

- Chariot de manutention automoteur
- Renversement
- Essai
- Normalisation

► Jérôme REBELLE, Alexandre KLINGLER, Richard POIROT, INRS, département Ingénierie des équipements de travail

CONSIDERING DYNAMIC EFFECTS TO EVALUATE BETTER FORKLIFT TRUCK STABILITY DATA FOR DRAFTING A NEW EUROPEAN STANDARD

Each year in France, an average 8,300 accidents are caused when working with a forklift truck. This statistic includes 10 fatal accidents. Current standards do not cover risk exposure in the event of machine lateral overturning. Consequently, the German, French and Italian governments stated that they were not compliant with the Machinery safety directive, and have introduced a safeguard provision before the European Committee for Standardization. A European working group has been set up to develop a new standard test procedure for evaluating forklift truck stability; an innovative procedure in that it takes into account dynamic phenomena. Research conducted jointly by INRS and the University of Hamburg has led to a test procedure for a machine travelling along a curved trajectory enabling creation of lateral overturning movements.

Results of the initial tests performed by three professional forklift truck operators on four commercially available IC-powered machines have prompted establishment of a first proposed stability threshold to be met by new machines.

Parametric analysis has been performed in parallel using a driving simulator. This has shown that the velocity, centre-of-gravity position and certain tyre characteristics are the parameters with the greatest impact on the test procedure outcome. These data will allow manufacturers to design henceforth more stable machines, likely to reduce the number of fatal accidents. In the near future, this new stability criterion will provide users with additional information for selecting a safer machine.

- Self-propelled forklift truck
- Overturning
- Test
- Standardisation

PRISE EN COMPTE DES ASPECTS DYNAMIQUES POUR MIEUX ÉVALUER LA STABILITÉ DES CHARIOTS ÉLÉVATEURS

Éléments pour l'élaboration d'une nouvelle norme européenne

En France, les chariots élévateurs sont responsables, en moyenne chaque année, de 8300 accidents dont 10 fatals. Les normes en vigueur ne couvrant pas les risques encourus en cas de renversement latéral de la machine, les états allemand, français et italien les ont jugées non conformes à la directive Machines et ont déposé une clause de sauvegarde devant le comité européen de normalisation. Un groupe de travail européen a été formé afin d'élaborer une nouvelle procédure d'essai normalisée permettant d'estimer la stabilité des chariots élévateurs, procédure novatrice en cela qu'elle tient compte des phénomènes dynamiques. Les travaux, réalisés conjointement par l'INRS et l'Université de Hambourg, ont débouché sur une procédure d'essai réalisée en circulation le long d'une trajectoire en virage permettant de provoquer des renversements latéraux de l'engin.

Les résultats des premiers essais, réalisés par trois caristes professionnels qui ont conduit quatre chariots élévateurs thermiques du marché, ont permis de faire une première proposition pour fixer le seuil de stabilité que devront satisfaire les nouvelles machines.

En parallèle, à l'aide d'un simulateur de conduite, une analyse paramétrique a été réalisée. Celle-ci a montré que la vitesse, la position du centre de gravité et certaines caractéristiques des pneumatiques sont les paramètres les plus influents sur le résultat de la nouvelle procédure d'essai. Ces informations permettront aux fabricants de concevoir, dès à présent, des machines plus stables, susceptibles de réduire le nombre d'accidents mortels. Pour les utilisateurs, ce nouveau critère de stabilité pourra, dans un futur proche, être une indication supplémentaire pour choisir une machine plus sûre.

Le chariot automoteur en porte-à-faux à conducteur porté, appelé aussi chariot élévateur, est conçu pour manutentionner des charges. Sa capacité de levage varie entre 1 et 50 tonnes, mais 60 % du parc est constitué d'engins d'une capacité inférieure ou égale à 2,5 tonnes. En France, on dénombre environ 200 à 250 000 machines en circulation pour une population de l'ordre de 600 à 650 000 caristes. Pour l'ensemble des véhicules de manutention (chariots transporteurs, élévateurs et gerbeurs), les statistiques de la CNAMTS (Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés) dénombrent, sur la période 1992-2002, une moyenne de

8 300 accidents par an, avec arrêt de travail dont 580 ayant provoqué une incapacité permanente. Parmi ces accidents, 10 salariés sont tués dans un accident mettant en cause le seul chariot élévateur. La moitié de ces décès est consécutive au renversement latéral de l'engin. En général, le cariste est éjecté de sa cabine et écrasé par la structure de protection du chariot. Ces chiffres ne sont pas exhaustifs et ne concernent que les salariés du régime général. Il faudrait y ajouter les statistiques concernant les artisans et les salariés des autres régimes : régime agricole, des mines, de l'industrie électrique et gazière, etc. Des chiffres similaires sont observés dans les principaux pays européens.

Aujourd'hui, les chariots élévateurs doivent satisfaire une procédure d'essai¹ réalisée dans des conditions quasi-statiques. Le chariot est positionné sur une plate-forme qui s'incline progressivement jusqu'à ce que les roues situées le plus en amont décollent sous l'effet de la gravité. L'angle limite atteint avant le décollement des roues constitue le résultat du test. Cette procédure est répétée pour différentes orientations du chariot par rapport à la plate-forme, différentes hauteurs de la fourche et différents chargements. Mais, cette méthode expérimentale n'est pas satisfaisante puisqu'elle ne prend pas en compte l'influence des pneumatiques au cours de l'essai alors que la liaison sol/roue est un élément essentiel de la stabilité du véhicule.

