préalable une phase d'essais en vraie grandeur avec une série de configurations types qui doivent permettre de vérifier la fidélité des simulations à échelle réduite.

D'autre part, pour être transposable au problème réel, l'essai sur banc doit obéir à une loi de similitude garantissant l'équivalence entre les deux échelles de toutes les grandeurs physiques d'influence.

3.1 Règles de similitude

Les essais de freinage d'urgence ont été simulés à l'échelle 1/6.

Le tableau 1 fournit la règle de similitude qui permet de déduire, pour chaque grandeur physique mesurée, la valeur correspondante au même essai réalisé sur le banc, en appliquant le facteur d'échelle approprié.

Grandeurs physiques	Facteur utilisé pour les essais à échelle réduite
Distances, déplacements (m)	$1/6 \approx 0,167$
Masses (m)	$(1/6)^3 \approx 0,00463$
Forces (N)	$(1/6)^3 \approx 0,00463$
Raideurs (N/m)	$(1/6)^2 \approx 0,0278$
Raideurs linéiques (N)	$(1/6)^3 \approx 0,00463$
Accélérations (m/s^2)	1
Coefficients de Coulomb	1
Densité (kg/m^3)	1

Tableau 1. Règle de similitude : facteurs d'échelle.

Ainsi par exemple, des couronnes de fil de 1,8 tonne, ayant un diamètre de 1,20 m et une longueur de 1 m, ont pour réplique des couronnes de 20 cm de diamètre, 15 cm de longueur et pesant 8,3 kg.

Cette règle a été établie autour de l'invariant de gravité. Elle n'est pas rigoureusement homogène car il en découle que le rapport d'échelle choisi pour les accélérations vaut 1. Les chargements doivent évoluer dans le même rapport, que l'on considère leur déplacement, leur vitesse ou leur accélération. Or, ce facteur d'échelle vaut 1 pour les accélérations et 0,167 pour les déplacements.

En conséquence, on doit s'attendre à ce que les phases transitoires des essais réalisés sur banc soient 6 fois plus décélérées que dans la réalité. En revanche, les équilibres atteints sont transposables par application de la règle de similitude, que ce soit pour les efforts ou les élongations des moyens d'arrimage, donc le déplacement des charges.

3.2 Essais de référence en vraie grandeur

Une campagne d'essais de freinage a été effectuée sur un site sécurisé.

L'objet de ces essais était d'observer le comportement dynamique de chargements types soumis à des sollicitations extrêmes, représentatives de situations réelles d'urgence. Ces essais devaient également servir de référence pour vérifier le degré de fidélité des simulations réalisées à l'aide du banc d'arrimage. Cela impliquait de mesurer les grandeurs physiques significatives comme les efforts dans les moyens d'arrimage.

Chaque essai suivait le même principe : un véhicule tracteur équipé d'une remorque était lancé à plein régime en ligne droite sur une distance d'environ 50 m. Il avait pour consigne de freiner au franchissement d'un repère marqué sur la piste. Un accéléromètre fixé sur la cabine et relié à un afficheur fournissait une aide visuelle au chauffeur pour lui permettre de doser l'intensité du freinage en fonction de la consigne. La même mesure d'accélération a été enregistrée pour un contrôle a posteriori des conditions d'essais.

Le chargement était composé de 1 à 3 couronnes (diamètre 1,20 m ; longueur 1,4 m ; masse 1,9 T), selon les essais. Le bouclier de la remorque (hayon avant) était équipé d'une paroi instrumentée composée de deux capteurs de force supportant en parallèle une planche de

contreplaqué en bois. Lorsque le cas se présentait, il était ainsi possible de mesurer l'effort de contact entre le chargement et le bouclier. Les sangles utilisées pour arrimer les chargements étaient également équipées de capteurs de force pour mesurer l'évolution des tensions au cours du freinage.

Enfin, une caméra fixe filmait la scène à la vitesse de 250 images/seconde.

12 essais ont été réalisés pendant cette campagne. Toutes les configurations testées sont décrites dans le tableau 2.














	Configuration d'essai		Décélération (g)	Prétension des sangles (daN)	Résultats
1	Couronne en roue sur cales et appui contre bouclier		0,7	550	Force de contact 500 daN Tension constante de la sangle
2	Couronne en roue sur cales et appui contre bouclier		0,7	420	Force de contact 500 daN Tension constante de la sangle
3	Couronne en roue sur cales et appui contre bouclier		0,7	200	Force de contact 500 daN Tension constante de la sangle
4	Couronne en roue sur cales et appui contre bouclier		0,7	70	Force de contact 500 daN Tension constante de la sangle
5	Couronne en roue sur cales en retrait du bouclier		0,7	400	Roulement de la couronne vers l'avant. Choc de la couronne contre le bouclier
6	3 couronnes en roue dont 1 gerbée, 2 sur cales et 3 sanglées. La première couronne en appui sur bouclier		0,3	350-400	Force de contact 50 daN Tensions constantes des sangles
7	3 couronnes en roue dont 1 gerbée, 2 sur cales et 3 sanglées. La première couronne en appui sur bouclier		0,5	280-400	Force de contact 120 daN Tensions constantes des sangles
8	3 couronnes en roue dont 1 gerbée, 2 sur cales et 3 sanglées. La première couronne en appui sur bouclier		0,5	370-400	Force de contact 270 daN Tensions constantes des sangles
9	3 couronnes en roue dont 1 gerbée, 2 sur cales et 3 sanglées. La première couronne en appui sur bouclier		0,65	350-430	Force de contact 400 daN Tensions constantes des sangles
10	2 couronnes en roue, sur cales. Appui contre bouclier de la 1 ^{ère} couronne		0,55	430	Force de contact 600 daN Tensions constantes des sangles
11	2 couronnes en roue, sur cales. Appui contre bouclier de la 1 ^{ère} couronne		0,55	0	Force de contact 500 daN Tensions constantes des sangles
12	Couronne en roue dans l'axe longitudinal de la remorque, sur cale et sanglée.		0,55	360	Aucun déplacement Tensions constantes des sangles

Tableau 2. Présentation synthétique de la campagne d'essai en vraie grandeur.

Au cours de la série d'essais, il n'a jamais été possible d'atteindre la valeur de 1 g utilisée dans la norme EN 12195-1 pour le calcul des forces de retenue dans les moyens d'arrimage [4]. La valeur maximale atteinte est de 0,7 g.

Les 4 premiers essais ont permis d'évaluer le transfert de poids contre le bouclier pour une décélération de 0,7 g. En théorie, en l'absence de cales, ce transfert aurait atteint 1,25 tonne. Comme évoqué précédemment, le problème mécanique est théoriquement indéterminé, car il met en jeu 3 contacts unilatéraux avec frottements. Il n'est donc pas possible de calculer la valeur des forces de réaction avec ces seules informations. En pratique, cela signifie qu'il existe plusieurs manières de répartir les efforts sur les cales et sur le bouclier lors du chargement.

L'essai n°5 a démontré l'inefficacité de la méthode de sanglage utilisée actuellement dans l'entreprise. Telle que disposée, la sangle n'interdit pas le roulement de la couronne sur la cale avant, cette dernière ayant elle-même une action limitée, comme le démontre la capture vidéo de la figure 2. Le choc contre le bouclier est alors violent. Une valeur crête de 3000 daN a été enregistrée au moment de l'impact entre la couronne et la cloison.

