

TRANSPORT SUR ROUTE : COMMENT LES CONDUCTEURS INTÈGRENT-ILS LE PHÉNOMÈNE DE « BALLANT » ?

- Camion-citerne
- Composé liquide
- Renversement
- Mesure de prévention

► Liên WIOLAND,
Jean-François SCHOULLER, Amanda ROSSI,
INRS, département Homme au travail

ROAD TRANSPORT: HOW DO DRIVERS INTEGRATE THE "SURGE" PHENOMENON?

Transport of hazardous materials (THM) in liquid form is most frequently undertaken in tanker lorries. The main risk of this transport mode is lateral overturning due to sideways oscillation movements of the liquid in the tank (transverse surge). Lengthwise liquid movements, producing a succession of horizontal jerks transmitted to the driver's cab (longitudinal surge), can lead to driver back injuries. A study has been conducted at a liquid chemical transport company to understand the way in which drivers view the surge phenomenon and its related dangers. One proposed avenue for action is to contribute to training drivers in surge anticipation and identification methods.

- Tanker lorry
- Liquid compound
- Overturning
- Prevention measure

Le transport des matières dangereuses (TMD), sous forme liquide, s'effectue essentiellement en camions-citernes. Le risque principal associé est le renversement dû aux mouvements d'oscillation latéraux du liquide dans la cuve. Lorsque le mouvement du liquide se fait longitudinalement, provoquant une succession d'à-coups horizontaux transmis à la cabine du conducteur, il peut être à l'origine de pathologies dorsales. Une étude a été menée dans une entreprise de transport de produits chimiques afin de comprendre la façon dont les conducteurs se représentent le phénomène de ballant et les risques associés. Une des pistes d'action proposée est de contribuer à la formation des conducteurs aux techniques d'anticipation et d'identification du ballant.

LE TRANSPORT DE MATIÈRES DANGEREUSES

GÉNÉRALITÉS ET RISQUES

Une matière dangereuse est une substance qui, par ses propriétés physiques ou chimiques, ou par la nature des réactions qu'elle est susceptible de mettre en œuvre, peut présenter un risque pour l'homme, l'environnement ou les biens. Ce risque peut être de nature différente selon la matière en question, par exemple risque d'explosion, d'incendie, d'intoxication, ou encore de brûlure. Environ 140 millions de tonnes de matières dangereuses circulent chaque année par la France [1]. Ce transport concerne à la fois les produits hautement toxiques, explosifs ou polluants et tous les produits d'usage courant, comme les carburants, le gaz, les engrais solides ou liquides (www.prim.net).

Les matières dangereuses sont principalement acheminées par la route (environ 71 %), annuellement, elles représentent 5 % du transport routier (en milliards de tonnes-km). Ce transport est à l'origine de 100 à 200 accidents en moyenne chaque année en France, ce qui représente environ 0,8 % de tous les accidents de la circulation et 1,5 % des accidents de poids lourds, leur gravité dépasse celle des accidents de la circulation en général (www.equipement.gouv).

Aux risques d'accidents liés au transport de matières dangereuses (accidents au moment du chargement ou du déchargement du produit ou sur la route) s'ajoutent les effets du produit transporté sur l'environnement, les usagers de la route, les riverains, etc. L'accident de TMD se décompose en un « effet primaire immédiat » : incendie, explosion, et « des effets secondaires » : propagation aérienne de vapeurs toxi-

la paroi de la citerne. Ainsi, lorsque le camion citerne aborde un virage, le liquide dans la citerne se déporte sur un côté, puis sur l'autre, entraînant un transfert de charge.

Du point de vue de la modélisation physique, la force se décompose en une composante verticale et une composante horizontale. Le risque de basculement du camion citerne est fonction de l'intensité de la composante horizontale et de la hauteur de centre de gravité par rapport au sol. Plus le centre de gravité est élevé, plus la composante horizontale doit être faible pour éviter le renversement. Cette situation est analogue au phénomène de bras de levier.

La *Figure 1* illustre ce phénomène :

■ le véhicule de gauche ne présente aucun risque de renversement. Le système est mécaniquement stable ;

■ le véhicule de droite présente un risque de renversement puisque l'intersection de la force et du plan horizontal est extérieure à la surface de contact du véhicule (surface intérieure délimitée par les points de contact des roues avec le sol), le système devient mécaniquement instable.

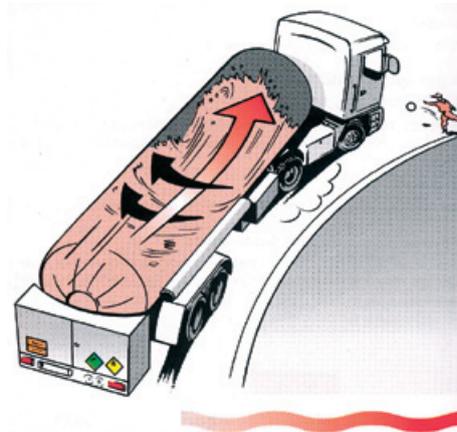
Ballant et exposition aux vibrations

Une étude réalisée conjointement par l'INRS et le BGIA² a dressé un bilan des contraintes vibratoires au poste de conduite des camions. Il a ainsi été démontré que les conducteurs de gros véhicules industriels routiers sont exposés à des vibrations de basses fréquences dues aux différents organes moteurs du véhicule et à l'état de la route. Or, des enquêtes épidémiologiques portant sur cette population de conducteurs indiquent que l'exposition de longue durée à ce type de vibrations transmises à l'ensemble du corps est un facteur favorisant l'apparition de pathologies dorsales. Les lombalgies, les troubles dégénératifs précoces de la colonne vertébrale, les hernies discales (pathologies indemnisées au titre du tableau des maladies professionnelles n°97) constituent les symptômes le plus souvent rapportés [7].

Pour les véhicules attelés à une citerne remplie partiellement d'un liquide situé dans le compartiment central s'ajoutent des vibrations supplémentaires selon l'axe avant-arrière, c'est à dire des vibrations de basses fréquences

FIGURE 2

Illustration des deux types de ballant (longitudinal et transversal)
Illustration of 2 types of surge (longitudinal and transverse)



➔ Ballant longitudinal (vers l'avant) induit par le freinage
➔ Ballant transversal (vers l'extérieur du virage) induit par le virage

(entre 2 et 4 hertz) auxquelles l'individu assis est très sensible. Elles sont perçues par le conducteur, essentiellement au niveau du dossier, comme une succession d'à-coups provoqués par les mouvements relatifs du tronc par rapport au support : le thorax reculant lorsque le dossier avance [8].

Conditions d'apparition du ballant

Freinage/accélération

Lors du freinage et de l'accélération du camion-citerne, la direction du ballant est longitudinale : les mouvements du liquide s'effectuent d'avant en arrière. En situation de freinage, les mouvements se traduisent par un brusque déport du liquide vers l'avant de la citerne qui s'accompagne d'un effort horizontal exercé sur cette citerne et d'une légère montée du centre de gravité du liquide. Ensuite, le liquide continue à osciller à sa fréquence propre, par une succession d'à-coups horizontaux.

En cas de freinage d'urgence, le ballant du liquide entraîne, en plus du déplacement du centre de gravité de ce liquide, un délestage de l'essieu arrière du véhicule [6].