En mai 2000, les représentants des états allemand, français et italien ont jugé les deux normes de sécurité des chariots EN 1459 [1] et EN 1726-1 [2], normes dites de type C², comme ne donnant pas présomption de conformité vis-à-vis de la directive Machines. Ces états ont alors émis des clauses de sauvegarde et le Comité européen de normalisation (CEN) a alors été mandaté pour élaborer une nouvelle procédure d'essai (norme) prenant mieux en compte les risques encourus en cas de renversement latéral.

Le groupe de normalisation CEN/TC150/WG11, constitué d'homologues européens³, de chercheurs de l'Université de Hambourg et des principaux fabricants européens de chariots élévateurs, œuvre dans le cadre du mandat du CEN et la nouvelle norme sera présentée d'ici la fin de l'année 2009. Elle concernera l'ensemble des engins électriques et thermiques de trois ou quatre roues ayant une capacité de levage inférieure ou égale à dix tonnes.

Dans la première partie de l'article nous décrivons la nouvelle procédure d'essai. Puis, nous présentons les résultats d'une campagne d'essais menée avec trois caristes professionnels et quatre chariots thermiques du marché. Dans la dernière partie, nous discutons les résultats de l'étude paramétrique concernant l'influence des paramètres de conception, de pneumatiques et de circulation sur le résultat de l'essai. Ces résultats sont utiles aux concepteurs pour améliorer leurs machines.

PRINCIPE DE LA PROCÉDURE D'ESSAI

À l'origine, l'Université de Hambourg avait eu l'idée de créer un test qui simulait une situation critique rencontrée couramment en entreprise. La prise d'un virage à angle droit dans une travée de paletiers, fréquente sur les plateaux logistiques et autres entrepôts de stockage, a servi de base à l'essai. La méthode devait garantir que le véhicule pouvait virer en toute sécurité dans un espace délimité aux dimensions standardisées.

La nouvelle procédure d'essai, qui ne se substitue pas à celle de la plate-forme, prévoit de réaliser des essais à pleine vitesse⁴, à droite et à gauche, lorsque la position latérale du centre de gravité n'est pas connue. Dans le cas contraire, seul le coté le plus défavorable est testé.

En pratique, le chariot, équipé de béquilles anti-renversement, s'élance en ligne droite pour atteindre sa vitesse maximale sur une piste plane avec un revêtement sain, ne comportant ni trou ni bosse. La fourche, positionnée à 30 cm du sol, n'est pas chargée pour se mettre dans les conditions les plus défavorables (pour cette hauteur de fourche). Le chariot pénètre dans le corridor qui définit l'entrée de la piste d'essai, cf. zones Ⓐ et Ⓑ sur la *Figure 1*. La largeur W_1 de ce couloir est calculée comme 1,5 fois la distance entre les deux roues avant du chariot testé. Entre les zones Ⓑ et Ⓒ le chariot doit braquer pour ensuite continuer dans la zone Ⓓ et, enfin, sortir de la piste par la zone Ⓔ, où le chariot peut freiner et s'immobiliser. Un essai est considéré comme valide si le critère, constitué des conditions suivantes, est satisfait :

■ le chariot n'a pas franchi les limites de la piste d'essai marquées en gras sur la *Figure 1*, à savoir les lignes 2, 3, 4, 5 et 8 ;

■ le conducteur a bien maintenu la pédale d'accélérateur enfoncée afin de conserver la vitesse la plus élevée possible ;

■ la ligne 6 ou 7 a bien été dépassée ;

■ la roue arrière intérieure au virage n'a pas décollé du sol.

La dernière condition du critère a été retenue pour des raisons pratiques. En effet, au cours de tels essais, la roue avant intérieure au virage décolle très régulièrement du fait de la présence d'un pivot situé entre le châssis et l'essieu du chariot. Si une observation basée sur le décollement de la roue avant avait été choisie, il aurait été beaucoup plus difficile d'obtenir des essais valides. De plus, le décollement de la roue arrière intérieure au virage est un des premiers signes visibles de la perte de stabilité.

La procédure débute avec une largeur de couloir W_2 non précisée mais suffisamment importante pour obtenir facilement 3 passages valides sur un nombre maximal de 20 (par exemple $W_2 = 8$ m pour un chariot de 2,5 tonnes de capacité de chargement). Les trois passages réussis, la largeur du couloir W_2 est diminuée de 50 cm et la procédure est ainsi répétée jusqu'à obtention de la plus petite valeur possible W_2 qui constitue le seuil de stabilité de la machine. Ce dernier correspond, en pratique, au virage à 90° que pourrait prendre le chariot élévateur avec le plus petit rayon de braquage, sans faire décoller la roue arrière intérieure.

