

SECURITE DES POIDS LOURDS AVEC BALLOTTEMENT DE LIQUIDE

Gilles Schaefer (SERA-CD)
Philippe Corrigan (SIREHNA)
Dominique Lescaïl (UTAC)
Daniel Lechner (INRETS-MA)

RESUME

Les poids lourds porteurs ou semi-remorques ont des possibilités dynamiques d'évolution notablement inférieures à celles des voitures de tourisme pour des raisons d'architecture liées à leur fonctions.

Dans le cas des citernes transportant des liquides, les mouvements propres du fret liquide interagissent de façon complexe avec ceux du véhicule et peuvent dégrader la tenue de route et la sécurité.

Un groupement de partenaires pluridisciplinaires constitué de SERA-CD, SIREHNA, UTAC, INRETS MA et les constructeurs de semi-remorques citernes GENERAL TRAILERS FRANCE et CRYOLOR s'est créé pour faire progresser les connaissances sur ce problème. Dans le cadre du PREDIT II, le Ministère chargé de la Recherche a subventionné ce programme en cours, dont les principales actions sont les suivantes :

SERA-CD assure la maîtrise d'œuvre du programme, a complété son logiciel de comportement dynamique de véhicules industriels PROSPER par un module de calcul de torsion de châssis, intégré les développements concernant le fret liquide et mis au point les paramétrages des véhicules modélisés.

SIREHNA, spécialiste de Mécanique des Fluides, a développé un modèle mécanique de complexité réduite fournissant les efforts statiques et dynamiques exercés par le liquide en mouvement sur la citerne. Ce modèle a été identifié à partir de résultats expérimentaux, complétés par des simulations numériques par code de calcul de dynamique des fluides. Ce module logiciel a été fourni pour intégration dans PROSPER.

L'UTAC et l'INRETS ont instrumenté un tracteur, une semi-remorque citerne et une savoyarde à 3 essieux, et ont réalisé plus de 200 essais, avec notamment 4 taux de remplissage de la citerne, pour des manœuvres stabilisées et transitoires. Ils constituent le matériau de base pour effectuer la validation du logiciel complet, qui pourra ensuite être appliqué à des accidents réels.

Les principales retombées de ce programme concernent la réalisation d'un logiciel performant et validé de comportement dynamique des ensembles attelés avec prise en compte du ballottage de liquide, l'édition de recommandations sur l'utilisation des véhicules citernes, et la conception des dispositifs de cloisonnement.

ABSTRACT

Trucks, alone or with a semi trailer, have dynamic capabilities lower than sedan cars, for architecture reasons linked to their purpose.

For tanks, the movements of the liquid bulk interact in a complex way with the vehicle ones and can alter handling and safety.

A multi-disciplinary group of partners has been constituted with SERA-CD, SIREHNA, UTAC, INRETS-MA and the liquid bulk semi trailer manufacturers GENERAL TRAILERS and CRYOLOR to improve the understanding on these problems. In the PREDIT II framework, the Research and Technology French Minister sponsored this program (in progress).

The main products of this program are the achievement of an operational software package, validated for tractor-semi trailer combination with liquid bulk sloshing, recommendations about tank utilization and design of partitioning devices.

PREDIT SECURITE DES POIDS LOURDS A FRET LIQUIDE

SERA^{CD}

SIREHNA

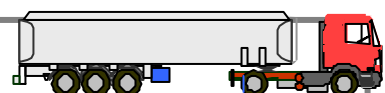


UTAC

INRETS

CRYOLOR

GT GENERAL TRAILERS
The Best Quality Leader in Transport Equipment



Sécurité des Poids Lourds avec ballottement de liquide

Gilles Schaefer	SERA-CD 10 D1 Av du Québec, BP 545, 91946 COURTABOEUF 1 CEDEX
Philippe Corrigan	SIREHNA 1 rue de la Noë, BP 42105, 44321 NANTES CEDEX 3
Dominique Lescail	UTAC Service Dynamique du véhicule, Autodrome, B.P 212 91311 MONTLHERY
Daniel Lechner	INRETS-MA Chemin de la Croix Blanche 13 300 SALON DE PROVENCE

1. POSITION DU PROBLEME

Les poids lourds (PL) en général, qu'ils soient porteurs ou semi-remorques, ont des possibilités dynamiques d'évolution notablement inférieures à celles des voitures de tourisme, principalement pour des raisons d'architecture.

Dans le cas des citernes transportant des liquides, les mouvements propres du fret liquide interagissent de façon complexe avec ceux du véhicule ; ils peuvent dégrader la tenue de route et sa prévisibilité par le conducteur, et donc diminuer la sécurité, notamment :

- ?? difficultés de contrôle, imprécisions de la trajectoire,
- ?? risque d'un violent à-coup en fin de freinage qui peut faire avancer le véhicule dans un deuxième temps après l'instant d'arrêt par effet retardateur.

Les interactions véhicule/liquide dépendent principalement du taux de remplissage des citernes, qui peut éventuellement varier au cours des tournées de livraison et rend donc le comportement peu prévisible par le conducteur. La torsion des châssis plateau de ces véhicules contribue également à une mauvaise sensations du conducteur, à la dégradation des performances et à la diminution de l'efficacité des éventuels moyens de corrections.

La simulation des Poids Lourds Semi-Remorque à Fret liquide et/ou Châssis Torsible est donc à la fois très utile et assez difficile.