Lors de l'accélération, le même phénomène est observé, mais de façon inverse, c'est-à-dire que le liquide se déplace d'abord vers l'arrière, puis revient vers l'avant.

Virages

Lors de la prise de virage, le mouvement du liquide se traduit par un ballant latéral qui tend à imprimer au véhicule un mouvement oscillatoire de gauche à droite ou de droite à gauche selon le sens du virage. En virage, la force principale qui s'exerce est la force centrifuge³ qui entraîne un déplacement du centre de gravité du liquide vers l'extérieur du virage, mais également vers le haut. Ces déplacements sont déterminés par un calcul de surface, en fonction du taux de remplissage de la citerne [6].

Combinaison virage/freinage

Les coups de frein en virage ou la prise de virages alternés sont autant de facteurs aggravants en terme de ballant car, en plus de la force centrifuge (vers l'extérieur du virage), le centre de gravité du liquide se déplace. De ce fait, la combinaison d'un freinage et d'un virage peut provoquer des mouvements brutaux du liquide par addition du ballant longitudinal et transversal (cf. *Figure 2*), mouvements assez puissants pour entraîner le renversement du véhicule, même à faible vitesse [9, 10, 11].

² BGIA : Berufsgenossenschaftliches institut für arbeitssicherheit, Allemagne.

³ La force centrifuge est fonction du carré de la vitesse, de la masse du véhicule et du rayon de courbure.

Vitesse

La vitesse constitue également un facteur aggravant du ballant, du fait que les mouvements du liquide sont proportionnels à la vitesse et à l'accélération du véhicule : plus celles-ci sont élevées plus les mouvements du liquide sont brutaux.

Taux de remplissage de la citerne

Le taux de remplissage des citernes est susceptible de varier au cours des tournées de livraison et peut contribuer à rendre le comportement de son véhicule moins prévisible au conducteur. Il apparaît que les taux de remplissage intermédiaires sont mécaniquement défavorables, le taux de remplissage le plus défavorable s'établissant autour de 65 % environ [6].

Limiter le ballant : recommandations et réglementation

Un certain nombre de recommandations existent pour réduire les risques liés au ballant :

- il est conseillé aux conducteurs de réduire leur vitesse, notamment dans les ronds points et les virages, d'éviter les freinages, les accélérations brusques et les coups de volant brutaux (pour prévenir les coups de butoir provoqués par les mouvements du liquide vers l'avant) ;

- les mouvements relatifs du tronc par rapport au siège peuvent être évités en calant la suspension du siège sur une fréquence de résonance suffisamment basse. Néanmoins, la course du siège doit rester inférieure à 2-3 cm pour ne pas gêner l'accès aux pédales [12] ;

- afin d'éviter les coups de butoirs transmis par le dossier au dos du conducteur, il est recommandé d'équiper les sièges des camions d'une suspension orientée selon l'axe avant-arrière afin de suivre les mouvements du corps au lieu de s'y opposer [8] ;

- la mise en œuvre d'un dispositif destiné à réduire les mouvements de liquide comme le système de brise-flots⁴ ;

- lors du déchargement de citernes compartimentées, il est recommandé de vider entièrement un ou plusieurs compartiments plutôt qu'une partie seulement de chacun d'eux [13].

DÉMARCHE ENTREPRISE

OBJECTIF

L'étude s'inscrit dans une problématique générale de compréhension des mécanismes de représentation du phénomène de ballant par les conducteurs de camions-citernes. Il s'agit également de comprendre comment ils intègrent ce phénomène à leurs stratégies de conduite. Le but final étant de contribuer à la prévention de ce type d'accidents en apportant des éléments pour une meilleure prise en compte de ce phénomène au cours des formations à la conduite.

Afin de tenter d'accéder aux stratégies déployées par les conducteurs pour répondre aux exigences de la tâche de conduite d'un camion-citerne, une méthode spécifique d'analyse de l'activité a été développée. Le principe était de faire conduire un camion, avec la citerne remplie de liquide (de l'eau), sur un trajet représentatif du type de parcours emprunté par les conducteurs au cours de leur travail. Ce trajet identique pour tous a été choisi de façon à comporter une partie en ville et une autre sur route. Ce circuit comprenait des virages, des lignes droites, des ronds points, ainsi que des feux de signalisation ou des stops. L'activité développée a été caractérisée grâce à des observations instrumentées (capteurs et caméras) et au recueil de données verbales (entretiens et auto confrontations)⁵.

Pour mener à bien cette étude, nous avons sollicité un groupe de transport-logistique dont une des branches d'activité est le transport de matières dangereuses. Le camion-citerne mis à notre disposition par l'entreprise était composé d'un tracteur équipé d'une double suspension et d'une citerne multi-cuve « Jumbo » (3 cuves et 2 brise-flots). Pour les besoins de l'étude, les cuves avant et centrale étaient remplies à 50 % de leur contenance totale.

Afin de visualiser les mouvements du liquide lors de la conduite sur le circuit expérimental, une caméra a été installée à l'intérieur de la cuve. Des boules de polystyrène, flottant librement dans la cuve, permettaient de suivre les fluctuations du liquide.

MÉTHODE

Observation instrumentée

Sept conducteurs ont été volontaires pour participer à cette étude.

Les recueils de données de mesure et d'observation ont été effectués grâce à la centrale d'acquisition « Captiv® » [14] qui permet d'acquérir, synchroniser et traiter sur une même base de temps :

- Des séquences vidéo filmées vers l'avant du camion, sur les essieux des roues, en direction du conducteur, et par une voiture qui suivait le camion.

- Des signaux issus de capteurs (suivi de trajectoire et de vitesse par GPS, capteurs de mouvement du liquide dans la cuve).

L'analyse des données, effectuée en temps différé, a permis de « rejouer » les scènes vidéo et de visualiser l'évolution dans le temps des grandeurs physiques mesurées et des paramètres d'observation, de façon parfaitement synchrone.

Le ballant a été caractérisé grâce à un capteur réalisé pour cette expérimentation (cf. Figure 3). L'analyse de ces données n'a pas de signification dans l'absolu, mais nous renseigne sur la trajectoire du liquide et nous fournit des indices sur son intensité.

Les données de vitesse et de trajectoire du véhicule, ont été acquises grâce à un GPS. Les Figures 4 et 5 illustrent le positionnement de ces capteurs.

⁴ Brise-flots : parois destinées à éviter les mouvements du liquide. Elles comportent un orifice central pour la circulation lors de l'inspection de la citerne et plusieurs orifices pour permettre l'écoulement du produit. Ces parois sont disposées de façon à diviser le volume interne total en compartiments.

⁵ Les conducteurs ont été sélectionnés par le responsable de production de la cellule d'exploitation en fonction de leur disponibilité.

Recueil de données auprès des conducteurs

Les conducteurs étaient informés des caractéristiques techniques de la citerne, de la nature du produit transporté, du niveau de remplissage des cuves et du trajet à effectuer. La consigne donnée était de conduire « *normalement, comme ils en avaient l'habitude* ».

Après la phase de conduite, chaque conducteur était invité à participer à une auto confrontation.