Le projet de norme précise aussi les caractéristiques de la piste ainsi que certaines tolérances accordées sur la pente maximale, le coefficient de frottement entre les roues et la piste ainsi que sur le dimensionnement des béquilles anti-renversement. Ainsi, la masse totale des béquilles ne peut pas excéder 10 % de la masse du chariot et leur installation ne doit pas abaisser la position du centre de gravité du véhicule ainsi équipé, ce qui aurait pour effet d'augmenter la stabilité du véhicule.

¹ Cf. la norme ISO 22915-1 pour les considérations d'ordre général et les normes ISO 22915-1, ISO 22915-2 et ISO 22915-3 en fonction du type de machine.

² Normes produits de sécurité

³ HSE (Health and Safety Executive, Royaume-Uni) et du BG (BerufsGenossenschaft, Allemagne)

⁴ La vitesse maximale des chariots concernés par ce test peut varier de 8 à 24 km/h

FIGURE 1

Définition de la piste pour la procédure d'essai pour chariot élévateur

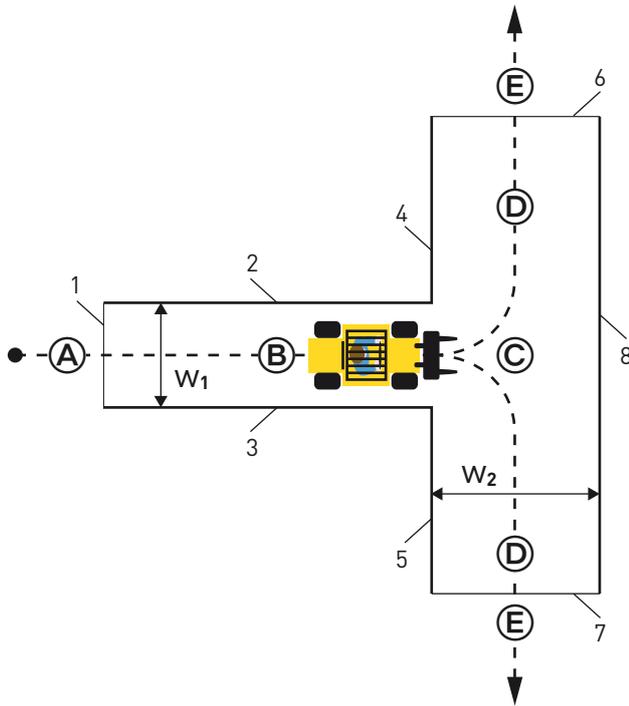


FIGURE 2

Chariots équipés de béquilles anti-renversement utilisés lors de la campagne d'essais



RÉSULTATS D'ESSAIS

Une campagne d'essais a été menée avec trois caristes professionnels et quatre chariots élévateurs du marché. Les objectifs de ces expérimentations étaient, d'une part, de déterminer les limites de stabilité de chaque chariot et, d'autre part, d'analyser la dispersion des résultats en fonction de chaque conducteur et de son expérience.

Parmi les trois caristes, le premier (cariste C₁) avait obtenu son CACES⁵ quelques semaines auparavant et n'avait que cinq jours de conduite à son actif. Les deux autres avaient acquis une réelle expérience en entreprise, respectivement de deux (cariste C₂) et cinq ans (cariste C₃).

Les chariots élévateurs utilisés pour les essais (Cf. Figure 2) étaient tous des engins à quatre roues équipés d'un moteur diesel et d'une capacité maximale de levage de 2,5 tonnes. L'un des chariots était équipé de pneumatiques gonflés, les autres de pneumatiques pleins (Cf. Tableau I).

Afin de vérifier les conditions de circulation au cours des essais, les chariots élévateurs étaient équipés d'un capteur permettant de mesurer la vitesse maximale atteinte en ligne droite, lors du passage dans la zone B, et d'un capteur de contact permettant de vérifier que la pédale d'accélérateur restait bien enfoncée tout au long du trajet. Deux personnes positionnées à proximité de la piste d'essai contrôlaient le décollement de la roue arrière, ainsi que les sorties de piste éventuelles lors des passages successifs du chariot.

Le Tableau II présente uniquement les résultats obtenus par les trois caristes pour les essais réalisés avec le chariot D lors d'un virage à droite. Ces séries d'essais ont été réalisées pour les quatre chariots étudiés. Les résultats finals pour tous les chariots sont synthétisés sur la Figure 3.

⁵ Certificat d'aptitude à la conduite en sécurité.

TABLEAU I

Synthèse des caractéristiques des chariots utilisés lors des essais

	Poids à vide (kg)	Capacité de levage (kg)	Pneumatiques	Vitesse max. (km/h)
Chariot A	3 550	2 500	Solide	18
Chariot B	3 530	2 500	Solide	22,5
Chariot C	4 240	2 500	Pneumatique	19
Chariot D	4 280	2 500	Solide	22

TABLEAU II

Synthèse des résultats obtenus par les trois caristes avec le chariot élévateur D

Caristes																			N° de l'essai		
C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1		C2	C3
																					20
																					19
																					18
																					17
																					16
																					15
																					14
																					13
																					12
																					11
																					10
																					9
																					8
																					7
																					6
																					5
																					4
																					3
																					2
																					1
9 m			8,5 m			8 m			7,5 m			7 m			6,5 m			6 m			← W2

- Essai valide de la série pour un W₂ donné (rappel : il faut 3 essais valides pour passer à la largeur W₂ inférieure).
- Essai avec sortie de trajectoire ou relâchement de la pédale d'accélérateur ou zone ⓔ non atteinte.
- Essai conduisant au décollement de la roue arrière intérieure au virage.