2. LES ENJEUX

L'accidentologie Poids Lourds en France en 1999 [réf 3] : Alors que les 550 000 PL de plus de 3.5 tonnes ne représentent que 2 % du parc des véhicules et effectuent 5 % des kilomètres parcourus, ils sont impliqués dans 5.3 % des accidents corporels et font 12.9 % des tués. Ainsi 1032 des 8029 personnes tuées sur la route en France en 1999 l'ont été dans un accident impliquant un PL, soit un taux de gravité 2.4 fois supérieur à l'ensemble des accidents. A signaler que seules 104 de ces victimes étaient des usagers de PL. Parmi les 125 000 accidents corporels recensés, 6 600 impliquent au moins un PL, et cette répartition fait apparaître 1 185 véhicules avec remorque et 2 854 tracteurs routiers avec semi-remorque. Ces grandes tendances de l'accidentologie "poids lourds" font donc apparaître à la fois une fréquence d'implication plus forte et une gravité moyenne plus élevée. Au-delà des statistiques, concernant le problème du renversement des

citernes, et tout particulièrement celles transportant des matières dangereuses, c'est l'importante gravité potentielle de ces accidents qui justifie pleinement la réalisation de ce programme.

3. LE GROUPE DE RECHERCHE

Un groupement de partenaires pluridisciplinaires constitué de SERA-CD, SIREHNA, l'UTAC, l'INRETS MA et les constructeurs de semi-remorques et citernes GENERAL TRAILERS FRANCE et CRYOLOR s'est créé pour faire progresser les connaissances sur le problème de la simulation des ensembles Poids Lourds Tracteur routier + semi-remorque à fret liquide et châssis torsible. Le Ministère de la Recherche et de la Technologie a contribué au financement de ce programme, qui est en cours, dans le cadre de Predit II. Les principales actions de ce programme peuvent être résumées de la façon suivante :

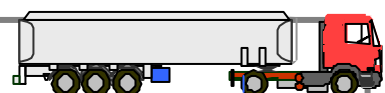
SERA CD, qui assure la maîtrise d'œuvre du programme, a complété son logiciel de comportement dynamique de véhicules industriels PROSPER, notamment par un module de calcul de torsion de châssis, et intégré les développements concernant le fret liquide. Il met également au point les paramétrages des véhicules modélisés.

Ce modèle a déjà fait l'objet de nombreux travaux de validation dans sa version véhicule de tourisme CALLAS [1] et [2].

SIREHNA, spécialiste de Mécanique des Fluides a développé un modèle mécanique de complexité réduite fournissant les efforts statiques et dynamiques exercés par le liquide en mouvement sur la citerne. Ce modèle a été identifié à partir de résultats expérimentaux issus de plusieurs séries d'essais sur maquettes complétés par des simulations numériques à l'aide d'un code de calcul de dynamique des fluides. Il a ensuite été implémenté dans un module logiciel, fourni pour intégration dans PROSPER.

L'UTAC et l'INRETS ont instrumenté un tracteur, une semi-remorque citerne et une savoyarde à 3 essieux, puis réalisé des essais d'influence du fret liquide sur la dynamique d'un ensemble attelé. Ces essais concernent aussi bien des manœuvres stabilisées que transitoires. Ils constituent le matériau de base pour effectuer la validation du logiciel complet, qui sera ensuite appliqué à des accidents réels.

PREDIT SECURITE DES POIDS LOURDS A FRET LIQUIDE



4. ETAT DES CONNAISSANCES

4.1. Comportement des semi-remorques à fret fixe

La fréquence et la gravité élevée d'accidents des Poids Lourds semi-remorques [3] et la complexité des phénomènes en jeu a suscité de nombreuses études. Rappelons ici brièvement les principaux résultats [4].

L'architecture "transversale" de ce type de véhicule est assez propice au renversement par son rapport hauteur du centre de gravité / demi-voie. Le calcul le plus simpliste donne un chiffre d'accélération critique de renversement de l'ordre de 5 à 6 m/s^2 déjà inférieur à l'adhérence (de l'ordre de 7 m/s^2) : sollicité fortement sur sol adhérent, un semi-remorque est susceptible de se renverser avant de glisser.

En fait, ce chiffre déjà assez bas est optimiste : la résistance au renversement réelle est sensiblement plus basse du fait de l'intervention de nombreux facteurs secondaires malheureusement tous défavorables :

- les suspensions à essieux rigides et parfois à roues jumelées (qui réduisent la voie moyenne) concèdent un roulis qui déportent légèrement le centre de gravité vers l'extérieur, les ressorts à lames ont un frottement solide qui contrôle mal l'adhérence des roues, les amortisseurs sont souvent sous dimensionnés,
- la mauvaise répartition de la tenue en roulis du travail entre les essieux, mise en évidence par le soulèvement de la roue intérieure en général beaucoup plus tôt sur les trains les plus arrière du convoi, est mal contrée par la faible résistance à la torsion du châssis du tracteur en forme d'échelle de faible hauteur,
- le couplage existant entre l'instabilité directionnelle de « survirage » et le renversement accélère ce dernier,
- le dépassement transitoire d'équilibre qui peut amorcer le renversement plus tôt qu'en stabilisé,
- la faible information du conducteur du niveau de sollicitation, bien avant la limite d'adhérence, avec peu de " retour " en couple au volant, peu de roulis et par l'accélération latérale du fait du seuil de perception.

Ces facteurs secondaires abaissent l'accélération critique de renversement à environ 5 m/s^2 .