FIGURE 3

Représentation schématique du capteur de mesure du ballant dans la citerne
Diagrammatic view of surge measurement sensor in tank

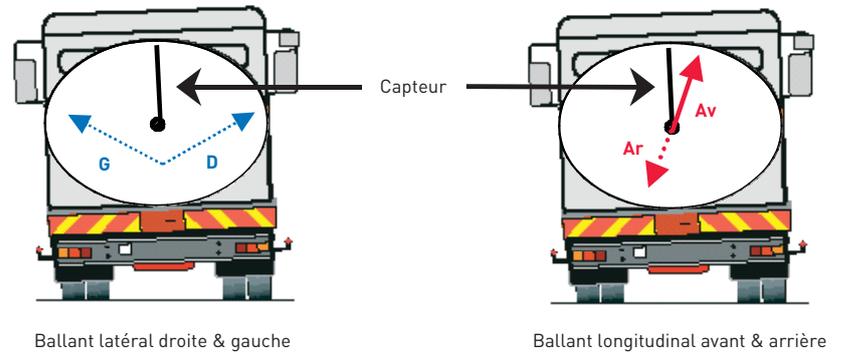


FIGURE 4

Positionnement des capteurs sur le camion-citerne
Sensor positioning on tanker lorry

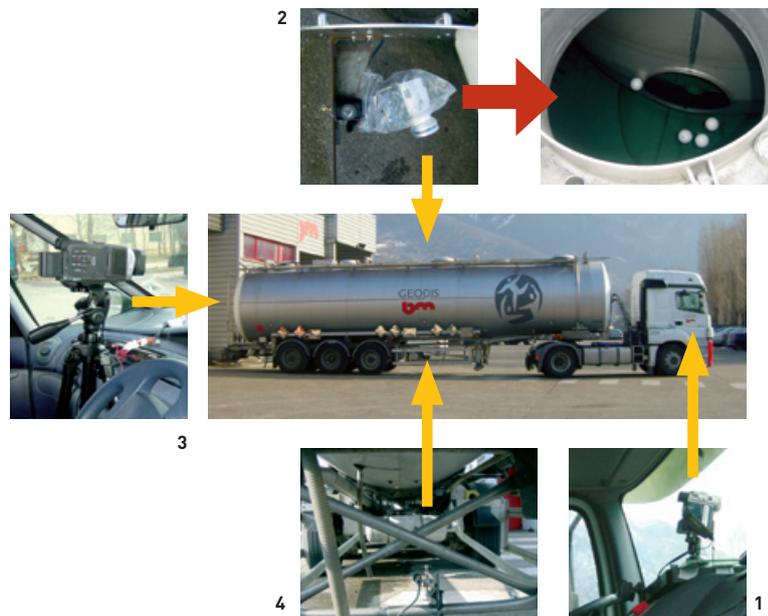
- 1- Capteur GPS :
disposé sur le toit du tracteur du camion
pour recueillir la vitesse et la trajectoire du
véhicule au long du parcours.
- 2- Capteur de mouvement du liquide :
placé au fond de la cuve avant.



FIGURE 5

Positionnement des caméras sur le camion-citerne
Camera positioning on tanker lorry

- 1- Caméra 1 :
placée à l'intérieur de la cabine afin de filmer
la route.
- 2- Caméra 2 :
disposée à l'intérieur de la cuve centrale de
la citerne (au dessus du niveau de l'eau) et
destinée à recueillir des images du liquide en
mouvement.
- 3- Caméra 3 :
placée dans une voiture suiveuse afin
d'obtenir une vue de l'arrière de la citerne en
circulation.
- 4- Caméra 4 :
située sous la citerne afin de filmer les
essieux arrière.



L'auto confrontation

L'auto confrontation vise à la production de verbalisations par un opérateur confronté à une séquence filmée de sa propre activité. Cette étape a permis de recueillir des éléments non accessibles par l'observation directe concernant l'activité des conducteurs et que seuls ces derniers peuvent exprimer. L'usage de cette méthode permet donc de reconstituer à partir des verbalisations, les processus mentaux guidant la logique d'action mise en jeu par l'opérateur.

Déroulement des auto confrontations

Les conducteurs ont pu visionner et commenter les 4 vues filmées de leur activité, restituées par Captiv® (cf. Figure 6).

Le questionnement des conducteurs a consisté à :

- faire défiler la séquence vidéo et inviter le conducteur à arrêter la bande lorsqu'il souhaitait expliquer quelque chose ou réagir aux images ;

- interrompre nous-mêmes la bande vidéo et interroger le conducteur sur une situation qui nous paraissait caractéristique.

RÉSULTATS

DONNÉES GÉNÉRALES

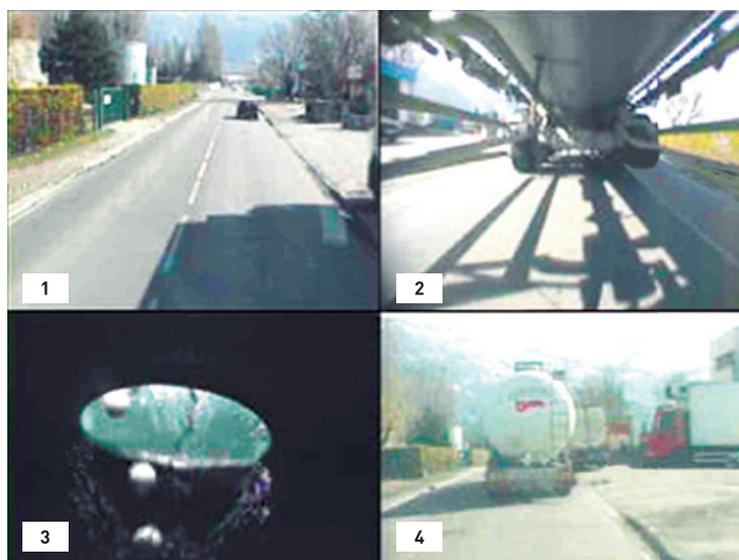
L'échantillon était composé de 7 conducteurs⁶. Leur âge varie entre 40 et 53 ans (moyenne : 47 ans, écart-type : 4 ans). Chacun d'eux est titulaire de la formation « matières dangereuses » et plus particulièrement de la formation « citerne », formations obligatoires pour transporter des matières dangereuses en camion-citerne (recyclage tous les 5 ans).

Leur ancienneté est présentée dans le *Tableau I*.

La moitié de ces conducteurs travaille en zone courte et effectue en moyenne 1 750 kilomètres (± 288) par semaine ; l'autre moitié travaille en zone longue et parcourt en moyenne 2 475 km (± 411) par semaine.

FIGURE 6

Les 4 vues restituées par Captiv®
4 views displayed by Captiv®



- 1 - Vue de la route à partir du poste du conducteur.
- 2 - Vue des essieux arrière.
- 3 - Vue de l'intérieur de la citerne.
- 4 - Vue arrière de la citerne.

TABLEAU I

Ancienneté des conducteurs
Driver length of service

Ancienneté	Ancienneté moyenne	Ecart type
En tant que conducteur routier	20 ans	5
Dans le transport de matières dangereuses	16,8 ans	4,5
Dans l'entreprise	15 ans	7

Sur l'ensemble du trajet, la vitesse moyenne des conducteurs est comprise entre 23 et 31 km/h (σ : 12,5 - 17,7 km/h) avec des pointes jusqu'à 71 km/h. L'arrêt des conducteurs aux différents feux rencontrés et la densité inégale du trafic tout au long de la journée permettent de rendre compte de ces écarts de vitesse.