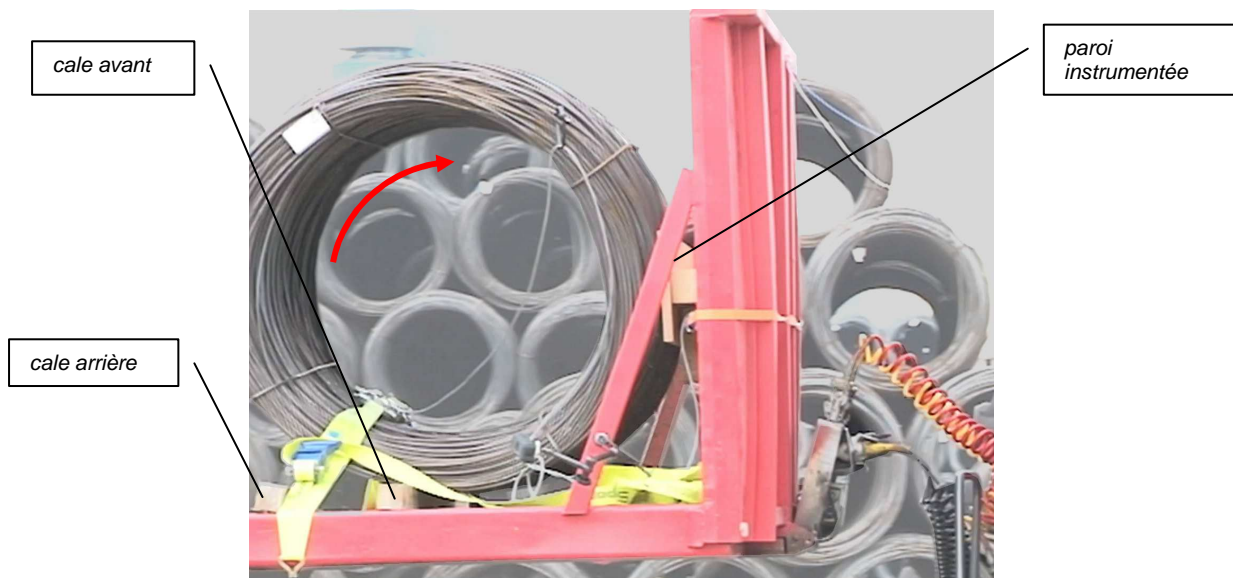


Figure 2. Capture vidéo de l'essai n°5 à l'instant de l'impact entre la couronne et le bouclier. Couronne de 1,9 T sur cales, sanglée, initialement en retrait du bouclier.

La configuration des essais réalisés avec une couronne gerbée (essais n°6 à n°9) a été choisie volontairement en appui contre le bouclier, par crainte des risques probables de perte du chargement et de dommages pour le transporteur. Lors de ces essais, aucun mouvement significatif n'a été constaté pour aucune des charges. Les valeurs de décélération n'ont pas été suffisantes pour provoquer le roulement de la couronne supérieure. En supposant l'absence de frottement entre couronnes, la valeur théorique pour provoquer le roulement de la couronne gerbée est supérieure à 0,7 g. En conséquence, la sangle correspondante n'a pas été sollicitée, ce qui explique que la tension mesurée est restée constante au cours de ces essais. Une partie des forces d'inertie a été reprise par le bouclier, le reste a été transmis aux cales.

Les essais avec deux couronnes en contact et en appui sur le bouclier (essais n°10 et n°11) ont été réalisés pour mesurer les efforts transmis au bouclier. En comparant les valeurs mesurées à celles des 4 premiers essais, on remarque que ces efforts ne sont pas proportionnels au nombre de couronnes ni à l'intensité de la décélération. De plus, ces efforts fluctuent d'un essai au suivant, selon la manière dont se réorganisent les moyens de calage après avoir été sollicités.

L'essai n°12 a consisté à simuler les conditions d'une prise de virage et observer le comportement des chargements dans la direction transversale. Une couronne a été orientée perpendiculairement aux essais précédents. L'intensité de la décélération a volontairement été réduite pour se rapprocher des valeurs d'accélération centrifuges typiques de ces conditions de circulation. On observe que la couronne n'a pas glissé vers l'avant pendant le freinage et que la sangle n'a pas été sollicitée. Cet essai permet d'estimer la valeur minorant le coefficient de frottement équivalent pour le contact entre les spires d'acier et le plancher en bois de la remorque, soit une valeur de 0,55.

3.3 Description du banc d'essais d'arrimage

Les informations recueillies au cours des essais en vraie grandeur et la règle de similitude présentée plus haut ont été exploitées pour concevoir un banc d'essais d'arrimages dont le but était de reproduire en laboratoire les essais de freinage à l'échelle 1/6.

Comme l'illustre la figure 3, le banc d'essai est composé d'une plateforme guidée sur rails dont le plateau supérieur a pour dimensions 40 x 235 cm. La plateforme est entraînée par un câble métallique parcourant 3 poulies, à l'extrémité duquel est accroché un lest.

La plateforme est initialement positionnée au bout du rail (à gauche sur la figure 3). Un système de largage permet de libérer le lest qui chute alors de son propre poids, entraînant ainsi la plateforme par l'intermédiaire du câble. Lorsque le lest atteint le sol, le câble se détache automatiquement de la plateforme et cette dernière continue alors son parcours à vitesse quasi constante. Cette phase à accélération nulle se déroule sur les deux tiers de la longueur totale du parcours qui est d'environ 6 m. Lorsque l'avant de la plateforme atteint l'extrémité du rail, une épaisseur de mousse de polyuréthane permet de la freiner et d'imposer ainsi un palier de décélération, dont l'amplitude peut être ajustée selon les besoins grâce à la masse du lest et au nombre de blocs de mousse utilisés.