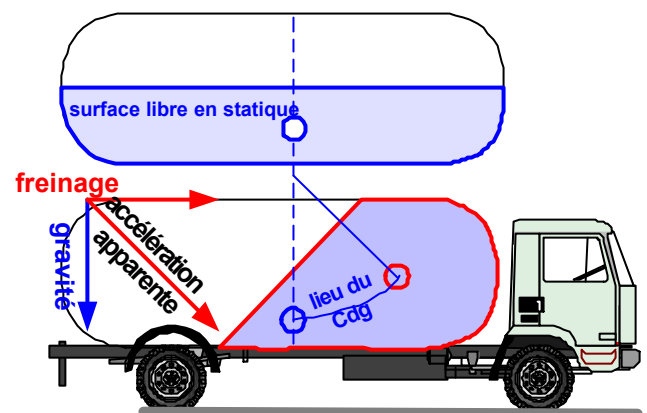
4.2. Influence du fret mobile

4.2.1. Fret solide pendulaire

Le fret solide pendulaire, par exemple des quartiers de viande, se déplace en fonction des accélérations de son support, ce qui transmet au véhicule des réactions parasites qui dégradent les performances du véhicule.

Le fret oscillant est un pendule de longueur donnée fixe (modèle barre et non fil), d'une masse donnée, doté de deux degrés de liberté longitudinal et latéral. Il réagit par sa dynamique propre de système masse-ressort du deuxième ordre au champ d'accélération apparente (gravité + Accélération Latérale + Accélération Longitudinale). En transitoire, le comportement de balancier peu amorti introduit un dépassement transitoire d'équilibre, et un temps de réponse (délai entre la sollicitation et son effet), donc une incertitude dans le comportement du véhicule.

Les efforts ne sont transmis que radialement à la trajectoire d'oscillation, par l'intermédiaire de la barre et du point d'ancrage. Les mouvements engendrent des couples d'amortissement au niveau de la liaison. Les phénomènes longitudinaux et transversaux sont analogues et découplés : le solide se déplace sur une sphère autour de son centre. Sous accélération verticale, si l'un des deux angles initiaux



de position du pendule n'est pas nul, on va également avoir un mouvement de rotation du fret.

4.2.2. Influence qualitative du fret liquide

Au freinage, le déplacement longitudinal du centre de gravité vers l'avant (fig.1)

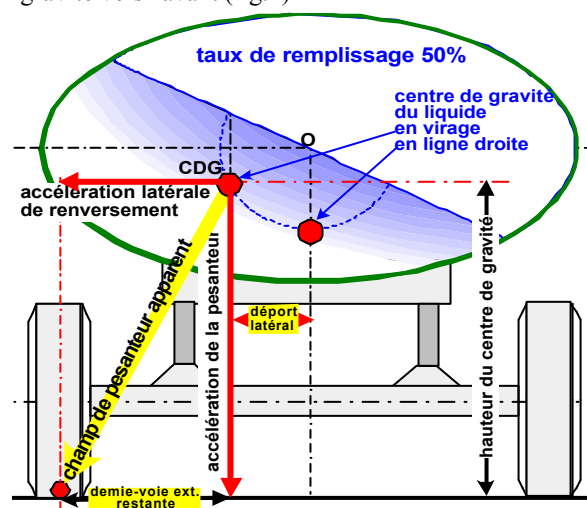
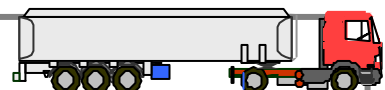


Figure 1 : Schéma du comportement longitudinal



est associé à un temps de réponse et un violent à-coup en fin de freinage. La montée du centre de gravité est faible.

En virage, le centre de gravité du liquide se déplace à la fois vers l'extérieur (ce qui réduit la demi-voie extérieure restante) et aussi vers le haut (fig. 2). Ces déplacements sont déterminés par un calcul de surface, en fonction du taux de remplissage de la citerne.

Figure 2 : Schéma du comportement latéral

Le liquide ne participe pas à l'inertie de roulis, sa surface libre s'incline en restant perpendiculaire au champ de pesanteur apparent. Ces effets sont variables avec le taux de remplissage des cuves et le cloisonnement : la fréquence du ballant est voisine de celle du pendule simple de longueur *centre de gravité du liquide-centre de la citerne*.

Le taux de remplissage le plus critique résulte de la pondération entre les différents facteurs :

- les taux intermédiaires sont mécaniquement défavorables : entièrement plein, il n'y a pas de ballant tandis qu'entièrement vide, le ballant est important, mais avec une masse nulle.
- le déport transversal maximal du centre de gravité est obtenu pour un taux de remplissage de 50% (fig.3).
- la hauteur la plus défavorable est obtenue à plein remplissage.
- La stabilité du véhicule se dégrade avec la charge du fait du recul du centrage des masses.

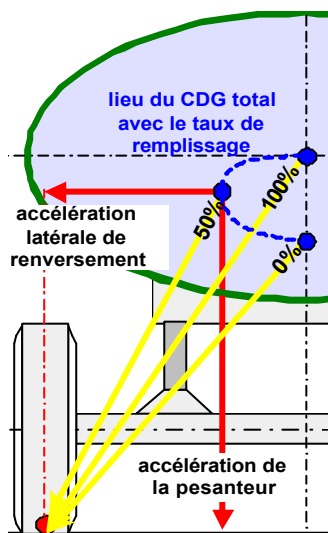


Figure 3 : Influence du taux de remplissage

Le taux de remplissage le plus défavorable est d'environ 65%, la limite de renversement est alors entre 4.5 et 5 m/s².

5. DEVELOPPEMENTS EFFECTUES

5.1. Torsion de châssis

Les poids lourds ont des suspensions rigides en vertical à cause des variations de charges très importantes et des châssis peu rigides en torsion du fait des choix d'architecture, le confort du conducteur étant assuré par la suspension indépendante de la cabine de pilotage.