REPRÉSENTATION DU BALLANT CHEZ LES CONDUCTEURS

L'analyse des auto confrontations met en évidence que les conducteurs connaissent le phénomène de ballant puisqu'ils en parlent en termes plus ou moins précis. Tous se sont également accordés pour dire que les images vidéo du ballant, filmées à l'intérieur de la cuve, correspondaient à la situation telle qu'ils l'imaginaient.

Les données montrent cependant que leur représentation du ballant longitudinal est plus complète que celle du ballant latéral :

- Les raisons de l'apparition du ballant longitudinal sont explicitées sous forme de règles plus nombreuses (6 règles contre 2 pour le latéral) et plus détaillées (par exemple, les conducteurs intègrent à ces règles les facteurs liés à l'infrastructure routière et à la vitesse, alors que seule l'infrastructure est citée pour le ballant latéral). De même, la formulation de ces règles est plus fréquente quand ils évoquent le ballant longi-

⁶ Les conducteurs ont été sélectionnés par le responsable de production de la cellule d'exploitation en fonction de leur disponibilité.

nal (73 %) que le ballant latéral (11 %) ou même l'absence de ballant (16 %).

■ À l'inverse, ce sont les conséquences liées au ballant latéral qui sont mieux appréhendées par ces conducteurs (trois d'entre eux relatent une situation de renversement provoquée par le ballant latéral, alors qu'un seul s'exprime sur les risques de pathologies dorsales liées au ballant longitudinal). De même, sur l'ensemble des verbalisations, les conducteurs ne s'expriment sur les conséquences du ballant longitudinal que dans 20 % des cas. Ce constat pourrait s'expliquer par le poids plus important accordé dans le secteur du transport à l'accident plutôt qu'aux atteintes à la santé.

STRATÉGIES DE CONDUITE ET BALLANT

Au cours des entretiens et auto confrontations, les conducteurs ont démontré qu'ils étaient conscients du fait qu'une fois le liquide en mouvement, aucune de leurs actions ne pouvait endiguer le phénomène de ballant. Seul l'arrêt du camion citerne permet au liquide de se stabiliser naturellement, sous l'effet de sa propre inertie. En revanche, ils ont souligné que la façon de conduire influe fortement sur les mouvements du liquide (plus la conduite est brusque, plus les mouvements peuvent s'intensifier). Les conducteurs développent donc des stratégies de conduite pour contrôler l'ampleur du ballant.

Ballant longitudinal

Identification des stratégies de contrôle du ballant longitudinal

Quatre stratégies de conduite ont pu être mises en évidence par l'analyse des auto confrontations :

- une conduite basée sur l'anticipation (42 %) ;
- un contrôle continu de la vitesse (40 %) ;
- une conduite limitant les arrêts (13 %) ;
- une conduite basée sur une analyse des vibrations issues des mouvements du liquide et perçues/ressenties par kinesthésie (5 %) ; stratégie illustrée par cet extrait de verbalisation : « [...] quand on sent que la vague arrive sur le tracteur, alors il faut freiner au moment où elle arrive comme ça, ça la ralentit et quand elle va repartir juste ré-accélerer un

TABLEAU II

Relation entre vitesse moyenne du camion-citerne et valeur maximale estimée des ballants avant et arrière en ligne droite pour les 7 conducteurs

Relationship between tanker lorry average speed and maximum estimated longitudinal surge on a straight road for 7 drivers

	Vitesse moyenne (km/h)	Ballant maximal avant (en degrés)	Ballant maximal arrière (en degrés)
Conducteur 1	33 ($\sigma = 2,8$)	2	8
Conducteur 2	47 ($\sigma = 3,0$)	10	17
Conducteur 3	37 ($\sigma = 4,1$)	4	8
Conducteur 4	33 ($\sigma = 3,0$)	8	8
Conducteur 5	35 ($\sigma = 2,6$)	4	8
Conducteur 6	34 ($\sigma = 6,0$)	3	7
Conducteur 7	43 ($\sigma = 2,8$)	10	8

tout petit peu pour essayer de la maintenir, stabiliser, mais c'est dur à faire ». Le ballant longitudinal produit des à-coups reçus au niveau du dossier du siège du conducteur qui peuvent être importants. Les conducteurs ont signalé que ces sensations leur étaient déjà connues grâce à leur expérience de conduite en containers-citernes (non équipés de brise-flots) et dans lesquels ces à-coups sont plus intensément ressentis. Ce phénomène est moins saillant pour le ballant latéral, les forces exercées par les mouvements du liquide se situant plutôt sur les essieux. Les conducteurs disent « sentir légèrement » au travers du volant, que le camion citerne se penche à gauche ou à droite, mais cela reste rare.

On constate que l'anticipation constitue une condition cruciale pour gérer la vitesse et les arrêts comme l'illustre ce passage : « [...] anticiper, parce que si vous regardez de loin, comme là j'ai fait pour le feu, ça me permet à moi de réduire la vitesse de ne pas trop prendre de coups. Et si je viens trop vite, il va falloir que je freine, donc je vais avoir des secousses plus importantes du produit en bout de la citerne et je vais être plus secoué. Et puis en fin de compte, si j'anticipe pas, je vais être obligé de m'arrêter (au feu) et donc après je vais redémarrer et je vais re être secoué pour le démarrage ».

Il semblerait que les trois premières stratégies soient initiées par les formations (notamment la formation à la « conduite économique »⁷ imposée par l'entreprise), la dernière stratégie se développant plutôt avec l'expérience.

Analyse des stratégies

L'effet des stratégies de conduite pour contrôler le ballant longitudinal a été étudié pour des phases spécifiques de conduite telles que les lignes droites, les feux de signalisation et les stops. Pour cela nous avons isolé les portions du trajet expérimental correspondant à ces différentes phases et nous avons analysé différents paramètres.

Lignes droites

Le *Tableau II* met en relation la vitesse moyenne adoptée par chacun des 7 conducteurs en ligne droite et la valeur maximale estimée du ballant avant et arrière dans la cuve. Ces données confirment l'effet de la vitesse sur l'amplification du ballant longitudinal avant et arrière (par exemple, comparaison des conducteurs 1 et 2). On constate également, qu'à vitesse identique, la valeur des ballants avant et arrière n'est pas nécessairement similaire (par exemple, conducteurs 2 et 7). Les disparités observées s'expliqueraient par des stratégies individuelles de conduite amenant les conducteurs à freiner et accélérer différemment, donc à agir différemment sur la production du ballant longitudinal.

⁷ Conduite économique : conduite basée, en particulier, sur l'anticipation des événements qui surviennent sur la route dans le but de réduire la consommation de carburant et l'émission de gaz à effet de serre. Cette conduite présente également l'avantage de réduire l'amplitude du ballant longitudinal.

Abord des feux de signalisation et des stops

Les auto confrontations révèlent que les conducteurs préfèrent éviter d'arrêter le véhicule pour deux raisons au moins : empêcher que le ballant longitudinal augmente et éviter de redémarrer leur camion-citerne (action difficile et coûteuse en termes de consommation de carburant). Lors de nos essais, 5 conducteurs sur 7 ne se sont pas complètement arrêtés au stop (vitesse de 1,1 à 3,2 km/h mesurée au niveau de la ligne blanche indiquant le stop).