L'analyse des résultats du *Tableau II* conduit aux remarques suivantes :

■ les deux caristes les plus expérimentés (C₂ et C₃) ont obtenu un meilleur résultat (W₂ = 6,5 m) que le cariste débutant C₁ (W₂ = 7 m), tout en limitant le nombre d'essais réalisés pour y parvenir. Toutefois, les écarts entre les deux groupes de conducteurs sont de

l'ordre de la précision de détermination du critère ;

■ pour certaines largeurs de couloir, une adaptation est nécessaire au conducteur avant d'obtenir un passage valide. En effet, il semble indispensable au sujet d'acquiescer de nouveaux points de repère ainsi qu'un ajustement des angles et vitesses de braquage. Par

exemple, cette adaptation est clairement visible sur les essais menés à 6,5 m par le cariste C₂ pour lequel il aura fallu 12 essais avant de réussir un passage, puis deux encore, après deux nouveaux essais non valides.

L'intégralité des résultats acquis lors de la campagne d'essais pour les quatre chariots est reportée sur la *Figure 3*.

FIGURE 3

Synthèse des résultats W_2 obtenus par les trois caristes pour quatre chariots thermiques du marché

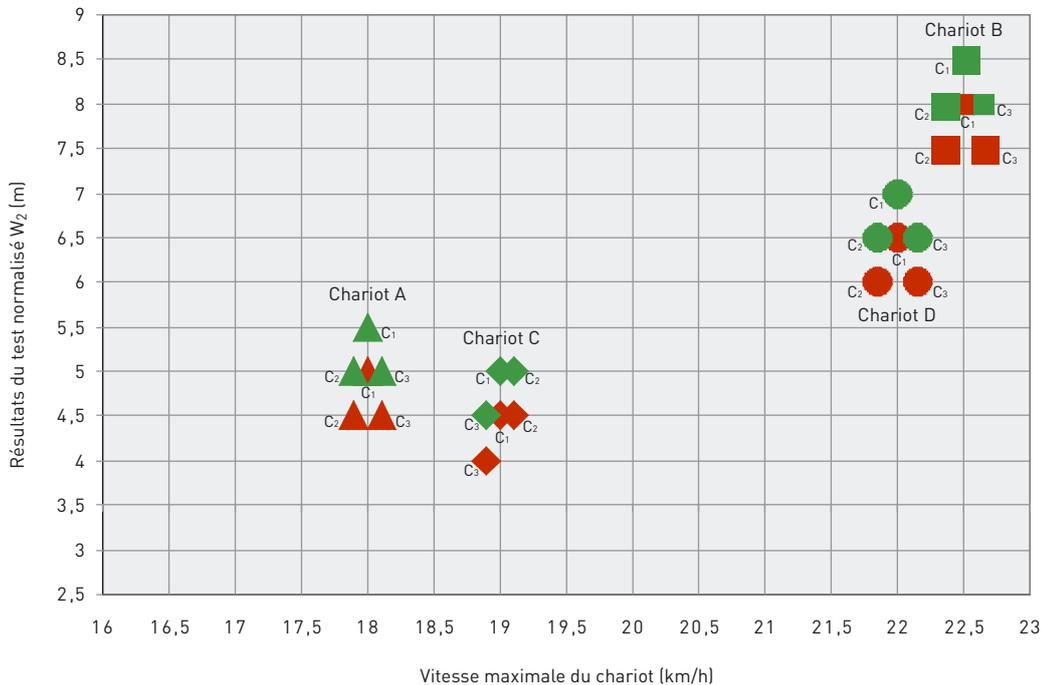
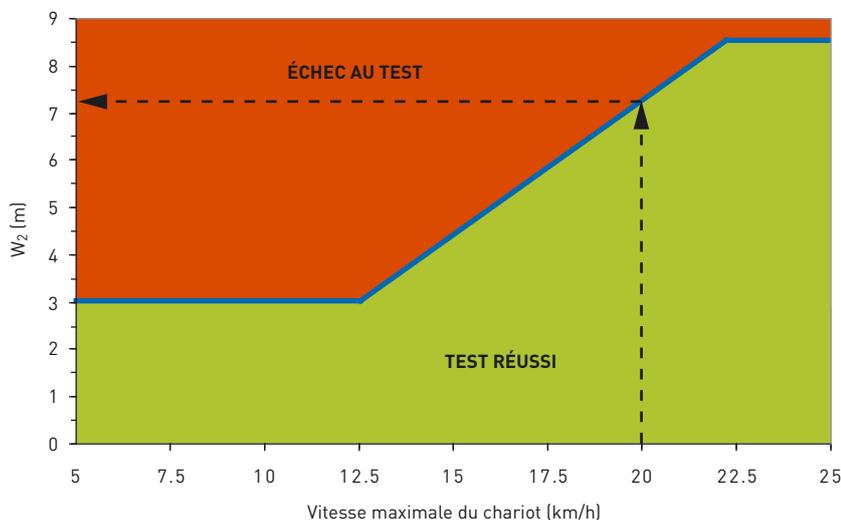


FIGURE 4

Proposition de gabarit de la courbe des valeurs limites de W_2



Les puces, comportant l'identifiant de chaque cariste (C_1 , C_2 et C_3), représentent la dernière largeur W_2 passée avec succès (puce verte) et celle où le cariste a échoué (puce rouge).