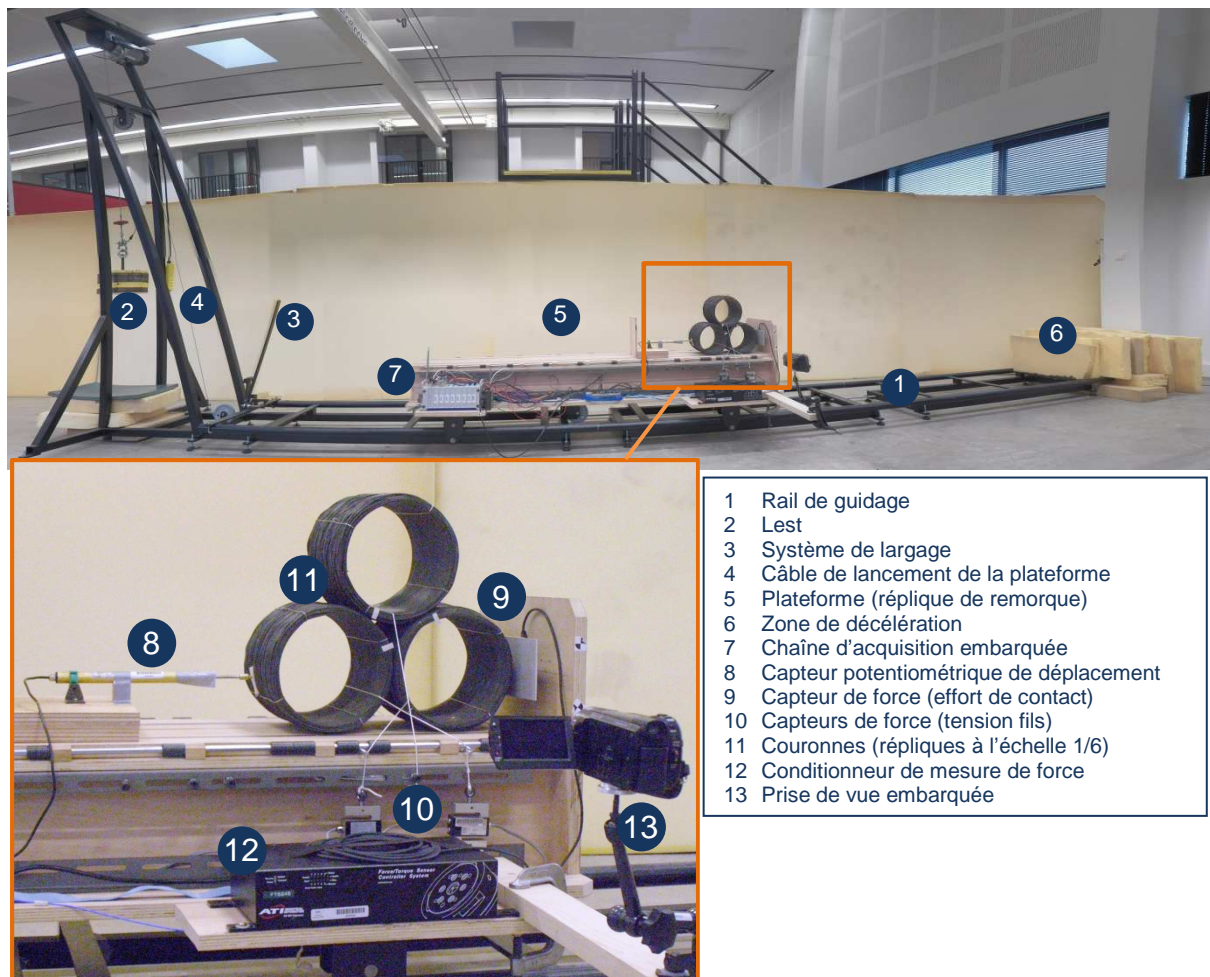


Figure 3. Descriptif du banc d'essai d'arrimages à échelle réduite.

Les modèles de couronnes ont été fabriqués par enroulement de fil d'acier d'un diamètre de 2 mm. Ils mesurent 15 cm de hauteur et leur diamètre vaut 20 cm. Leur masse vaut 8,3 kg.

Les sangles ont été répliquées par du fil torsadé en polypropylène. Cette dernière a été caractérisée à l'aide d'un échantillon de 470 mm éprouvé sur une machine de traction pour en déterminer sa raideur linéique. Ces mesures ont mis en évidence le comportement linéaire du fil dans la gamme d'effort [0 - 25 daN] (coefficient de détermination : 0,9975). La raideur linéique mesurée vaut 470 daN, ce qui correspond à un allongement d'environ 5% à 25 daN. En appliquant les règles de similitude, on obtiendrait en vraie grandeur une raideur linéique de $1,01 \cdot 10^6$ N, soit un allongement de 5% à 5000 daN, ce qui est bien représentatif de la raideur des sangles du commerce de capacité d'amarrage LC=5000 daN et d'allongement < 7 % (cf. [5]).

Des capteurs de force (force max 50 daN) sont utilisés pour mesurer la tension instantanée dans les liens. Le bouclier est également monté sur une cellule de force à 6 composantes (force max 66 daN) permettant de mesurer les efforts de contact transmis par la couronne lorsque celle-ci vient en appui.

Un capteur potentiométrique est utilisé pour mesurer le déplacement longitudinal des couronnes.

Des essais de caractérisation du frottement entre les couronnes et le plancher en bois de la plateforme ont révélé qu'il n'était aucunement représentatif du frottement entre ces mêmes structures à l'échelle 1 composées de matériaux identiques. Le coefficient statique ou coefficient d'adhérence a été mesuré en tirant le modèle réduit de couronne dans son axe, de manière identique aux conditions de l'essai n°12 et en augmentant progressivement la valeur de la force de traction, jusqu'à atteindre le seuil de glissement. La valeur ainsi mesurée vaut 0,35. Or, nous avons précédemment déduit des résultats d'essais que le coefficient était supérieur à 0,55 en vraie grandeur. Cette observation est apparemment en contradiction avec les lois de Coulomb qui trouvent leurs limites, en particulier lorsque les variations d'effort normal sont importantes (ici le rapport des pressions est de 6 entre les deux échelles d'expérimentation). D'un point de vue théorique le modèle de déformation plastique des aspérités de Bowden et Tabor [7] (écrasement à pression constante et augmentation de la surface réelle de contact en fonction de l'effort normal) fournit une explication au phénomène de frottement et permet de comprendre la proportionnalité de la force de frottement vis-à-vis de la force normale. On peut supposer que ce phénomène ne se produise que pour des niveaux de pression suffisants. On peut également supposer que des déformations locales macroscopiques peuvent se produire dans le plancher de la remorque sous la pression élevée exercée par le relief des spires et créant ainsi des empreintes s'opposant au glissement.

Afin de respecter la règle de similitude fixant l'invariance du coefficient de frottement, la plateforme du banc d'essai a été recouverte d'un revêtement de caoutchouc permettant dans ces conditions d'atteindre la valeur de 0,75.

4. Résultats des simulations à échelle réduite

4.1. Arrimage d'une couronne selon les consignes édictées par l'entreprise

Dans un premier temps, l'essai de référence n°5 a été reproduit à échelle réduite pour vérifier que dans des conditions semblables, la maquette de couronne avait un comportement analogue à la couronne originale. Comme l'illustre la figure 4, l'expérience montre que les liens ne parviennent pas à empêcher le roulement de la couronne vers l'avant et son impact avec le bouclier.

Le lest du banc a été ajusté pour obtenir une valeur de décélération proche de celle mesurée sur le véhicule, soit environ 8 m/s^2 (au lieu de 7 m/s^2).

Les cales de section $14\text{mm} \times 14\text{mm}$ ont été fixées sur la plateforme de manière à éviter tout glissement éventuel.

Dans ces conditions, la durée de la phase transitoire de roulement avant le choc contre le bouclier a duré 0,3 s. Comme mentionné précédemment, cette phase est surdécélérée par rapport à l'essai en vraie grandeur, pour lequel elle a duré environ 1 s.

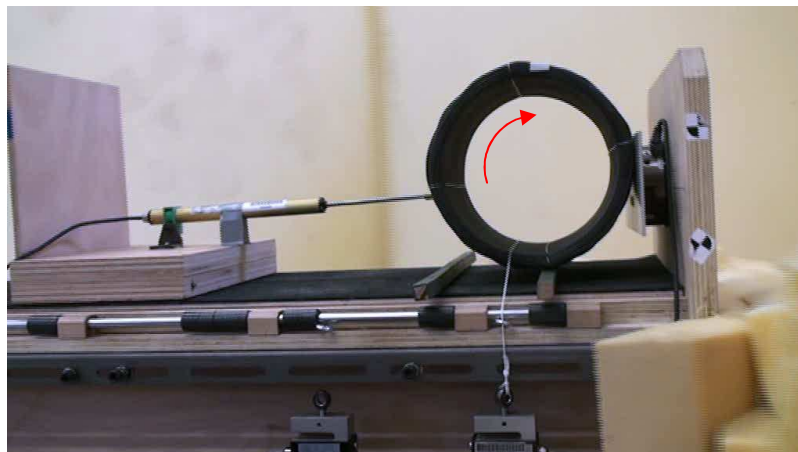


Figure 4. Simulation de l'essai de référence n°5.
Capture vidéo de l'impact entre la couronne et le bouclier.