Les données de mesure indiquent que 4 conducteurs sur 5 décelèrent au moins 135 mètres avant un feu de signalisation. Les auto confrontations montrent que l'intérêt de déceler tôt est à la fois d'éviter l'accroissement du ballant longitudinal et d'augmenter la probabilité, lorsque que le feu est rouge, qu'il passe au vert à l'approche de la citerne (en d'autres termes, de limiter les arrêts au feu rouge).

À l'approche d'un panneau stop, deux stratégies sont observées : les conducteurs qui décelèrent environ 150 mètres avant le stop (conducteurs 1, 3, 4, 5), et ceux qui décelèrent à moins de 100 mètres (conducteurs 2, 6, 7). L'analyse du *Tableau III* permet de constater qu'une décélération tardive s'effectue parfois par une réduction brutale de la vitesse ce qui contribue à accroître le ballant longitudinal vers l'avant de la citerne (par exemple, conducteur 2).

Suite à ces constats, on comprend que pour agir sur le ballant longitudinal, il faudrait pouvoir agir de façon combinée sur la vitesse, la distance d'arrêt et le moment de décélération. Il apparaît donc que la stratégie la plus efficace consiste à rouler à vitesse limitée et à débiter la décélération le plus tôt possible, soit au moins 150 mètres avant l'obstacle.

Cas particuliers : les arrêts non anticipés

Nous avons observé un arrêt non anticipé, avec un freinage brutal, chez deux conducteurs différents. Du fait de la similarité des résultats, nous ne présentons qu'une seule analyse qui porte sur la vitesse et le ballant avant et arrière d'un seul conducteur dans une situation où le freinage n'a pas été anticipé et

TABLEAU III

Relation entre décélération précoce ou tardive, temps d'arrêt, vitesse de décélération et valeur maximale estimée du ballant longitudinal avant, pour les 7 conducteurs

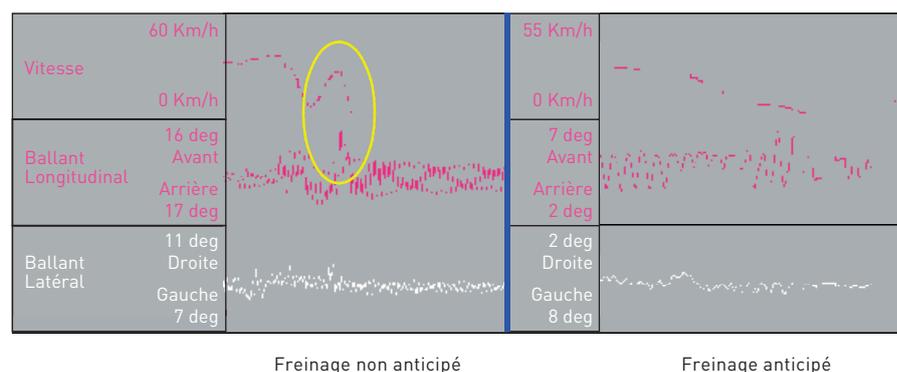
Relationship between early or late deceleration, stopping time, deceleration velocity and maximum estimated longitudinal forward surge for 7 drivers

Conducteurs	Décélération précoce (150 m avant le panneau stop)				Décélération tardive (100 m avant le panneau stop)		
	n°1	n°3	n°4	n°5	n°2	n°6	n°7
Temps mis pour s'arrêter (en secondes)	24	17	26	25	15	16	16
Vitesse au début de la décélération (km/h)	40	52	36	39	49	42	37
Ballant Avant maximum (degrés)	7	7	7	6	10	8	7

FIGURE 7

Évolution de la vitesse et du ballant longitudinal avant et arrière en situation de freinage non anticipé et de freinage anticipé, pour un conducteur

Variation in speed and forward/backward longitudinal surge during unanticipated and anticipated braking for 1 driver



une situation où il a pu l'être. Ces données montrent que, contrairement à un freinage anticipé, la valeur estimée du ballant avant (ainsi que la fréquence des oscillations), augmente subitement lors d'un freinage non anticipé, formant un pic (cf. *Figure 7*). On observe également que la décélération débute 16 mètres avant le feu lorsque le freinage n'est pas anticipé, contre 174 mètres pour le freinage anticipé. De même, la vitesse décroît rapidement (30 km/h en 5 secondes) en cas de freinage non anticipé, alors que cette diminution de vitesse se déploie sur 33 secondes environ lorsque le freinage est anticipé.

En situation de freinage non anticipé, le camion-citerne met 7 fois moins de temps pour s'arrêter qu'en situation anticipée, ce qui provoque un ballant maximal vers l'avant 3 fois plus important. En revanche, il semble que le ballant droite-gauche ne soit pas influencé.

Ballant latéral

Identification des stratégies de contrôle du ballant latéral

Cinq types de stratégies visant à contrôler l'ampleur du ballant latéral ont pu être identifiées à l'analyse des auto confrontations :

- conserver une vitesse limitée sur l'ensemble du trajet (46 %) ;
- éviter les courbes trop prononcées ; couper les rond-points quand cela est possible (25 %) ;
- adopter une conduite basée sur l'anticipation (17 %) ;
- limiter les actions brusques (7 %) ;
- limiter les arrêts (5 %).

La stratégie consistant à couper les rond-points apparaîtrait plutôt avec l'expérience. Comme nous l'avons vu pour le ballant longitudinal, la formation à la

TABLEAU IV

Extrait des verbalisations d'un conducteur
Extract of driver statements

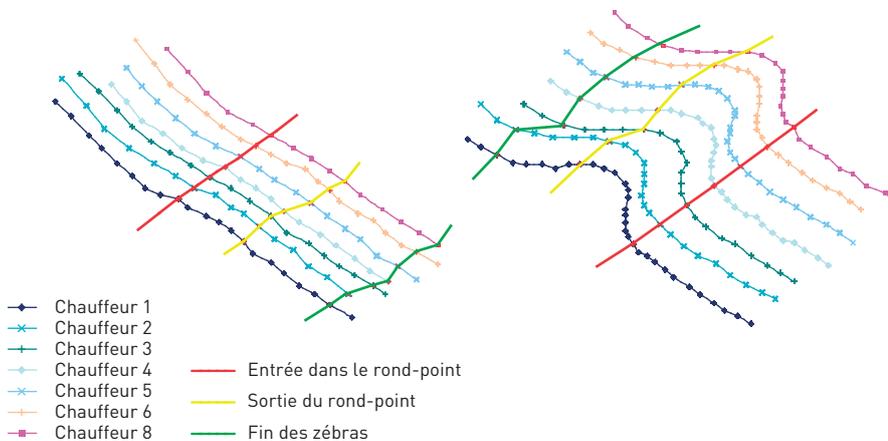
Expérimentateur	Alors du coup, là le liquide part un peu sur le côté et alors qu'est ce que l'on fait ?
Conducteur	Comme on va retourner à gauche et puis à droite, alors bon ça devrait stabiliser le liquide.
Expérimentateur	Ça veut dire que vous essayez de compenser en augmentant le virage d'après ?
Conducteur	Voilà.