Ces essais ont notamment confirmé, d'une part, que la procédure permet de différencier un niveau de stabilité entre des chariots ayant une vitesse maximale équivalente (22 et 22,5 km/h). D'autre part, ils ont montré qu'un cariste expé-

rimementé risque moins le renversement qu'un novice.

Les partenaires du groupe de normalisation ont conduit d'autres essais avec des chariots électriques, des chariots à trois et quatre roues, ainsi qu'avec des véhicules d'une autre capacité de levage que 2,5 tonnes. Les résultats ont permis de compléter ceux déjà acquis (32 configurations ont été testées pour 18 chariots du marché) et d'établir la

courbe des valeurs limites présentée *Figure 4*. Celle-ci sert de base de travail pour que les fabricants puissent continuer à expérimenter la procédure.

Le dépouillement de l'ensemble des essais a aussi montré qu'il existait une dépendance entre le résultat W_2 et la vitesse maximale du chariot (Cf. *Figure 5*) confirmant, qu'en général, plus le véhicule à une vitesse maximale élevée, plus le résultat W_2 est élevé.

Le graphe de la *Figure 4* donne aux fabricants la valeur W_2 que doit passer chaque machine en fonction de sa vitesse maximale en ligne droite. Par exemple, un chariot qui circule à 20 km/h devra valider une largeur de couloir W_2 inférieure ou égale à 7,25 m.

La courbe des valeurs limites tient compte de la dépendance de W_2 vis-à-vis de la vitesse maximale des chariots entre 12,5 km/h et 22 km/h mais impose aussi deux paliers pour les vitesses inférieures à 12,5 km/h et celles supérieures à 22 km/h. Cette proposition, fruit d'un compromis entre les exigences des fabricants et celles des préventeurs, indique :

■ qu'en deçà d'une vitesse maximale de 12,5 km/h les risques de renversement sont considérés comme faibles

et que le résultat au test est de l'ordre du rayon de braquage minimum que peut prendre le chariot à vitesse lente, soit 3 mètres, ou moins ;

■ que le dernier palier impose aux fabricants une sévérité supplémentaire pour les engins les plus rapides du marché.

Pour l'instant, cette proposition permet de considérer la disparité des véhicules du parc de chariots existant et de ne pas exclure trop de véhicules déjà en service. Cette courbe des valeurs limites est sans doute appelée à évoluer au cours des mois à venir en fonction des nouveaux résultats acquis par les fabricants pour d'autres machines ou de nouveaux résultats de recherche des préventeurs.

INFLUENCE DE CERTAINS PARAMÈTRES SUR LE RÉSULTAT W_2

Dans cette partie, nous présentons les résultats d'une étude paramétrique menée pour estimer l'influence de paramètres tels que, la vitesse du chariot, la position du centre de gravité et certains paramètres du modèle de pneumatique, sur le résultat du test.

VITESSE

Nous avons montré que la vitesse était le paramètre le plus influant sur la stabilité : pour un rayon de courbure donné, plus la vitesse est élevée et plus le risque de renversement est élevé [3].

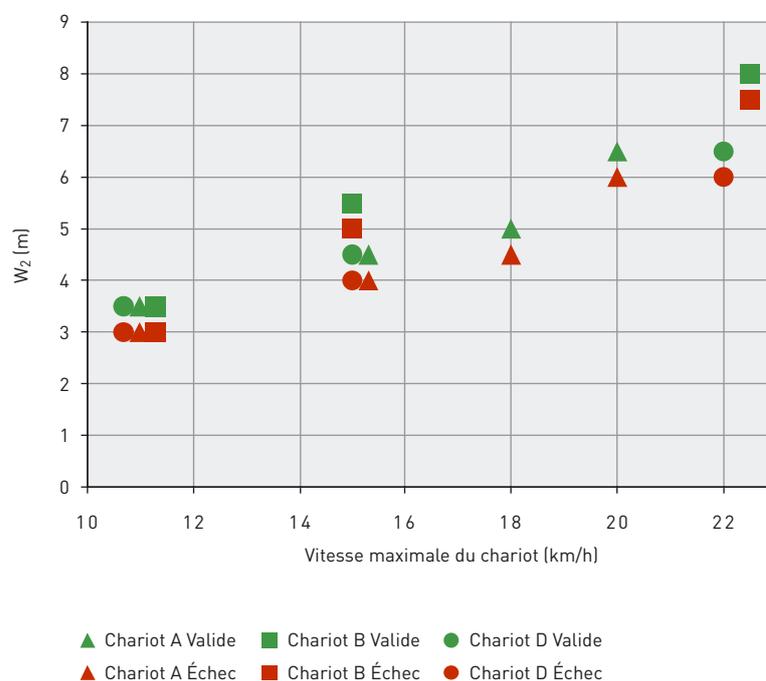
Nous avons confirmé expérimentalement cette tendance en réalisant des essais complémentaires avec trois des quatre chariots en prêt pour lesquels nous avons diminué (chariots A, B, D) ou augmenté (chariot A) la vitesse maximale. La *Figure 5* présente les différentes valeurs de W_2 obtenues lorsque la vitesse maximale des chariots, en plus de leur vitesse maximale nominale, est fixée à :

■ 20, 15 et 11 km/h pour le chariot A,

■ 15 et 11 km/h pour les chariots B et D.