Le choc de la couronne contre la paroi atteint 60 daN en valeur crête. Il se produit un dixième de seconde après la fin de la phase à décélération constante, comme l'illustre la figure 5. L'intensité du choc n'est pas transposable à l'essai de référence n°5 car, d'une part, elle est liée à l'énergie cinétique emmagasinée par la couronne en phase transitoire surdécélérée et, d'autre part, elle dépend de la souplesse de la cloison, pour laquelle aucune spécification n'a été formulée.

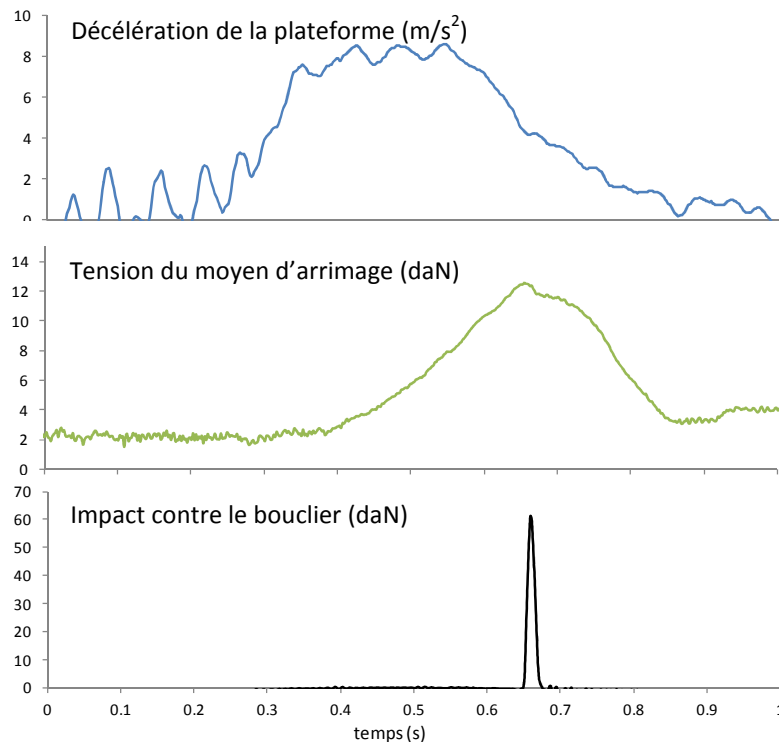


Figure 5. Mesure des grandeurs physiques caractéristiques de l'essai d'arrimage de couronne sur cales arrimée transversalement.

4.2. Arrimage selon les consignes édictées par l'entreprise de 3 couronnes dont une gerbée

La configuration de l'essai de référence n°6 a également été reproduite à échelle réduite. Contrairement aux essais réalisés sur véhicule, un espace libre a été réservé entre l'ensemble formé des 3 couronnes et le bouclier, afin d'observer et mesurer le mouvement relatif éventuel du chargement au cours de la décélération. Comme pour l'essai précédent, les 2 cales avant ont été fixées sur la plateforme. Elles sont espacées d'une distance de 100 mm de telle sorte que la couronne soit également en contact avec le plancher.

Le lest a été ajusté pour atteindre une décélération de 10 m/s^2 .

Dans ces conditions, on observe que le chargement suit un mouvement d'ensemble vers l'avant d'une amplitude de 14 mm. Transposée à l'échelle, cette valeur représenterait un déplacement de 8,4 cm. La transposition est ici valide car elle correspond à un régime établi (cf. figure 6 sur l'intervalle de temps [0,25-0,4s]).

Le déplacement est limité en grande partie par l'action des cales. De surcroît, ces dernières étant fixées sur le plancher, elles n'ont pas la possibilité de glisser, comme elles pourraient le faire dans la réalité.

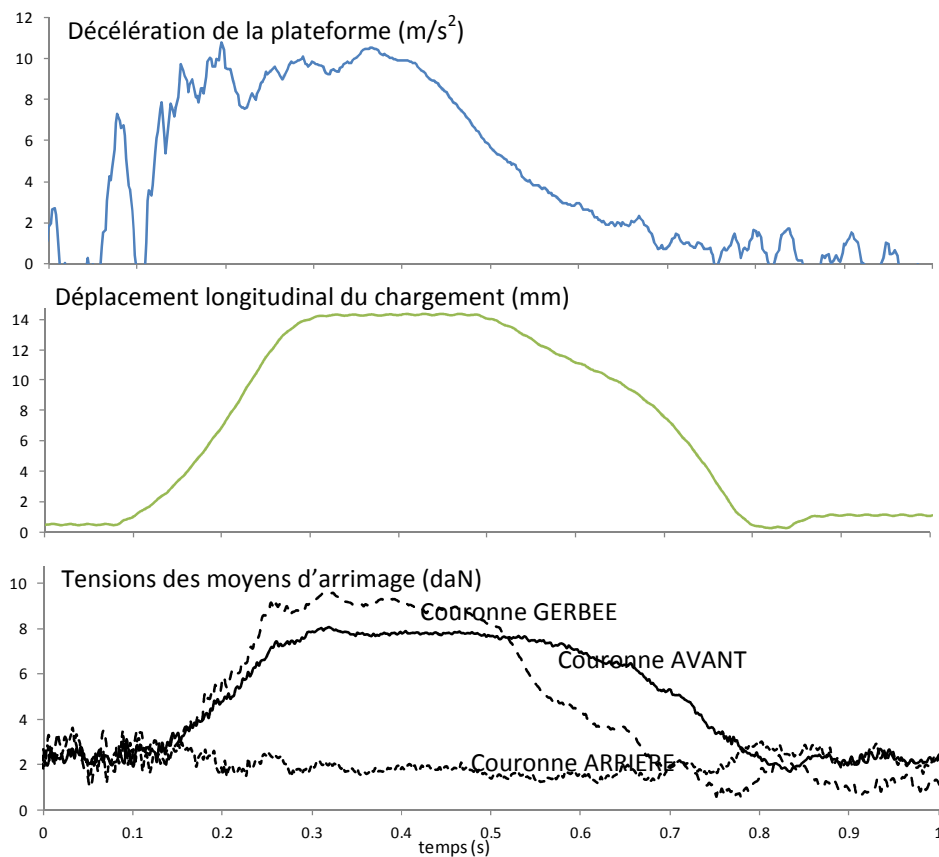
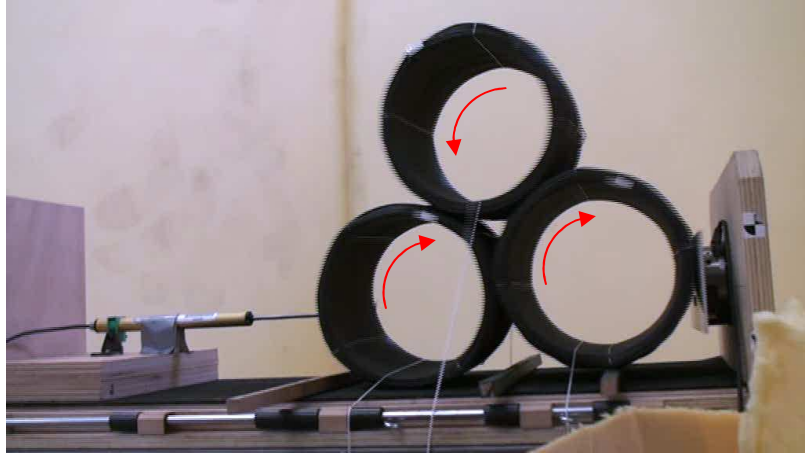


Figure 6. Mesure des grandeurs physiques caractéristiques de l'essai d'arrimage de 2 couronnes sur cales et 1 couronne gerbée, toutes arrimées transversalement.