TABLEAU V

Valeurs maximales moyennes du ballant latéral droit ou gauche dans les rond-points n°1 et 2 pour l'ensemble des conducteurs
Average maximum rightward or leftward surges on roundabouts 1 and 2 for all drivers

	Rond-point n°1	Rond-point n°2
Valeur maximale moyenne du ballant à droite (en degrés)	5 ($\sigma = 1$)	10 ($\sigma = 1,5$)
Valeur maximale moyenne du ballant à gauche (en degrés)	4 ($\sigma = 1$)	9 ($\sigma = 3$)

FIGURE 8

Tracé des trajectoires des 7 conducteurs dans les rond-points n°1 (décalé à gauche) et n°2 (décalé à droite)
Plotted trajectories of 7 drivers on roundabouts 1 (offset to right) and 2 (offset to left)


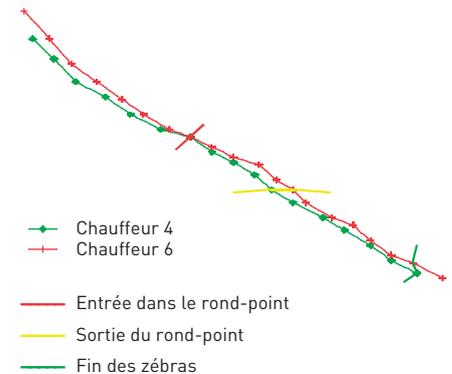
conduite économique inciterait à adopter les autres types de stratégies.

Un seul conducteur formule une stratégie erronée : lorsque deux virages se succèdent, il s'agit de négocier exagérément le deuxième virage afin de contrebalancer le déplacement du liquide déterminé par la prise du premier virage (cf. *Tableau IV*). En fait, cette règle favoriserait le renversement de la citerne (départs successifs et opposés du liquide et, ce, brutalement).

Analyse des stratégies

Nous avons analysé ces stratégies lors de phases spécifiques de conduite où le ballant latéral est susceptible de devenir important, à savoir la négociation des rond-points (le trajet expérimental en comportait 9). Deux rond-points du trajet ont été sélectionnés du fait de leurs configurations opposées : l'un est constitué d'un terre-plein central décalé sur la gauche par rapport à l'axe de la route (rond-point n°1), l'autre décalé sur la droite (rond-point n°2).

FIGURE 9

Tracé de la trajectoire des conducteurs n°4 et 6 dans le rond-point n°1
Plotted trajectory of drivers 4 and 6 on round-about 1

DONNÉES GÉNÉRALES

On observe que les conducteurs franchissent le rond-point n°1 plus rapidement (vitesse moyenne de 30 km/h, soit 16 secondes en moyenne) que le rond-point n°2 (vitesse moyenne de 21 km/h, soit 27 secondes en moyenne).

On constate également que la trajectoire de traversée du rond point n°1 est quasiment rectiligne (les conducteurs « coupent » ce rond point) alors qu'elle est courbe dans le cas du rond-point n°2 (cf. *Figure 8*). De ce fait, il apparaît que la configuration du rond-point n°2 induit une valeur de ballant latéral deux fois plus importante que le rond-point n°1 (cf. *Tableau V*).

ANALYSE DES STRATÉGIES DANS LES ROND-POINTS N°1 ET N°2

L'analyse des données de mesure montre que :

▣ Tous les conducteurs ralentissent à partir du panneau qui signale le rond-point n°1 (50 mètres en amont de celui-ci). Les vitesses d'entrée et de sortie du rond-point sont similaires (entre 21 et 33 km/h).

▣ La stratégie adoptée par la majorité des conducteurs est de maintenir leur trajectoire la plus rectiligne possible (cf. *Figure 9* : exemple pour les conducteurs 4 et 6), le ballant latéral étant alors peu influencé par la manœuvre.

Les mêmes analyses, réalisées pour le rond-point n°2, indiquent que les

conducteurs ralentissent également à partir du panneau qui signale le rond-point et que les vitesses d'entrée et de sortie du rond-point sont similaires (entre 14 et 24 km/h).

Le terre-plein central du rond-point n°2 étant décalé vers la droite par rapport à l'axe de la route, les conducteurs ont tendance à en suivre les contours. Nous avons étudié la trajectoire des conducteurs ayant les circuits les plus divergents (conducteurs 2 et 4) et nous pouvons observer sur la *Figure 10* que :

■ le conducteur 4 tend à s'éloigner du terre-plein central aussitôt après l'entrée dans le rond-point, puis le contourne en effectuant un virage à grand rayon de courbure ;

■ le conducteur 2 maintient une trajectoire plus proche du terre-plein et le contourne par un virage plus serré.

On peut noter que la trajectoire du conducteur 2 produit un ballant latéral de valeur plus prononcée que la trajectoire du conducteur 4 (cf. *Figure 11*), que sa vitesse est plus élevée (21 km/h contre 15 km/h pour le conducteur 4) et sa trajectoire plus serrée. Par ailleurs, la valeur du ballant latéral, produit par le style de conduite du conducteur 2, augmente davantage et plus rapidement dans la deuxième partie du rond-point.

ÉVALUATION PAR UN EXPERT

Nous avons sollicité un expert⁸ pour analyser, à partir des séquences vidéo, les stratégies des conducteurs dans ces deux ronds-points. Trois types de conduite sont identifiés (cf. *Figure 12*) :

■ type 1 : ballant latéral élevé et déports brutaux du liquide lié à une trajectoire constituée d'un virage serré pour contourner le terre-plein avec une vitesse plus élevée que dans les autres types de conduite (conducteurs 2 et 3) ;

■ type 2 : ballant peu élevé et déplacements du liquide étalés dans le temps (conducteurs 1 et 4) ;

■ type 3 : ballant intermédiaire entre les deux précédentes catégories (conducteurs 5, 6 et 7 ; seul le ballant produit par le conducteur 7 est représenté pour des raisons de lisibilité).

L'expert ne signale aucun point particulier en ce qui concerne la négociation du rond-point n°1. En revanche, il estime que deux conducteurs pouvaient

FIGURE 10

Tracé de la trajectoire des conducteurs n°2 et 4 dans le rond-point n°2 Plotted trajectory of drivers 2 and 4 on round-about 2

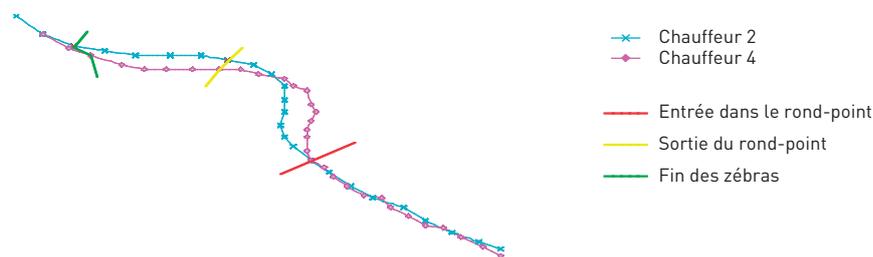
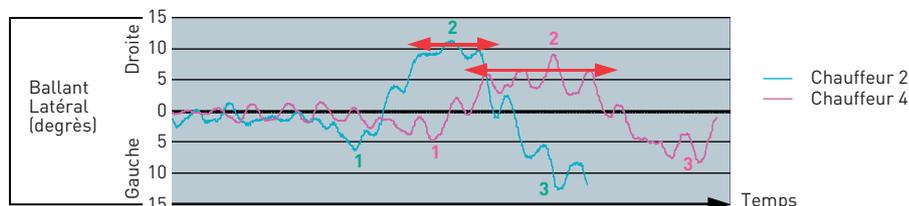