En virage, le véhicule se trouve soumis à une distribution longitudinale des couples de roulis générés par le champ d'accélération latérale en fonction de la distribution

longitudinale des masses, de leurs hauteurs et de leurs fixations qui les transmettent au châssis.

Ces couples actifs sont équilibrés par les couples de rappel des suspensions provenant des transferts de charge latéraux au droit des essieux venant du sol. Cette distribution longitudinale des couples antagonistes crée une déformée de torsion du châssis flexible. L'hyperstaticité fait que la contribution de chaque train à la tenue en roulis dépend de sa raideur efficace, obtenue par la mise en série des trois flexibilités de roulis : pneu, suspension, châssis.

Restituer le comportement dynamique passe par une bonne connaissance des charges verticales par pneumatique, donc la répartition correcte des transferts de charge, donc la déformée de torsion. Pour éviter le calcul par éléments finis dont la complexité empêche l'intégration dans un logiciel de synthèse, on considère un modèle de complexité réduite, par quelques tronçons de raideur constante.



Figure 4 : Photos des essais réels réalisés

5.2. Modélisation du fret liquide

Les mouvements de fret liquide peuvent a priori être calculés avec des modèles de dynamique des fluides, comme par exemple les codes de calcul développés pour simuler les ballotements de liquide ("sloshing") dans les cuves de navires (pétroliers, méthaniers) soumis à l'action de la houle [5]. Ces modèles sont extrêmement lourds d'utilisation, même en 2D, et ne peuvent répondre à la rapidité de calcul de Prosper.

Il y a donc lieu de rechercher des modèles de complexité réduite, susceptibles d'être intégrés dans les programmes de simulation de comportement. Cette démarche est largement partagée [6] à [9].

PREDIT SECURITE DES POIDS LOURDS A FRET LIQUIDE

SERA

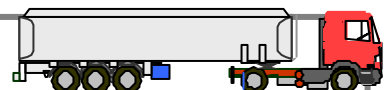
SIREHNA

UTAC

INRETS

CRYOLOR

GT GENERAL TRAILERS



The European Leader in Transport Solutions

Dans le cadre de ce projet, SIREHNA a développé un module de simulation des efforts induits par le liquide en mouvement sur la citerne, basé sur deux modèles mécaniques transversal et longitudinal équivalents. Les modèles ont été partiellement déterminés, puis validés expérimentalement à partir de plusieurs campagnes d'essais sur maquettes.

5.2.1. Essais sur maquettes

Deux campagnes d'essais ont été réalisées. Une première campagne d'essais dits « transversaux » a été effectuée sur une maquette bi-dimensionnelle circulaire afin d'étudier de manière approfondie les efforts hydrodynamiques induits par des sollicitations transversales de la citerne. Une deuxième campagne d'essais dits « longitudinaux » a été réalisée sur une maquette tri-dimensionnelle de citerne tractée sur une remorque, afin d'étudier les efforts hydrodynamiques résultant de sollicitations longitudinales de la citerne et d'obtenir des informations sur l'efficacité de certains types de brise-flots et sur d'éventuels couplages entre les directions longitudinale et transversale.

Les essais transversaux ont été réalisés sur une maquette circulaire (diamètre 0.6 m), montée sur un générateur de mouvements mono-directionnels (cf. Figure 5) et soumise à différents mouvements de translation harmoniques et transitoires (de type chicane par exemple). Les régimes d'oscillation forcée et libre (après une excitation transitoire) de la surface libre ont été étudiés pour des niveaux de remplissage entre 0.2 et 0.8 fois le diamètre de la maquette.

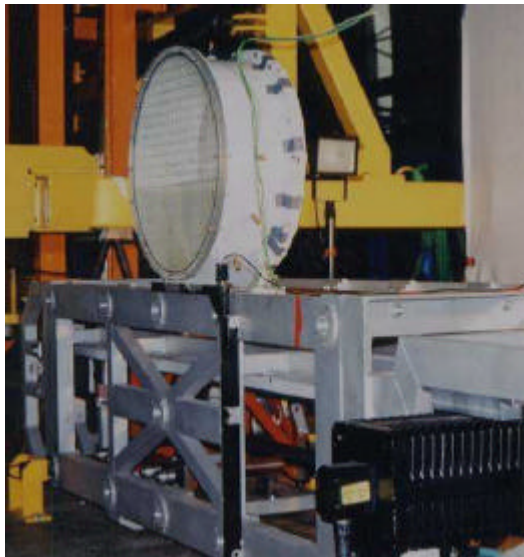


Fig. 5 : Maquette transversale sur le générateur de mouvements

Les efforts (forces horizontale, verticale et moment dans le plan vertical) exercés par la cuve sur son support, l'accélération et le déplacement ont été mesurés, puis traités pour séparer les composantes inertielles (liées aux structures en mouvement) des composantes hydrodynamiques. La déformation de la surface libre a été filmée (cf. Figure 6). 77 configurations ont été testées.

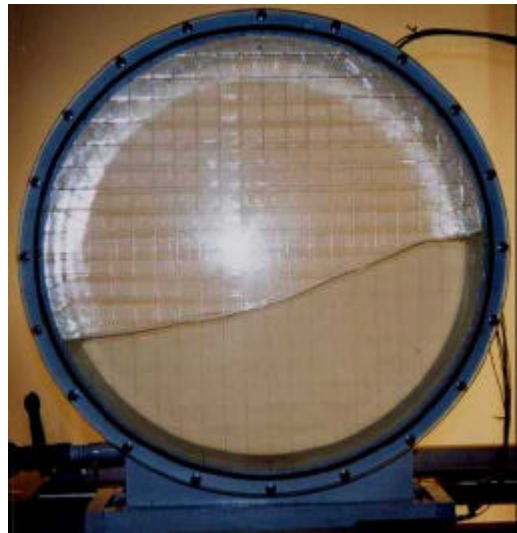


Figure 6 : Essais transversaux – oscillations de la surface libre.