L'essai a été répété en réduisant de 15 mm la distance séparant les deux cales avant. Ainsi la couronne avant n'est plus en contact avec le plancher et repose entièrement sur les arêtes opposées des cales. L'angle formé par les normales aux lignes d'appuis de la couronne est alors réduit de 8° et vaut 52,5°.

Cette configuration de chargement suit la consigne édictée par l'entreprise pour s'assurer de l'appui franc de la couronne sur les cales. C'est également pour cette raison que les cales sont choisies en bois tendre.



*Figure 7. Simulation de l'essai de référence n°6 dans la configuration où la couronne avant repose sur les cales et n'est pas initialement en contact avec le plancher.
Capture vidéo de l'impact avec le bouclier.*

Dans ces conditions, l'essai de décélération conduit au roulement de l'ensemble formé des 3 couronnes vers l'avant de la plateforme, sur une distance de 45 mm, jusqu'à l'impact avec le bouclier (cf. figure 7).

4.3. Arrimage croisé de deux couronnes

Les essais précédents ont permis de vérifier que le comportement dynamique de modèles réduits de chargements était conforme aux essais de référence, sous des sollicitations équivalentes.

Le banc a également permis de réaliser des essais dans des conditions moins restrictives que les essais de référence, conditions imposées en vraie grandeur par des exigences de sécurité. Nous avons pu vérifier à cette occasion que les méthodes d'arrimage en usage n'étaient pas sûres, car elles ne garantissaient pas l'immobilisation des chargements.

Le banc d'essai a alors été utilisé pour rechercher des méthodes alternatives plus efficaces.

Plusieurs méthodes ont été testées. La plus intéressante consiste à regrouper les couronnes par lots de 2 unités.

Comme le montre la figure 8, les couronnes sont immobilisées l'une contre l'autre par deux sangles croisées. Les sangles offrent ainsi une double fonction, celle d'assurer la cohésion du lot et celle de l'immobiliser.

1 seule sangle par couronne est nécessaire, alors que l'arrimage d'une couronne en roue en nécessite en théorie 2 (selon les principes édictés dans la norme EN 12195-1).



Figure 8. Arrimage croisé d'un lot de 2 couronnes.

Cet essai a été réalisé sans cales. L'objectif visé est de retenir le chargement complet par la seule action des liens en polypropylène.

Les résultats montrent une bonne cohésion et une immobilisation satisfaisante des couronnes (déplacement inférieur à 10 mm, cf. figure 9) sous une décélération de 10 m/s^2 .

Par ailleurs, en régime établi, l'effort maximal atteint dans le lien retenant la couronne avant est de 8 daN, ce qui correspond à une tension de 1800 daN dans la réalité, donc une force inférieure à la capacité d'amarrage de la sangle qui vaut 5000 daN. Le lien retenant la couronne arrière voit lui sa tension diminuer au cours de la décélération jusqu'au relâchement complet.

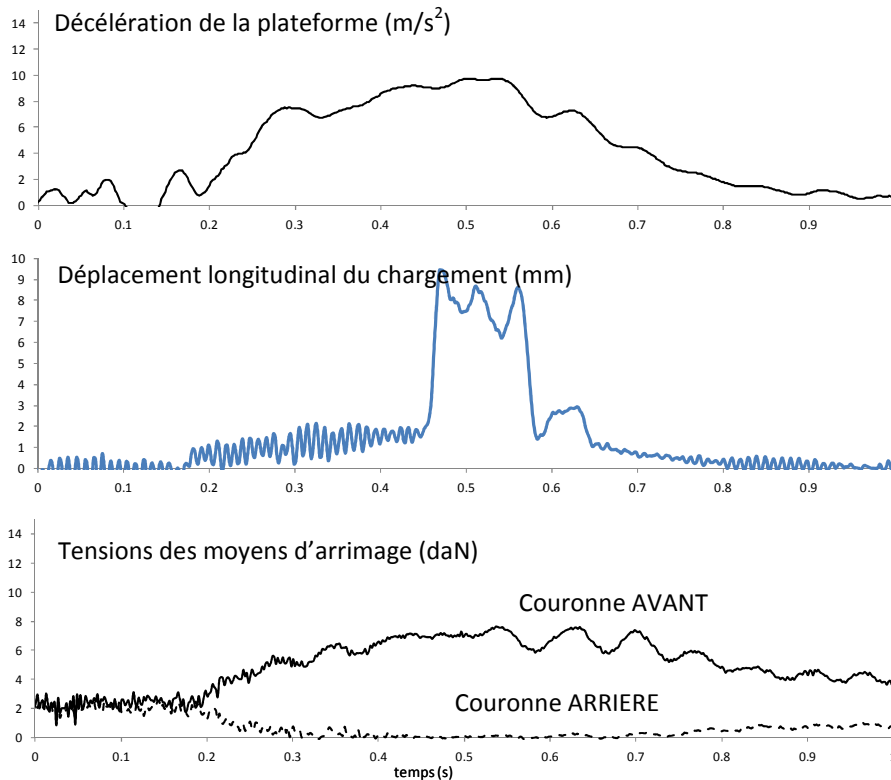


Figure 9. Mesure des grandeurs physiques caractéristiques de l'essai d'arrimage croisé de 2 couronnes.

Remarque : en inversant l'ordre d'arrimage des liens, c'est-à-dire en faisant passer le lien retenant la couronne arrière par dessus l'autre lien, on observe alors que le roulement d'ensemble, bien que faible, est suffisant pour élever la ligne de contact du lien sur la couronne avant et au contraire abaisser la ligne de contact du second lien. Géométriquement, les 2 points d'intersection des liens ont alors tendance à s'écarter l'un de l'autre en rattrapant ainsi le mou apparaissant dans le second lien. In fine, contrairement au cas de figure illustré en figure 9, les efforts mesurés dans les deux liens sont identiques (environ 6 daN), au cours de la phase à décélération constante.

4.4. Arrimage croisé de deux couronnes en roule et une couronne gerbée arrimée transversalement

Le principe d'arrimage précédent a été étendu au cas de 3 couronnes en roule, dont une gerbée.

Les deux couronnes inférieures sont arrimées de manière identique au cas précédent. La couronne gerbée est arrimée transversalement (cf. figure 10).

Comme précédemment, l'efficacité de ce mode d'arrimage a été évaluée à l'exclusion de tout calage additionnel.

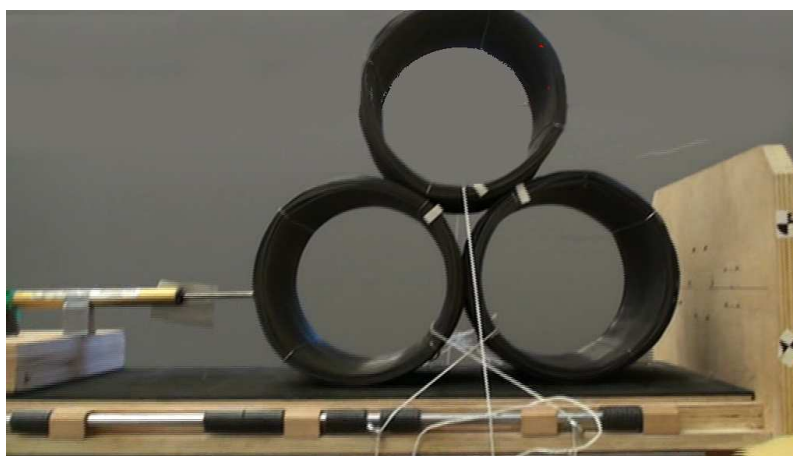


Figure 10. Arrimage croisé de 2 couronnes en roule et arrimage transversal de couronne gerbée.