FIGURE 5

Évolution du résultat W_2 du test lorsque la vitesse maximale des chariots A, B et D est modifiée



Une analyse des résultats pour chaque chariot montre :

■ qu'une réduction de 17 % (18 km/h à 15 km/h) de la vitesse d'exécution du test pour le chariot A conduit à une diminution de 10 % du résultat final ;

■ qu'une réduction de 30 % de la vitesse d'exécution du test des chariots B et D conduit à une diminution de 30 % du résultat final ;

■ que lorsque la vitesse d'exécution du test est égale à 11 km/h, aucun essai n'a conduit au soulèvement de la roue arrière intérieure au virage. Cela signifie que les essais non valides obtenus sont tous liés à des sorties de trajectoires.

Ces résultats expérimentaux montrent qu'une réduction modérée (vitesse restant supérieure à 11 km/h) de la vitesse maximale en ligne droite ne donnerait pas un meilleur résultat pour un chariot ne satisfaisant pas aux conditions de succès de la procédure d'essai. En effet, si la vitesse maximale est diminuée, la valeur W_2 à valider par le chariot ainsi modifié serait diminuée de la même proportion. Ainsi, si la conception même du chariot n'est pas modifiée, le chariot ne validera pas plus le test.

En revanche, si la réduction de la vitesse s'opère dans le virage (système d'assistance intelligent), le résultat est amélioré. En effet, nous avons réalisé des essais avec deux chariots électriques de plus petite catégorie, chacun équipé d'un système de réduction de vitesse dès qu'un virage est amorcé. Les chariots avaient des vitesses maximales en ligne droite de 16,5 et 14 km/h. Ils ont respectivement validé des largeurs W_2 de 2 m, ce qui équivaut à la largeur qu'ils auraient validée en régime quasi-statique.

CENTRE DE GRAVITÉ

Il est acquis que la hauteur du centre de gravité d'un véhicule joue un rôle important pour sa stabilité. C'est pour cette raison qu'un des objectifs des concepteurs de chariots élévateurs consiste à abaisser au maximum sa position.

Les essais réalisés avec les chariots B et D sont intéressants à analyser puisque ces véhicules ont une vitesse maximale équivalente (respectivement 22 et 22,5 km/h - Cf. *Figure 5*). Or, nous constatons, qu'à la vitesse maximale ou à la vitesse réduite de 15 km/h, le chariot B obtient une valeur W_2 supérieure d'un mètre, à celle du chariot D.

Ceci s'explique exclusivement par le fait que le centre de gravité de B est situé à quelques centimètres au-dessus de celui de D (les positions respectives des centres de gravité ont été déterminées expérimentalement par ailleurs).

En pratique, cela signifie qu'un chariot aura une meilleure stabilité latérale en circulant avec sa fourche à 30 cm du sol plutôt qu'à 150 cm ; c'est d'ailleurs ce qui est enseigné aux futurs caristes au cours de leur formation. La stabilité latérale du chariot est encore améliorée si la fourche (toujours à 30 cm du sol) est chargée d'une masse dont le centre de gravité est située en dessous de celui du chariot, non chargé.

PNEUMATIQUES

À l'aide d'un simulateur de conduite (Cf. Figure 6) développé par l'INRS et basé sur un modèle numérique validé [4], nous avons aussi étudié l'influence des pneumatiques sur le résultat W_2 du test en utilisant un jeu de paramètres correspondant à une monte de pneumatiques gonflés du commerce ([5] pour plus de détails sur le modèle de pneumatique utilisé). La procédure d'essai normalisée, reproduite à l'aide du simulateur, nous a permis de faire varier les valeurs de la raideur verticale, de la raideur de dérive et du coefficient de frottement du modèle. Ces paramètres ont varié en proportion de +/- 30 % de leur valeur nominale, sachant que les autres paramètres restaient inchangés lors de ces variations. Il est important de noter que les variations affectées aux paramètres impliqueraient en réalité une transformation importante, mais possible, de la conception du pneumatique. La configuration initiale utilisant les paramètres nominaux du modèle de pneumatique ont conduit à un résultat égal à $W_2 = 5$ m, ce qui constitue la valeur de référence pour un virage à droite.