Les essais longitudinaux sur une maquette cylindrique montée sur une remorque, tractée par une voiture instrumentée (mise à disposition par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes) ont été effectués sur leur piste de Bouguenais.

Une maquette modulaire a été conçue afin d'étudier deux configurations géométriques : une citerne longue de 2 m, diamètre 0.5 m (cf. Figure 7) représentative à l'échelle 1/4 d'une citerne CRYOLOR, et une citerne courte (cf. Figure 8), tronçon de 0.35 m de la citerne longue, représentative d'un petit compartiment d'une cuve GENERAL TRAILER.



Figure 7 : Essais longitudinaux - configuration citerne longue



Figure 8 : Essais longitudinaux - configuration citerne courte.

Les essais ont été réalisés sans et avec brise-flots. Deux types de brise-flots ont été considérés : couronne et plaque. Le nombre et la disposition des brise-flots dans la cuve ont également été modifiés.

Des remplissages compris entre 0.3 et 0.7 fois le diamètre de la citerne ont été étudiés. Deux types de mouvements ont été considérés : freinage longitudinal pur avec décélération constante comprise entre -4 et -2 m/s^2 et chicane de type OTAN à 15 et 30 km/h. Un total de 69 configurations d'essais ont été testées.

Les mesures réalisées sont les suivantes :

- efforts de liaison citerne-remorque (3 composantes longitudinales en freinage, addition de 2 composantes transversales en chicane),
- accélérations selon les 3 axes en un point de la citerne,
- roulis, tangage et vitesse de lacet de la citerne.

Les mouvements de fluide ont été filmés par deux caméras à travers des hublots transparents situés à l'avant (cf. figure 9) et sur le dessus de la citerne au niveau d'un brise-flot.

Les mesures d'efforts ont été traitées pour isoler les composantes inertielles des composantes hydrodynamiques.



Fig.9 Essais longitudinaux - intérieur de la cuve

Ces deux campagnes d'essais constituent une base de données expérimentales très fournie qui a été utilisée par la suite pour valider les modèles de ballotement.

5.2.2. Module de simulation

Le module de simulation de comportement fluide du fret liquide développé par SIREHNA est un module de calcul mécanique des composantes d'efforts hydrodynamiques longitudinale et transversale exercées par le fluide en mouvement sur la citerne. Il est construit sur la base de deux modèles mécaniques : un modèle longitudinal destiné à évaluer les efforts dans le plan longitudinal de la citerne et un modèle transversal pour les efforts transverses.

Chacun de ces modèles est construit sur la dynamique d'un point matériel pesant, assujéti à se déplacer et osciller sur une trajectoire donnée liée à la citerne. Pour le modèle

longitudinal, deux cas différents correspondants à des ratios relatifs à la géométrie de la citerne ont dû être définis pour caractériser au mieux les résultats d'essais à l'aide d'un nombre restreint de paramètres : un modèle « long » pour les citernes de longueur supérieure au diamètre, et un modèle « court » dans le cas contraire.

Les paramètres de ces modèles mécaniques sont pour partie définis à partir des dimensions de la citerne et de la masse de liquide embarquée (et des fréquences propres de ballotement longitudinal et transversal associées). Une étude d'identification à partir des résultats d'essais sur maquettes, a permis de déterminer les paramètres restants et de valider les modèles mécaniques choisis.

Chaque modèle résout les équations de mouvement plan d'un système mécanique à un degré de liberté. Bien que ces mouvements aient été choisis indépendants, un couplage a été introduit permettant de prendre en compte de manière simplifiée l'interaction réelle entre ces deux mouvements.

Dans sa version actuelle, le module de simulation est limité au cas des citernes circulaires, avec ou sans brise-flots, ces derniers pouvant être du type couronne ou plaque. Les modèles mécaniques peuvent néanmoins être facilement adaptés à d'autres formes de citernes, sous réserve d'une mise à jour des paramètres de définition par une technique d'identification réalisée à la suite d'essais spécifiques.

Le module peut fonctionner selon différents modes :

- le mode quasi-statique correspond à la recherche de l'équilibre du véhicule, de la citerne et du fret liquide.
- Le mode dynamique calcule en fonction du temps la réponse dynamique du fret liquide aux excitations extérieures imposées par les positions, vitesses et accélérations de la citerne.

Le module peut fonctionner selon deux architectures :

- L'architecture externe permet une utilisation autonome, sans solveur extérieur : le module résout en interne un système d'équations différentielles (SED) lui permettant de calculer à l'instant t les efforts exercés par le fret liquide sur la citerne, avec une optimisation du pas de temps de calcul.
- L'architecture interne permet d'insérer le module dans un simulateur en supprimant les problèmes de synchronisation des pas de temps. Le noyau du simulateur PROSPER résout un unique SED comprenant, outre les degrés de liberté propres au véhicule, ceux relatifs aux mouvements du fret liquide.