Nous avons étudié l'influence du frottement entre le plancher de la plateforme d'essai et les couronnes. Pour cela, nous avons réalisé les essais de décélération avec le plancher en bois (coefficient d'adhérence de 0,35) puis en recouvrant le plancher d'une surface de caoutchouc, comme pour les essais présentés précédemment (coefficient d'adhérence de 0,75).

Nous avons étudié la répétabilité de l'expérimentation, liée en particulier aux conditions d'arrimage. Comme expliqué plus haut, du fait de la multiplicité des contacts, l'état initial des frottements dépend de la manière de fixer les liens. Pour chacune des 2 configurations, nous avons donc répété 5 fois l'essai de décélération, en désarrimant complètement le chargement puis en remettant en place les liens avant chaque essai (estimation de la répétabilité).

Essai	Tension arrimage Couronne avant (daN)		Tension arrimage Couronne arrière (daN)		Tension arrimage Couronne gerbée (daN)		Déplacement d'ensemble du chargement (mm)	
<i>Plancher recouvert de caoutchouc</i>								
1	11,87		0		8,35		9,66	
2	10,51		0		7,08		5,94	
3	10,49		0		9,88		6,13	
4	11,73		0		4,81		7,86	
5	10,55		0		6,35		6,54	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
	11,03	0,71	0	0	7,29	1,93	7,23	1,55
<i>Plancher bois</i>								
1	10,89		0		8,17		8,1	
2	10,76		0		7,17		10,77	
3	10,49		0		6,78		7,25	
4	11,94		0		7,50		8,75	
5	9,97		0		7,53		6,83	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
	10,81	0,72	0	0	7,43	0,51	8,34	1,55

Tableau 3. Tensions mesurées dans les moyens d'arrimage au cours de la phase à décélération constante égale à 10 m/s^2 .

Les résultats sont exposés dans le tableau 3 et illustrés en figure 11. On remarque que l'adhérence sur la surface du plancher influe peu sur les efforts de tension mesurés dans les liens, ni sur le mouvement d'ensemble du chargement.

Ce dernier est tout à fait acceptable car il est inférieur à 9 mm en moyenne, ce qui, transposé à l'échelle réelle, équivaldrait à 5,4 cm. Les efforts endurés par les liens sont eux aussi acceptables. Ils sont dans tous les cas inférieurs à 12 daN. A échelle réelle, les tensions n'excéderaient donc pas 2,6 T. Elles sont donc compatibles avec l'utilisation de moyens d'arrimage courants d'une capacité d'amarrage de 5000 daN.

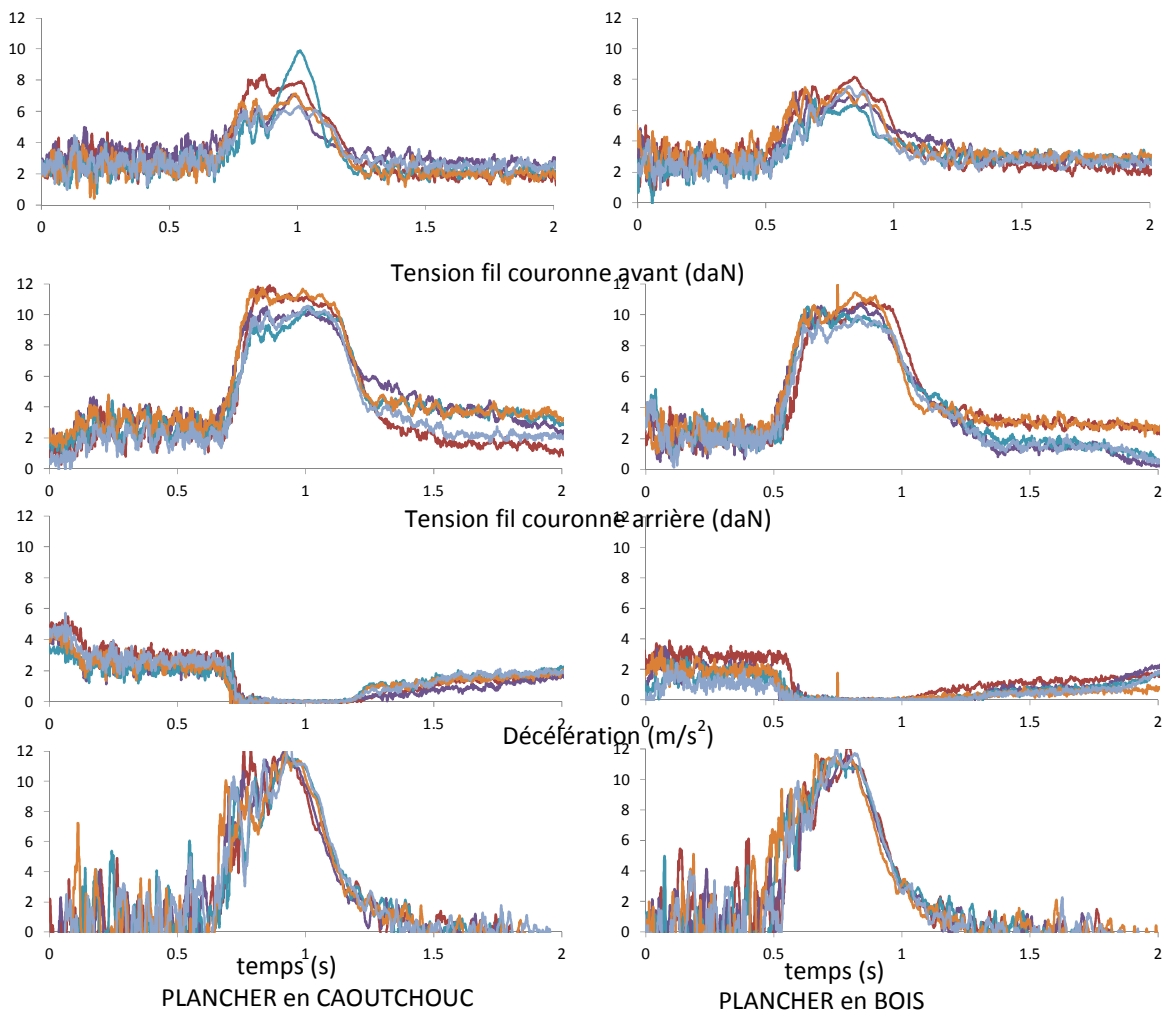


Figure 11. Essais de répétabilité.

Des essais complémentaires ont été réalisés pour vérifier la tenue latérale du chargement complet soumis à une décélération représentative de la prise d'un virage, soit 5 m/s^2 comme indiqué dans la norme EN 12195-1 [4].

Pour ce faire, le chargement a été orienté perpendiculairement au sens du mouvement de la plateforme (cf. figure 12).

La surface du plancher est en bois.

Le lest a été ajusté pour atteindre la décélération de consigne de 5 m/s^2 . En fait, la valeur mesurée pendant le palier de décélération était proche de 6 m/s^2 .



Figure 12. Essai de décélération latérale.

Dans ces conditions, le chargement n'a pas glissé. L'ensemble s'est très légèrement incliné dans le sens du mouvement de la plateforme. Le déplacement des couronnes inférieures, mesuré à mi-hauteur, a une amplitude maximale de 2,1 mm, ce qui correspond à une inclinaison de $1,2^\circ$ du chargement qui est acceptable.

Les tensions mesurées dans les fils ne dépassent pas 3,1 daN, équivalant à un effort de 670 daN en vraie grandeur, valeurs également acceptables en comparaison à la capacité d'amarrage des sangles.