Après avoir réalisé virtuellement l'ensemble des séries d'essais, les résultats montrent que le paramètre le plus sensible est le coefficient de frottement. Lors d'une augmentation ou d'une diminution de 30 % de la valeur nominale de ce paramètre, le résultat du test est passé de 5 à 6 m. Lorsque le coefficient de frottement augmente, l'adhérence latérale augmente et le pneumatique a alors plus « d'accroche », favorisant ainsi le renversement de l'engin. La condition de décollement

FIGURE 6

Vue extérieure du simulateur de conduite développé par le laboratoire MSMP de l'INRS (à gauche). Représentation de la simulation d'un essai normalisé à l'aide du simulateur (à droite)



de la roue arrière intérieure au virage est alors souvent remplie. Dans l'autre cas, si l'adhérence latérale est diminuée (comme sur de la neige ou de la glace), les efforts d'interaction entre le sol et chacune des roues sont faibles et le chariot a tendance à glisser latéralement, ce qui détériore sa tenue de route mais limite les risques de renversement. Ceci explique pourquoi le critère de franchissement des limites de la trajectoire est très souvent atteint.

Pour les autres configurations testées, lorsque la raideur verticale ou la raideur de dérive est diminuée de 30 %, les essais ont conduit à une limite de stabilité égale à $W_2 = 5,5$ m. L'influence de ces paramètres est donc plus faible (du même ordre que celle estimée entre un conducteur expérimenté et un novice).

Enfin, une augmentation de 30 % de la raideur verticale ou de la raideur de dérive ne modifie pas le résultat du test, soit $W_2 = 5$ m.

Cette analyse de sensibilité illustre clairement que le coefficient de frottement du pneumatique peut avoir une influence non négligeable sur le résultat obtenu. Le choix des pneumatiques peut être alors déterminant sur la stabilité du chariot.

SYSTÈMES INTELLIGENTS D'ASSISTANCE À LA CONDUITE

Parmi les systèmes existants et disponibles sur le marché, nous avons testé le réducteur de vitesse instantanée (implanté uniquement sur certains chariots électriques) et le système de

verrouillage de la liaison pivot entre le châssis et l'essieu arrière.

Concernant le réducteur de vitesse, celui-ci s'active lors d'un braquage et consiste simplement en une diminution de la vitesse instantanée du chariot en fonction de l'angle de braquage. Nous avons testé deux chariots électriques équipés de cette technologie. Ils ont conduit à une valeur W_2 égale à 2 m. Ce résultat est comparable à un essai réalisé à très faible vitesse. Cela signifie que, dans les conditions du test, ce système est performant et que la réduction de vitesse opérée au cours du virage réduit grandement les risques de renversement de la machine. Malheureusement, l'adaptation de cette technique aux chariots thermiques n'est pas aisée, ce qui limite pour l'instant les possibilités offertes aux chariots électriques.

Nous avons aussi testé un chariot équipé du système de blocage de la liaison pivot entre le châssis et l'essieu arrière. Le verrouillage de la liaison intervient lorsqu'une situation critique de renversement est imminente (estimation faite à partir de données provenant de capteurs embarqués). Il a pour effet de modifier le polygone de sustentation du véhicule ce qui permet un gain de stabilité : passage d'un triangle de stabilité lorsque le pivot arrière est libre à un quadrilatère de stabilité lorsque celui-ci est bloqué. Ainsi, avec le système activé, la limite W_2 validée par le chariot a été réduite d'un mètre (signe d'une stabilité améliorée) par rapport à la limite atteinte lorsque le système était désactivé. Toutefois, lors de l'exécution des essais avec le système activé, plusieurs renversements partiels ont été obtenus.

SYNTHÈSE

Pour les chariots dont le résultat de la procédure d'essai ne se situe pas en dessous de la courbe seuil, il y a au moins trois solutions pour rendre le véhicule plus stable :

■ revoir la conception de la machine par la baisse de la hauteur du centre de gravité. Cette solution semble difficilement adaptable aux machines du parc actuel mais possible pour les futurs chariots pour lesquels des changements importants peuvent être envisagés. Un gain de stabilité supplémentaire peut encore être obtenu en équipant la machine de pneumatiques aux caractéristiques optimisées, notamment son coefficient de frottement ;

■ réduire drastiquement la vitesse maximale de circulation jusqu'à atteindre une vitesse critique pour laquelle la condition de décollement de la roue arrière ne peut plus être atteinte (vitesse inférieure à 11 - 12 km/h pour les chariots testés). Dans ce cas, les risques de renversement sont largement réduits mais la machine est pénalisée sur sa vitesse, et donc potentiellement sur ces performances de production (à confirmer toutefois en fonction des modes d'organisation de l'activité, de la taille des entrepôts...);

■ implanter un système intelligent qui permettrait de modifier momentanément les conditions de circulation ou de conception de la machine de manière à accroître sa stabilité. Cette solution est très intéressante car les risques de renversement peuvent être nettement diminués lorsque le système est activé tout en conservant une vitesse de circulation importante en ligne droite. Toutefois, une analyse globale de l'impact de ces systèmes sur le fonctionnement du chariot devrait être envisagée pour confirmer cette approche.