FIGURE 11

Évolution de la valeur estimée du ballant latéral des conducteurs 2 et 4 dans le rond-point n°2 Variation in transverse surge for drivers 2 and 4 on round-about 2

Variation in transverse surge for drivers 2 and 4 on round-about 2

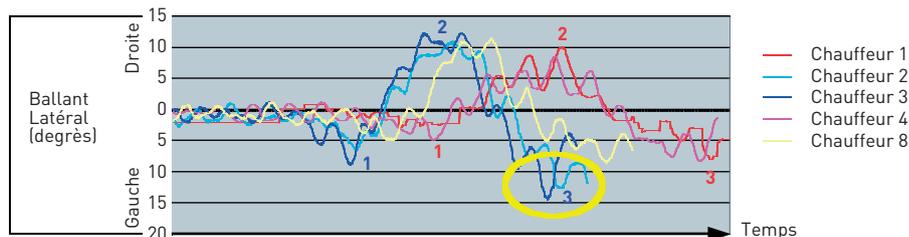


- 1 : virage à droite après l'entrée dans le rond point.
- 2 : virage à gauche après le contournement du terre plein.
- 3 : virage à droite pour sortir du rond point.
- 1 : right-hand turn after entering round-about.
- 2 : left-hand turn after circling central reservation.
- 3 : right-hand turn to leave round-about.

FIGURE 12

Évolution du ballant latéral tout au long du franchissement du rond point 2 pour 5 des conducteurs Variation in transverse surge throughout crossing of round-about 2 for 5 drivers

Variation in transverse surge throughout crossing of round-about 2 for 5 drivers



- Número 1 correspond au virage effectué à droite après l'entrée dans le rond point (déport liquide à gauche).
- Número 2 correspond au virage effectué à gauche après le contournement du terre plein (déport liquide à droite).
- Número 3 correspond au virage effectué à droite pour sortir du rond point (déport liquide à gauche).

être à la limite du renversement à la sortie du rond-point 2 (cf. points signalés par le cercle jaune sur la *Figure 12*). Ces derniers n'ont pas réagi lorsqu'ils ont visualisé les images de cette situation, celle-ci ne leur a vraisemblablement pas paru risquée. Selon l'expert, le point de rupture, c'est-à-dire le moment où le renversement est le plus probable, se situe

⁸ Expert : cette personne est un ancien conducteur, devenu responsable de formation des conducteurs et de la sécurité du groupe de transport dans laquelle l'étude s'est déroulée.

au niveau de la sortie du rond point. Le ballant passe en effet d'un maximum à droite à un maximum à gauche dans un très court laps de temps (déport opposé du liquide de façon brutale). Ce résultat vient conforter les conclusions précédentes.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Le transport de matières dangereuses est une activité qui comprend des risques et dont les dommages concernent aussi bien l'homme, le matériel que l'environnement. Les conséquences d'un accident de matières dangereuses peuvent s'avérer catastrophiques.

L'étude menée dans ce rapport s'est orientée vers le transport de liquide par camions-citernes et l'analyse du phénomène de ballant. Lorsque le ballant est longitudinal, il peut être à l'origine de pathologies lombaires, et lorsqu'il est latéral, il peut entraîner le renversement du véhicule. On s'est plus particulièrement intéressé à comprendre comment ce phénomène était intégré aux différentes stratégies de conduite développées par les conducteurs. Le conducteur de citerne n'a pas de vision de ce qui se passe à l'intérieur des cuves, il est donc contraint de développer des stratégies de conduite à partir de la représentation qu'il se construit du mouvement du liquide transporté.

Le ballant de liquide dans une citerne est un phénomène complexe qui résulte de l'interaction de plusieurs facteurs : la vitesse, la trajectoire associée à l'infrastructure et les stratégies de conduite. L'amplitude du ballant se modifie dès lors que l'un de ces facteurs varie, même faiblement. Les conducteurs de l'entreprise étudiée en ont élaboré une représentation « à peu près exacte » : ils parviennent à formuler des règles à la fois sur les causes de sa survenue et sur ses conséquences (en termes de renversements et de pathologies dorsales).

Néanmoins, les résultats montrent que la qualité de la représentation du ballant n'est pas identique selon qu'il est longitudinal ou latéral. Les conducteurs se représenteraient de façon plus

complète les causes de survenue du ballant longitudinal que celles du ballant latéral. Inversement, les conséquences du ballant latéral seraient mieux appréhendées (probablement parce qu'elles se révèlent irréversibles). Les raisons qui expliqueraient cette différence sont de deux types :

- L'élaboration de la représentation du ballant longitudinal et latéral repose essentiellement sur les connaissances « théoriques » acquises au cours de la formation « conducteurs de citernes », et éventuellement rappelées au moment des recyclages (légalement prévus tous les cinq ans).

- Dans le cas du ballant longitudinal, ces connaissances sont renforcées régulièrement par les sensations que les conducteurs perçoivent depuis l'intérieur de la cabine du tracteur. Le ballant longitudinal produit des à-coups transmis au niveau du dossier du siège du conducteur qui l'informent indirectement des mouvements de liquide à l'intérieur de la cuve. Même si cette information reste partielle, elle permettrait de compenser, en partie, l'absence d'information visuelle (déterminante dans l'activité de conduite). Cependant, en termes de prévention, on peut s'interroger sur la façon d'agir pour supprimer l'effet néfaste du ballant sur le dos tout en informant le conducteur des mouvements dynamiques.

- Dans le cas du ballant latéral, les rares et faibles sensations de mouvements latéraux transmises aux conducteurs *via* le volant, seraient sans doute insuffisantes pour compléter les connaissances théoriques ou informer efficacement le conducteur.

La représentation que les conducteurs se font du ballant est au centre de l'élaboration de stratégies de conduite développées pour contrôler l'amplitude de ce ballant. Les stratégies formulées par les conducteurs interrogés semblent appropriées et correspondent aux recommandations dans le domaine. Ainsi :

- Dans le cas du ballant longitudinal, la stratégie principale consiste à « anticiper » les éléments qui pourraient les arrêter (par exemple les feux de signalisation et les stops). L'anticipation se traduit par une action sur la vitesse : décélération précoce pour une réduction de vitesse la plus progressive possible et un ballant peu élevé. On a pu constater que cette stratégie était efficace, puisque

le ballant observé était moins important dans le cas d'un arrêt anticipé que non anticipé (arrêt brutal). Au démarrage, les conducteurs observés ont tendance à accélérer le plus doucement possible.

- Dans le cas du ballant latéral, les conducteurs cherchent à garder une trajectoire la plus rectiligne possible (par exemple en coupant les rond-points lorsque cela est possible) ce qui leur permet également de maintenir leur vitesse. Lorsqu'ils ne peuvent pas (par exemple pour des rond-points dont la configuration est complexe) ils réduisent leur vitesse et abordent le virage avec une trajectoire large. L'absence de prise de conscience du risque de renversement en sortie de rond point par deux des conducteurs, ainsi que l'élaboration d'une règle erronée pour réduire l'amplitude du ballant latéral, rendraient compte d'une représentation moins détaillée de la survenue du ballant latéral.

Le ballant est un phénomène difficile à appréhender dans sa totalité et la représentation que les conducteurs s'en font est capitale ; la formation peut jouer un rôle important dans son élaboration. Elle s'avère essentielle pour deux raisons au moins :

- Toute entreprise est amenée à embaucher des conducteurs pour remplacer les départs (ce qui était particulièrement le cas de l'entreprise, ayant participé à cette étude, qui était composée d'une population de conducteurs vieillissante).