5. Validation de la méthode d'arrimage croisé en grandeur réelle

La méthode d'arrimage croisé a finalement été validée en vraie grandeur avec un véhicule poids lourd équipé d'une remorque et un chargement composé de deux couronnes de 1,7 T (diamètre extérieur 1,20 m ; longueur 1,40 m ; diamètre de fil 14 mm). Une seconde série d'essais a été réalisée avec un chargement de 3 couronnes de mêmes caractéristiques, comme l'illustre la figure 13.



Figure 13. Composition des chargements testés en vraie grandeur lors d'un essai de freinage d'urgence.

Dans les deux configurations de chargements, des capteurs de forces ont permis de mesurer l'évolution de la tension dans chaque sangle au cours des essais.

Les couronnes ont été disposées en retrait du bouclier pour s'assurer de l'intégralité de la reprise des efforts d'inertie par les sangles. Aucune cale n'a été utilisée. Les sangles ont été croisées, de manière identique aux essais réalisés sur le banc à échelle réduite. Une pré tension d'intensité comprise entre 200 et 400 daN a été appliquée à chaque sangle.

Un accéléromètre a été positionné sur la remorque dans l'axe longitudinal, pour mesurer l'intensité de la décélération dans la phase de freinage.

Chaque essai consistait à circuler à plein régime, en ligne droite, sur une piste goudronnée et sur une distance d'environ 70 m, puis à enfoncer brusquement la pédale de frein jusqu'en butée, pour arrêter le véhicule sur une distance d'une dizaine de mètres. Ces essais ont été reproduits 4 fois dans chacune des 2 configurations de chargements.

Dans tous les essais, les chargements sont restés en place. Des repères disposés sur le plancher de la remorque à intervalles réguliers ont permis d'estimer le déplacement relatif des couronnes à l'aide d'une caméra embarquée. Ce déplacement, de l'ordre du centimètre, résulte d'une rotation d'ensemble d'un angle inférieur à 1° (angle mesuré à partir des acquisitions vidéo).

Les mesures de décélération de la remorque et d'efforts de tension dans les sangles sont présentées dans les figures 14 et 15 pour chacune des deux configurations de chargement et pour chaque série d'essai.

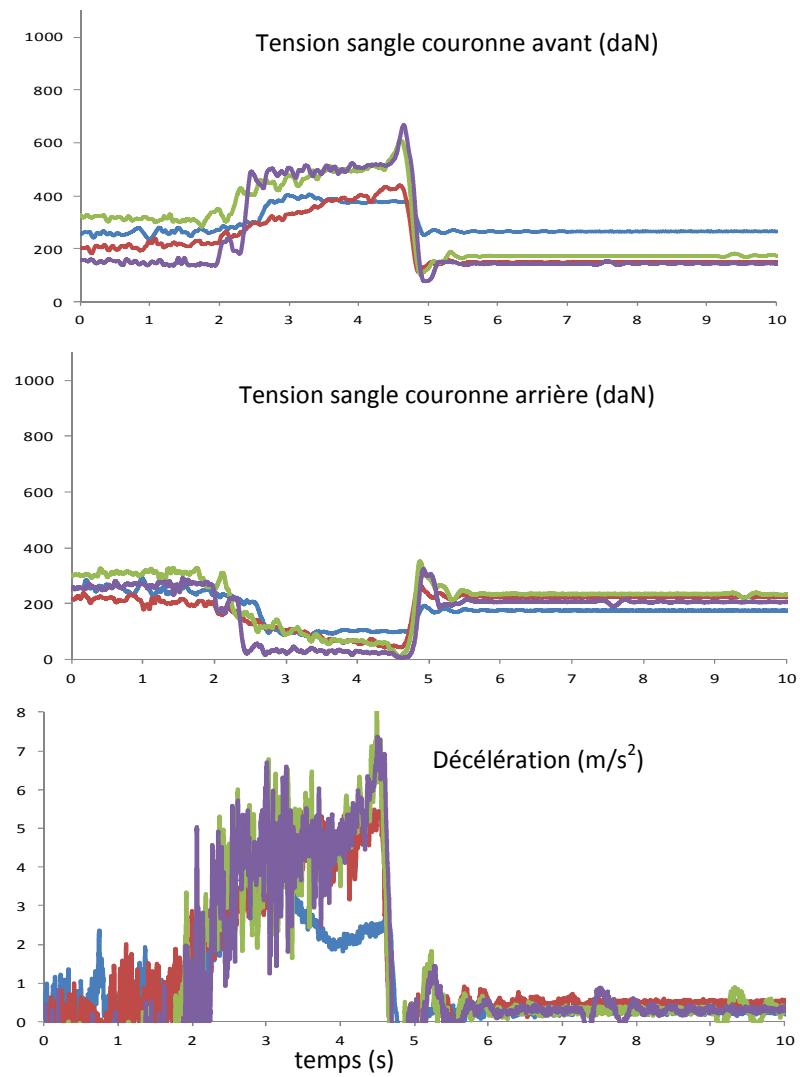


Figure 14. Efforts mesurés dans les sangles du chargement composé de deux couronnes en roue avec sanglage croisé.