Les caractéristiques suivantes méritent d'être soulignées :

- l'amplitude des mouvements de la surface libre est limitée par un terme d'amortissement non-linéaire de manière à représenter le déferlement de la surface libre,
- l'amortissement de frottement sur les parois de la citerne et celui généré par les brise-flots (pour le modèle longitudinal uniquement) sont pris en compte,

- la première fréquence propre longitudinale et transversale est introduite à partir de formules hydrodynamiques théoriques et expérimentales,
- en mode de fonctionnement quasi-statique, les efforts sont calculés de manière exacte.

Des exemples de comparaisons entre efforts calculés par le module et mesurés lors d'essais longitudinaux de freinage sur la cuve longue sans brise-flot sont présentés sur les fig. 10 (force longitudinale F_x) et 11 (moment de tangage M_y).

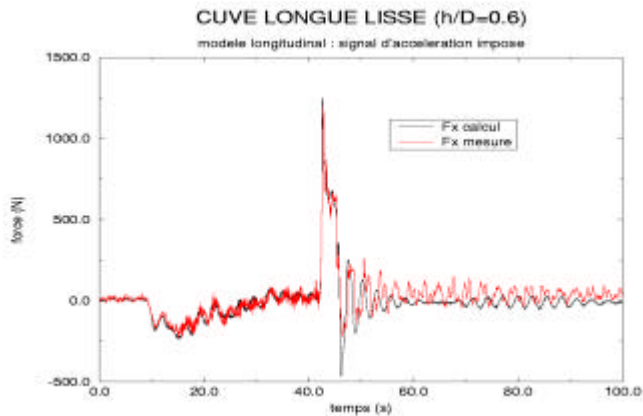


Figure 10 : Force horizontale calculée et mesurée – essai longitudinal de freinage.

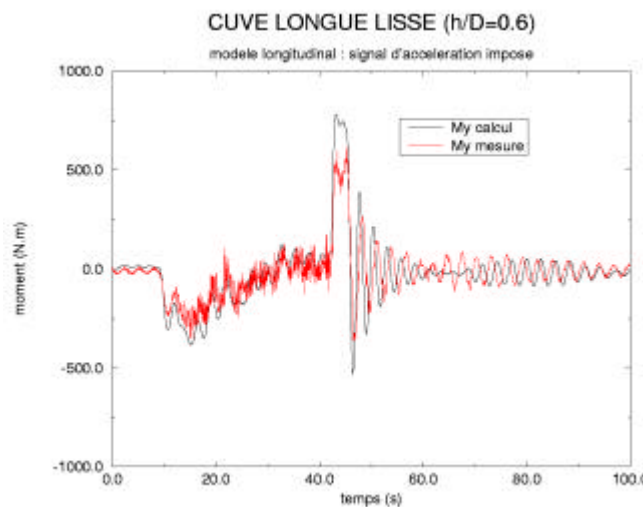


Figure 11 : Moment de tangage calculé et mesuré – essai longitudinal de freinage.

Ces comparaisons montrent une bonne représentation par le module de simulation, des efforts exercés sur la citerne pendant la phase de freinage ainsi que lors des oscillations libres du liquide après arrêt du véhicule.

5.3. Essais routiers en vraie grandeur

5.3.1. Description

Ces essais ont été réalisés par l'UTAC avec le concours de l'INRETS sur circuits fermés. Deux ensembles routiers ont été instrumentés : un tracteur 4x2 (véhicule lourd le plus répandu dans le parc français) associé respectivement à une savoyarde tridem (fret fixe) et à une citerne tridem (fret liquide).

55 voies d'acquisition permettent d'accéder aux variables de la dynamique longitudinale, transversale et verticale.

Les manœuvres effectuées sont : freinages en ligne droite et en courbe, entrée, suivi et sortie de rond-point, déboîtement simple et double (chicane), cercles et enfin mouvement pseudo sinusoïdal au volant.



Fig. 12 : Soulèvement des roues intérieures en virage stabilisé

Selon la configuration d'essais, la vitesse de roulage n'a pas dépassé 60 km/h pour l'ensemble avec citerne et 80 km/h pour l'ensemble avec la savoyarde.

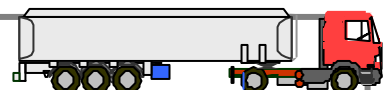
Plusieurs configurations de remplissage avec de l'eau ont été réalisées avec la citerne. Elles correspondaient respectivement à 0 %, 50 %, 65 % de remplissage pour la totalité des sept compartiments que comportait la citerne puis à 100 % pour cinq des sept compartiments. Dans le cas de la savoyarde, le chargement a été réparti sur la totalité du plateau et correspondait à la charge maximale.

Au total, plus de 200 essais ont été réalisés au travers de cette campagne apportant ainsi une contribution essentielle à la validation des modèles proposés.

5.3.2. Résultats expérimentaux et analyse

La figure 13 illustre le comportement de l'ensemble tracteur + citerne en régime établi pour différents taux de remplissage, sur les 20 secondes les plus sollicitantes des essais de cercle stabilisé à droite avec un rayon intérieur de 15 m.

Pour les 2 premières configurations notées 100 % et 65 %, l'attelage se situe au chargement maximal autorisé de 38 T, mais dans le premier cas, seuls les 5 compartiments centraux de la citerne sont remplis, il n'y a donc pas de ballant liquide, alors que dans le cas 65 %, la charge est uniformément répartie sur les 7 compartiments. La



configuration notée 50 % correspond aux 7 compartiments à moitié pleins ce qui conduit à un poids total de 31 T, alors que le poids du convoi à vide n'est que de 14 T.