- Une tendance à l'externalisation de l'activité ou à la sous-traitance est observée dans le secteur du transport et de la logistique (l'entreprise embauchait 20 % de conducteurs sous-traitants et envisageait d'en augmenter la proportion). La formation des salariés du transport de matières dangereuses doit être la plus performante et complète possible pour éviter que cette population de sous-traitants et de novices ne devienne une population particulièrement à risques parce que moins bien formée, amenée à prendre davantage de risques parce que rémunérée selon des règles non homogènes, par exemple aux kilomètres plutôt qu'à l'heure...

En termes de « contenu de la formation », une réflexion a été engagée sur :

- L'intégration des images vidéo recueillies lors de cette étude, à la partie théorique de la formation pour faciliter la compréhension du phénomène.

Pouvoir visualiser, même indirectement, les mouvements du liquide à l'intérieur de la cuve dans différentes configurations, participe à la construction de règles pertinentes de limitation de ces variations. Cette action peut concerner, aussi bien les conducteurs novices à qui l'on transmet les règles de limitation du ballant (avec une attention particulière au ballant latéral et au risque de renversement), que les conducteurs experts au moment des recyclages pour corriger, voire éviter le développement de raisonnements intuitifs et de règles erronées.

■ L'incitation à réunir les salariés du transport de matières dangereuses dans des lieux appropriés ou des moments privilégiés pour communiquer sur ce phénomène de façon régulière et moins formelle qu'en formation. L'activité de conduite imposant aux salariés des conditions de travail isolé, ces espaces pourraient devenir riche d'enseignements concernant le phénomène de ballant, mais aussi renforcer voire créer des collectifs de travail.

■ Le renforcement de la compréhension du phénomène de ballant par un module de formation pratique dans lequel on permettrait aux conducteurs de ressentir physiquement les mouvements du liquide. Il a été souligné précédemment que cet aspect était primordial dans l'élaboration d'une représentation du phénomène la plus proche de la réalité possible. Par exemple les conducteurs pourraient conduire un camion-citerne équipé d'un système de sécurité permettant à la citerne de se pencher sans se renverser pour « sentir » réellement les effets du ballant latéral. Pour le ballant longitudinal, il s'agirait par exemple de conduire des containers-citernes non équipés de brise-flots.

En matière de prévention, la mesure visant à réduire la vitesse, tout en évitant les accélérations et les décélérations brutales, reste une solution idéale dans la limitation du ballant. Cependant différentes logiques s'affrontent ; le conducteur doit pouvoir concilier rapidité de

son trajet, économies de carburant et sécurité.

Pour conclure, différentes approches sont à mener de façon complémentaire sur le problème complexe qu'est la conduite d'un véhicule soumis au ballant de la marchandise transportée :

■ la formation des conducteurs aux techniques d'anticipation et d'identification des ballants. À l'heure actuelle, la problématique du ballant et de sa gestion n'est pas traitée en détail ni au cours de la formation ni des recyclages dispensés aux conducteurs (seuls quelques aspects théoriques sont abordés).

■ identifier des pistes de réflexion sur les moyens de réduire les vibrations sans supprimer les informations concernant les mouvements du liquide transmises aux conducteurs.

Reçu le : 11/06/2008

Accepté le : 08/07/2008

BIBLIOGRAPHIE

[1] DELEIGUE M., MONNET B. (2003) – Le transport de matières dangereuses : risques majeurs et espace rural. Aléas et Enjeux n°6, pp. 12-13.

[2] HELLA F., LAYA O., NEBOIT M. (1994) – Les paramètres oculomoteurs comme indicateurs des « exigences de surveillance » en conduite automobile. Bulletin de Psychologie, 418 (Tome XLVIII), pp. 50-56.

[3] MESTRE D. (1987) – Représentation de la dynamique d'un véhicule lors du contrôle visuel du déplacement. Le Travail Humain, 50, pp. 47-61.

[4] BERTHOZ A. (1997) – Le sens du mouvement. Paris : Editions Odile Jacob (Sciences).

[5] HELLA F., SCHOULLER J.F., CLÉMENT D. (2003) – Démarche ergonomique d'assistance à la mise à quai de camions de transport routier. Le Travail Humain, tome 66, n°3/2003, pp. 283-304.

[6] LECHNER D., SCHAEFER G., CORRIGNAN P., LESCAIL D. (2001) – Predit 99A0072 : Sécurité des Poids Lourds à fret liquide. Rapport de synthèse. SIA – Actes du Congrès de Dynamique du Véhicule - École Centrale de Lyon.

[7] BONGERS P., BOSHUIZEN H. (1990) – Back disorders and whole-body vibration at work. Thèse de l'université d'Amsterdam pour l'obtention du grade de docteur CIP. La Haye, Gegevens Kominklijke Bibliotheek, Octobre, p. 318.

[8] BOULANGER P., DONATI P., GALMICHE JP., CHRIST E., KAULBARS U. (1992) – L'environnement vibratoire au poste de conduite des camions. Cahiers de notes documentaires n°146, 1^{er} trimestre.

[9] BERNADET D. (1997) – Manuel du transport routier des matières dangereuses, citernes-gaz. AFT-IFTIM. Paris, édition CELSE.

[10] BERNADET D. (2002) – Manuel du transport routier des matières dangereuses, citernes. AFT-IFTIM. Paris, édition CELSE.

[11] BERNADET D. (2003) – Manuel du transport routier des matières dangereuses, formation de base. AFT-IFTIM. Paris, édition CELSE.

[12] DONATI P., GROSJEAN A., MISTROT P., ROURE L. (1983) – The subjective equivalence of sinusoidal and random whole-body vibration in the sitting position (an experimental study using the « floating reference vibration » method). Ergonomics, 26, pp. 251-273.

[13] APTH (2000) – Formation de base, spécialisation citernes. Guide du conducteur. Édition 2000.

[14] MARTIN P., BRAND F., & SERVAIS M. (1999) – Correlation of the exposure to a pollutant with a task-related action on workplace: the CAPTIV™ system. Annual of Occupational Hygiene, 43, pp. 221-233.

SITES INTERNET

Site Internet prim.net :

http://www.prim.net/citoyen/definition_risque_majeur/dossier_risq_transport/pageintroduction.htm

Site Internet jarrymag :

<http://www.jarrymag.net/article/view/113/1/14>

Site Internet memento du maire :

http://www.mementodumaire.net/o2risques_techos/RT3.htm

Site Internet INRS :

www.inrs.fr

Site Internet ac-rouen :

http://www.ac-rouen.fr/rectorat/profession_rme/lerisque3.htm

Site Internet transports.equipement.gouv :

<http://transports.equipement.gouv.fr>

Site Internet equipement.gouv :

http://www2.equipement.gouv.fr/statistiques/resultat/publicat/transpor/bilan_social/pdf2002/accidents.PDF

Site Internet irma-grenoble :

<http://www.irma-grenoble.com/o4risques/o42risuques-techno/transport.htm>

Site Internet assodis :

<http://assodis.free.fr/chim.html>

Site Internet université de Lyon 1 :

http://biomserv.univ-lyon1.fr/wiki/securite1/moin.cgi/EstimationRisques/LaM_egthode