CONCLUSION

En 2000, faisant suite à une clause de sauvegarde déposée par 3 états européens, un groupe de travail a été formé afin d'élaborer une nouvelle procédure d'essai dynamique permettant d'estimer la stabilité des chariots élévateurs prenant en compte les phénomènes dynamiques. Les travaux réalisés conjointement par l'INRS et l'Université de Hambourg avec la collaboration des principaux fabricants de chariots européens ont débouché sur une procédure expérimentale permettant de créer des conditions amenant au renversement latéral de l'engin (sécurisé par des béquilles anti-renversement). L'objectif des travaux encore en cours est de réduire les accidents liés au renversement latéral des chariots élévateurs. En effet ces engins de manutention sont responsables, en moyenne, de 8 300 accidents avec arrêt de travail par an, parmi lesquels 10 salariés sont tués.

Nos essais sur piste, avec 3 caristes professionnels et 4 chariots du marché, auxquels s'ajoutent les résultats de l'Université de Hambourg et des fabricants européens, ont permis de faire une première proposition pour définir la courbe des valeurs seuil en dessous de laquelle doit se situer chaque chariot testé. Cette courbe dépend exclusivement de la vitesse maximale en ligne droite du chariot et offre l'avantage d'être commune à l'ensemble des engins du marché (3 et 4 roues, thermique ou électrique) ayant une capacité de levage jusqu'à 10 tonnes.

À partir des données acquises lors des essais, mais aussi à l'aide de calculs réalisés avec un simulateur de conduite développé par l'INRS, une analyse

paramétrique a été effectuée. Elle a permis de déterminer les paramètres influents sur le résultat de la procédure d'essai. Nous avons ainsi montré qu'un cariste expérimenté pouvait obtenir un meilleur résultat au test et qu'il risquait donc moins le renversement latéral qu'un novice, confirmant de nouveau l'importance de la formation de ce personnel. Nous avons aussi confirmé qu'une diminution de la hauteur du centre de gravité permettait un gain de stabilité et montré le rôle de la vitesse maximale sur la stabilité des chariots élévateurs.

L'influence de certains « paramètres pneumatiques » a aussi été étudiée. Ainsi une augmentation ou une diminution de 30 % du coefficient de frottement a provoqué une augmentation significative (+ 20 %) de la limite de stabilité par rapport à la situation nominale. Ces derniers éléments illustrent clairement l'importance des pneumatiques dans les conditions de stabilité des chariots élévateurs, importance pratiquement occultée dans le test de stabilité dit « de la plateforme » qui constitue l'unique test encore imposé aujourd'hui par la norme.

La mise au point d'une nouvelle procédure d'essai dynamique permettra, à moyen terme, d'estimer la stabilité des engins dans des conditions dynamiques représentatives d'un usage réaliste et d'aider les fabricants à améliorer la conception de leurs véhicules pour les rendre plus stables.

Reçu le : 24/11/2008
Accepté le : 20/04/2009

POINTS À RETENIR

- Une nouvelle procédure d'essai dynamique normalisée pour chariot élévateur sera présentée à la fin de l'année 2009 au CEN. Elle permettra de qualifier la stabilité dynamique des chariots élévateurs d'une capacité de levage jusqu'à 10 tonnes.
- Un cariste formé et expérimenté risque moins le renversement latéral qu'un novice, confirmant de nouveau l'importance de la formation du personnel.
- Plus le centre de gravité d'un véhicule est près du sol, meilleure est sa stabilité. Il est en particulier recommandé de circuler avec la fourche positionnée entre 15 et 30 cm du sol.
- Aborder un virage en réduisant sa vitesse permet de réduire le risque de renversement latéral.
- Les pneumatiques jouent un rôle important sur la stabilité du chariot élévateur. La procédure d'essai élaborée permet d'en tenir compte.

POUR EN SAVOIR PLUS

Afin de réduire la gravité mais aussi le nombre des accidents liés aux chariots élévateurs, l'INRS a travaillé dans le cadre d'un projet nommé CEMaMo (Conception ergonomique des machines mobiles) dans le but de trouver des solutions pour améliorer :

- l'organisation et la réalisation du travail des salariés,
- l'aménagement des locaux,
- la formation des caristes,
- la conception des machines,
- les systèmes de retenue des conducteurs,
- les normes.

Pour en savoir plus concernant ce projet vous pouvez consulter le site de l'INRS : www.inrs.fr.

Les fiches pratiques de sécurité ED 125 (à destination des préventeurs) ainsi que l'ED 979 qui sensibilise les caristes au risque de renversement latéral sont aussi consultables sur le site de l'INRS.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Safety of industrial truck. Self-propelled variable reach truck. EN 1459. December 1999.

[2] Safety of industrial trucks. Self-propelled trucks to and including 10 000 kg capacity and industrial tractor with a drawbar pull up and including 20 000 N. Part 1 – General requirements. EN 1726-1. May 1999.

[3] REBELLE J. – Parametrical analysis of the dynamic behaviour of the forklift truck and conditions of its tip-over. 14th International Conference Vehicle Dynamics. 20-21 June 2007. École centrale de Lyon. Lyon, France.

[4] REBELLE J., MISTROT P., POIROT R. – Development and validation of a numerical model for predicting forklift truck tip-over. Vehicle System Dynamics. <http://www.informaworld.com> - DOI: 10.1080/00423110802381216. 2008.

[5] PACEJKA H. B. – Tyre and vehicle dynamics. Butterworth Heinemann. 2002. 627 p.