Le tracé des vitesses montre que seule la configuration à vide a permis à l'essayeur d'atteindre en limite une vitesse de 35 km/h, les autres configurations se situant à 31 km/h. Les configurations à vide et 100 % permettent des amplitudes au volant supérieures, traduisant sans doute la confiance de l'essayeur.

Les points les plus intéressants concernent les conséquences de ces actions en terme d'accélération transversale et de roulis. La sollicitation maximale est atteinte pour la configuration à vide, elle est située entre 5 et 5.5 m/s² et associée à un angle de roulis de la citerne très faible inférieur à 1°. On trouve ensuite la configuration 100 % entre 4.5 et 5 m/s² mais avec cette fois un roulis de 4°.

Pour le remplissage de 65 %, l'accélération transversale oscille davantage de 4 à 4.8 m/s²; les pointes d'accélération précèdent de brutales pointes de roulis (entre 5 et 8 s et après 15 s) qui correspondent à des amorces de renversement, comme celle visible sur la figure 12.

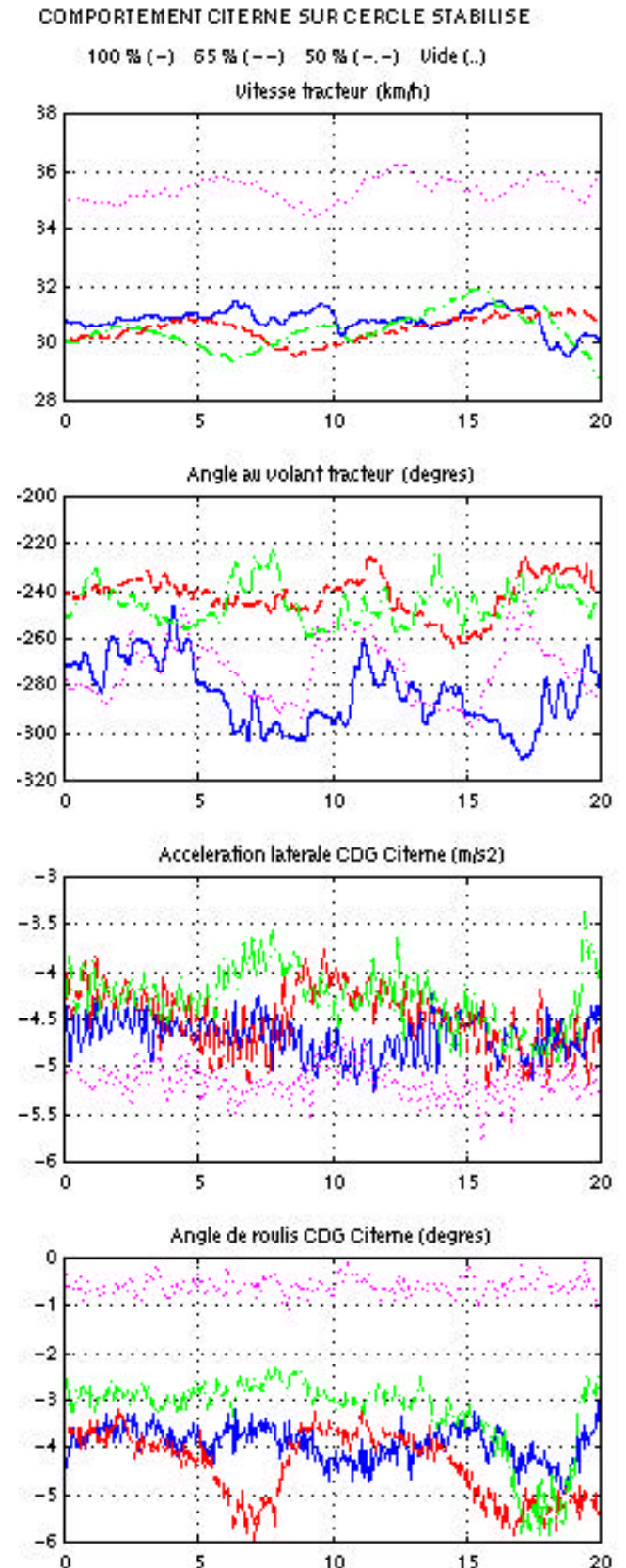


Figure 13 : Comportement du semi-remorque en régime établi pour différents remplissages

Pour le taux de 50 %, l'accélération varie de 3.8 à 4.8 m/s² et on note également que la valeur maximale, à partir de 17 s, est associée à une brutale pointe de roulis, traduisant l'imminence du renversement.

Ces comparaisons confirment que le fret liquide a une importance notable sur le comportement et que les situations les plus critiques correspondent aux taux de remplissage entre 50 et 80 %.

6. LA VALIDATION

Le logiciel complet ainsi obtenu est en cours de validation intensive sur l'intégralité des 200 tests enregistrés.