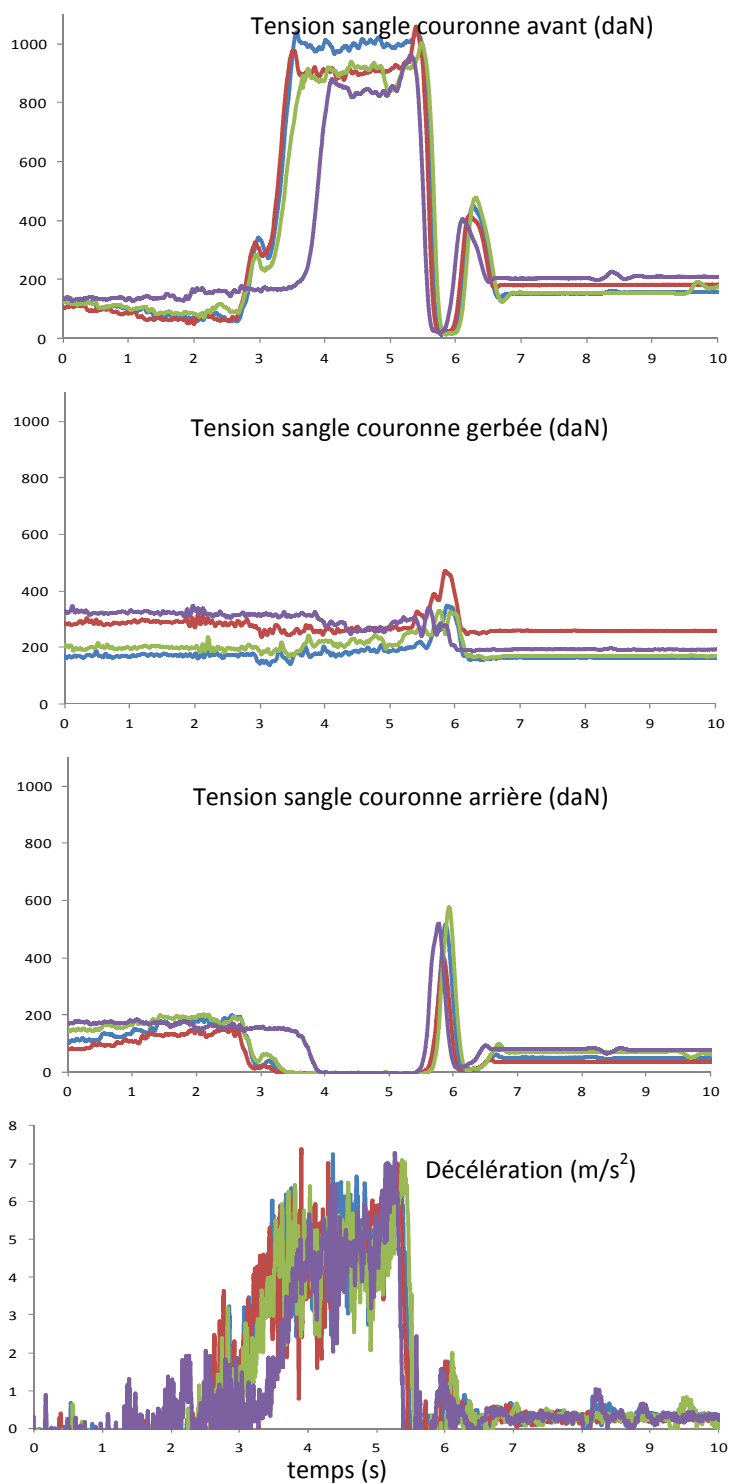


Figure 15. Efforts mesurés dans les sangles du chargement composé de deux couronnes en roule avec sangle croisé et d'une couronne gerbée sanglee.

On constate que la décélération atteint une valeur maximale de l'ordre de 7 m/s^2 , après avoir atteint une valeur constante de l'ordre de 5 m/s^2 pendant une durée comprise entre 1 et 2 s.

On remarque également que les essais sont relativement répétables.

Dans la configuration de chargement composée de deux couronnes en roule, la tension maximale est mesurée dans la sangle retenant la couronne avant. Elle est de l'ordre de 600 daN. L'autre sangle est quasiment complètement détendue (effort nul) pendant la phase de décélération.

Dans la configuration de chargement à trois couronnes, la sangle retenant la couronne avant est la plus sollicitée. Sa tension atteint la valeur maximale d'environ 1000 daN. L'intensité de la décélération n'est pas suffisante pour solliciter la sangle retenant la couronne gerbée, dont la tension reste constante au cours des essais. L'angle de calage avec les couronnes inférieures est alors suffisant pour l'empêcher de rouler par-dessus la couronne avant. Enfin, comme pour la première configuration de chargement, la troisième sangle est intégralement détendue pendant la phase de décélération.

Les efforts mesurés sont dans tous les cas compatibles avec la capacité d'amarrage des sangles (5000 daN), même en appliquant un coefficient de sécurité pour extrapoler ces valeurs à un essai à décélération de 10 m/s^2 , valeur prescrite dans la norme EN 12195-1.

Ces essais permettent de conclure que la méthode d'arrimage croisé préconisée est sûre.

6. Recommandations et conclusion

Cette étude avait pour objectif d'évaluer la méthode d'arrimage de couronnes de fil d'acier pour béton armé actuellement en vigueur dans une entreprise française, et de proposer, le cas échéant, des améliorations pour sécuriser le transport de ces produits sidérurgiques.

Des essais de freinage d'urgence réalisés avec des chargements types, composés d'une à trois couronnes ont été réalisés sur un site dédié. Ces essais ont permis d'acquérir un certain nombre de grandeurs physiques (forces, accélérations) qui ont servi par la suite à établir une procédure d'essais en laboratoire. Cette procédure est fondée sur une simulation à échelle réduite. Un banc a été conçu à cet effet, et a permis de vérifier en toute sécurité que la méthode d'arrimage utilisée par cette entreprise n'offrait pas toutes les garanties de sécurité. Il a également permis de proposer une méthode sûre, qui a été éprouvée par des séries d'essais et sous des sollicitations extrêmes.

Recommandations :

- 6.1. La méthode consiste à regrouper par paires les couronnes posées en roule et à disposer les sangles en opposition, c'est-à-dire croisées, de manière à maintenir la cohésion des lots et à les immobiliser. Idéalement, la couronne avant doit être arrimée en premier. Ainsi la sangle retenant la couronne arrière recouvre l'autre sangle aux points où les deux sangles se croisent, permettant ainsi le rattrapage de mou dans une situation de freinage d'urgence (voir remarque plus haut).
- 6.2. Si le chargement est composé d'un nombre impair de couronnes, la dernière couronne doit être arrimée avec la couronne voisine par sanglage croisé. Ainsi cette dernière est maintenue solidaire avec les deux couronnes avec lesquelles elle est en contact.
- 6.3. Dans le cas de couronne gerbée, celle-ci doit être arrimée avec une sangle la traversant transversalement et la plaquant sur la paire de couronnes qui la supporte.
- 6.4. Nous recommandons d'espacer de quelques centimètres chaque paire (ou triplet) de couronnes arrimées pour autoriser l'élongation nécessaire des moyens d'arrimage et éviter le transfert en chaîne des forces d'inertie, vers le bouclier de la remorque.

Les essais à échelle réduite ont montré que cette méthode permettait d'immobiliser les chargements soumis à des décélérations de l'ordre de 1 g, en l'absence de calage.

- 6.5. En pratique, nous recommandons l'utilisation additionnelle de calage, dont le rôle sera de préserver les moyens d'arrimage en limitant les efforts de tension. Actuellement, l'opération de calage impose une coactivité importante entre le cariste, chargé d'apporter les couronnes sur la remorque et le chauffeur, qui doit ajuster l'espacement des cales afin que leurs arêtes soient bien écrasées par le poids des couronnes. Nous recommandons d'effectuer le calage dans une phase ultérieure à la manutention et au sanglage.

- 6.6. Un intérêt particulier doit être porté à la robustesse des points d'ancrage sur le bord de rive de la remorque. En effet, du fait de l'inclinaison des moyens d'arrimage, il faut impérativement veiller à interdire tout glissement éventuel des crochets de sangles. Les remorques récentes sont équipées de points d'ancrage sûrs et régulièrement répartis le long du bord de rive. Dans le cas de remorques plus anciennes, les crochets d'arrimage doivent être positionnés au contact des renforts transversaux, comme l'illustre la figure 16.



Figure 16. Positionnement des crochets d'arrimage.

Cette méthode revêt également un intérêt pratique et économique, car elle limite le nombre de sangles utilisées, comparativement à la méthode académique consistant à immobiliser chaque couronne à l'aide d'une paire de sangles.

Au plan ergonomique, elle offre également l'intérêt de pouvoir être mise en œuvre depuis le sol. Elle n'impose pas de monter sur la remorque, donc réduit les risques de chute.

7. Références bibliographiques

- [1] Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. Chiffres clés du transport. Repères. Mars 2012, 28 p.
- [2] AUMAS M., VALLADEAU A.S.- Arrimage des charges sur les véhicules routiers. Edition INRS ED 759. Février 2008, 80 p.
- [3] Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs.
- [4] NF EN 12195-1 - Dispositifs d'arrimage des charges à bord des véhicules routiers - Sécurité - Partie 1 : calcul des forces de retenue. AFNOR 2011, 46 p.
- [5] LEMERLE P. - Validation de moyens d'arrimage pour le transport des paniers et cadres de bouteilles de gaz. Hygiène et Sécurité au Travail, septembre 2012, Vol 228, ND 2362.
- [6] PAUREAU J., JACQMIN M. - Arrimage des produits sidérurgiques sur véhicules routiers. Hygiène et Sécurité au Travail, 2ème trimestre 1991, Vol 143, ND 1829-143-91.
- [7] BOWDEN F., TABOR D.- The Friction and Lubrication of Solids. Clarendon Press.