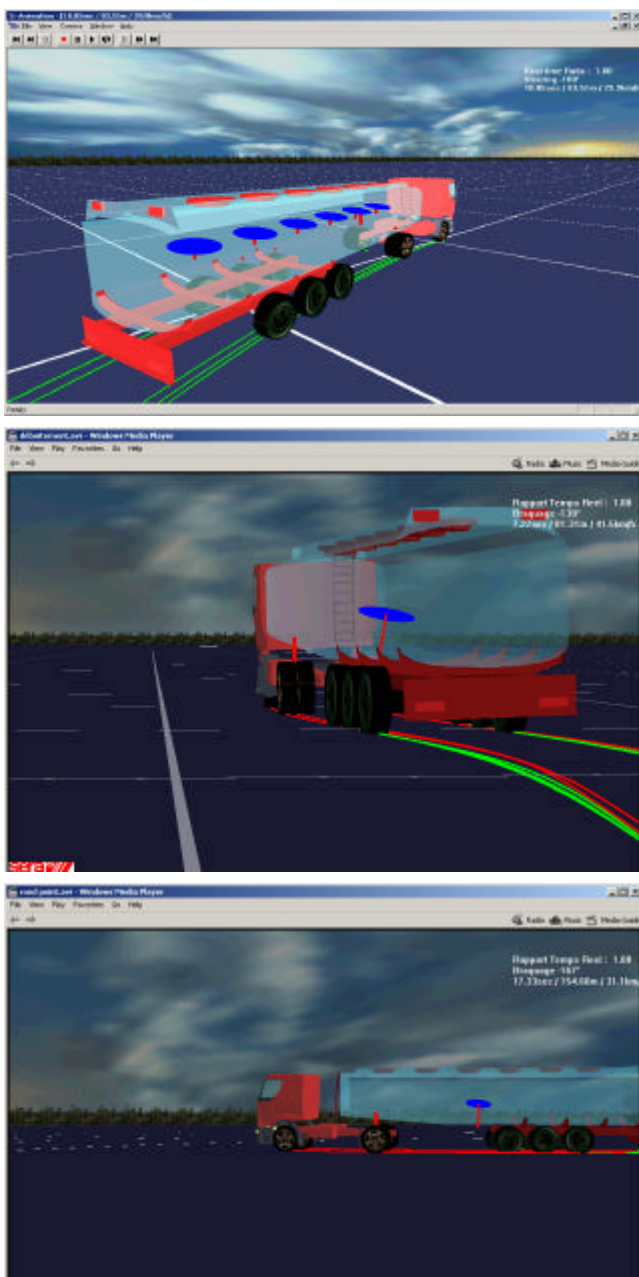


Figure 14 : Images de synthèse provenant de la simulation sous PROSPER en rejeu d'un essai réel.

7. LES RETOMBEES

7.1. Application à des accidents réels

Des cas d'accidents impliquant ce type de véhicules seront recherchés. Des simulations de comportement dynamique viendront enrichir leur analyse.

Une analyse paramétrique de performances en fonction des caractéristiques de cloisonnement et de remplissage sera effectuée. Des préconisations de cloisonnement pour les citernes seront fournies.

Les résultats de l'étape précédente seront exploités pour donner des règles d'utilisation des véhicules citernes, prenant en compte la forme de la citerne et son cloisonnement, la nature du terrain rencontré, le taux de remplissage...

7.2. Aspects réglementaires

Sur le plan européen, un projet de règlement relatif à l'homologation des véhicules citernes est en cours de validation. Le renversement y est défini pour un véhicule chargé à sa valeur maximale, lors d'un virage à rayon constant parcouru à vitesse constante, comme le point où toutes les roues d'un côté quittent le sol.

Deux critères de stabilité sont proposés dans ?10?: le renversement ne doit pas se produire :

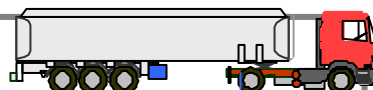
- ?? pour un angle de dévers de 23° en essai à la plateforme basculante.
- ?? pour une accélération latérale stabilisée de 4 m/s² en simulation.

Ces critères constituent une première approche, et ce programme permettra de les améliorer en prenant en compte les phénomènes nettement pénalisants liés au chargement partiel et aux mouvements transitoires.

8. REMERCIEMENTS

Ce programme de recherche est subventionné par le Ministère chargé de la Recherche dans le cadre du PREDIT.

Nous remercions également l'APTH (Association pour la prévention dans les transports des hydrocarbures) pour la mise à disposition de ses pistes au Creusot, ainsi que le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes pour la mise à disposition d'une piste et d'un véhicule tracteur pour les essais sur maquette.



9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] *D. Lechner, Y. Delanne, G. Schaefer, V. Schmitt.*
“Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS” SIA 970202. Congrès SIA Lyon, Avril 1997. Repris dans Ingénieurs de l'Automobile N°713, Mai 1997.
- [2] *G. Schaefer, D. Lechner, Y. Delanne, V. Schmitt.*
“CALLAS : a decisive step toward validity for 3D vehicle dynamics”. ISATA Paper 97SAF005. 30th ISATA Conference, Florence June 1997.
- [3] *L'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière* **“La sécurité des poids-lourds en 1999”**.
- [4] *Cahier d'études ONSER bulletin n°47* **“Sécurité et conception des poids-lourds : étude des accidents, conception, renversement”**, mars 1979.
- [5] *Philippe CORRIGNAN* **“Analyse physique des phénomènes associés au ballonnement de liquide dans des réservoirs”**, thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur de Nantes, Novembre 1994.
- [6] *Abramson* **“The dynamic behavior of liquids in moving containers”**, NASA report SP-106, 1966.
- [7] *Dodge* **“Analytical Representation of lateral sloshing by equivalent Mechanical Models”** NASA SP-106, 1966.
- [8] *Nordström* **“Heavy Duty Vehicle Dynamics Related to Braking, Steering and Tyres”**, Swedish Research and Proposals by VTI "SAE 89 2502, 1989.
- [9] *R. Ranganathan* **“Development of a mechanical analogy model to predict the dynamic behavior of liquids in partially filled Vehicles”** SAE 94 2307, 1994.
- [10] *Conseil économique et social des Nations Unies* **“Réglementation n° 111 E/ECE/TRANS/505”** Rev.2/Add.110.

PREDIT SECURITE DES POIDS LOURDS A FRET LIQUIDE

