

- Engin
- Visibilité
- Détection
- Piéton
- Conduite de véhicule

► Jacques MARSOT,
INRS, département Ingénierie des équipements de travail

VISIBILITY AND PREVENTION OF MOBILE PLANT-PEDESTRIAN COLLISIONS – A BIBLIOGRAPHICAL ANALYSIS

Preventing collisions between mobile plants and pedestrians is a problem area that concerns different activity sectors, in particular building and civil engineering, handling, waste collection and transport/logistics. In each of these sectors, the potential problem of a collision arises when there is proximity between man and mobile machinery.

After defining what we mean by “visibility”, this paper firstly demonstrates why this characteristic is an essential factor in preventing mobile plant – pedestrian collisions. The regulatory and normative approaches applicable to earthmoving machines, forklift trucks and road haulage vehicles are then introduced and discussed in relation to a bibliographical analysis of this subject. It is thereby revealed that these approaches do not sufficiently consider driver visual activity in all possible work situations. To overcome these limits, many research studies propose assessment methodologies based on measuring equipment that is ever more sophisticated with time, but little of which addresses performance criterion definition.

Other studies were based on developing and assessing technical solutions designed to ensure the appropriateness of the visibility provided by a mobile machine to its operating context. Whilst rear view and other mirrors have been long used to ensure visibility, it is observed that camera-monitor systems are playing an ever greater part in this area. A number of studies reveal the potential advantage of these systems, whilst others emphasise their limits especially from a cognitive standpoint: driver difficulty in dividing his attention amongst several information sources.

- Mobile machine
- Visibility
- Detection
- Pedestrian
- Vehicle driving

VISIBILITÉ ET PRÉVENTION DES COLLISIONS ENGIN-PIÉTONS

Analyse bibliographique

La prévention des collisions entre des engins mobiles et des piétons est une problématique qui concerne différents secteurs d'activité : BTP, manutention, collecte des déchets, transport/logistique notamment. Dans chacun d'eux, le problème potentiel de la collision se pose dès lors qu'il existe une proximité entre l'homme et les engins mobiles.

Après avoir défini ce que l'on entend par « visibilité », cet article montre, dans un premier temps, en quoi cette caractéristique est un élément essentiel pour la prévention des collisions engins-piétons.

Dans un second temps, les approches réglementaires et normatives applicables aux engins de terrassement, aux chariots de manutention et aux camions de transport sont présentées puis discutées au regard d'une analyse bibliographique sur ce sujet. Il est ainsi mis en évidence qu'elles ne prennent pas suffisamment en compte l'activité visuelle des conducteurs dans toutes les situations de travail possibles. Afin de pallier ces limites, de nombreux travaux proposent des méthodologies d'évaluation basées sur des équipements de mesure de plus en plus évolués au fil du temps, cependant peu abordent la définition des critères de performance.

D'autres travaux portent sur le développement et l'évaluation de solutions techniques visant à mettre en adéquation la visibilité offerte par un engin à son contexte d'utilisation. Les rétroviseurs et les miroirs sont depuis longtemps utilisés à cet effet et l'on constate que les systèmes caméras-écrans prennent une part de plus en plus importante dans ce domaine. Si plusieurs études montrent l'intérêt potentiel de ces dispositifs, d'autres en soulignent les limites, notamment du point de vue cognitif : difficulté pour un conducteur de distribuer simultanément son attention sur plusieurs sources d'information.

Les accidents par écrasement de personnes travaillant à proximité d'engins mobiles (engins de chantier, chariots de manutention, camions routiers, etc.) restent encore trop nombreux malgré les progrès techniques accomplis sur les matériels neufs et les formations dispensées auprès des conducteurs. Sur ces 10 dernières années, ce sont plus de 200 accidents qui ont été constatés, plus de la moitié mortels [1].

Pour prévenir ce type de risque, les premières mesures de prévention à mettre en place sont de nature organisationnelle. Il s'agit par exemple de séparer les zones de circulation des engins de celles des piétons [2, 3]. Néanmoins, il subsistera toujours des situations de travail pour lesquelles la co-activité ou la proximité entre les piétons et les engins ne peut être évitée. Dans ces conditions, c'est à partir des informations visuelles qu'il va prélever dans son environne-

ment qu'un conducteur d'engin va décider d'une stratégie de conduite afin de prévenir les risques de collision avec des personnes, ou des engins, évoluant dans le même espace de travail. La visibilité au poste de conduite est donc un élément primordial pour la prévention de ce type d'accident, et nous présentons dans cet article les résultats d'une analyse bibliographique sur ce sujet ; mais tout d'abord, il est nécessaire de bien distinguer la notion de « visibilité » de celle du « champ de vision ».

CHAMP DE VISION ET VISIBILITÉ

La recherche de la part du conducteur d'informations visuelles dans son environnement fait appel à deux notions complémentaires mais néanmoins distinctes : le champ de vision et la visibilité. En effet, pour qu'un élément de l'environnement (piéton, par exemple) soit vu par le conducteur d'un engin, il faut qu'il soit dans son champ de vision et qu'il soit visible, donc non masqué par un autre élément pouvant appartenir à l'engin lui-même.

Le champ de vision (ou champ visuel) est une des caractéristiques du système visuel humain. Sans vouloir entrer dans les détails, il correspond pour un œil à l'ensemble de tous les points (objets, surfaces) de l'espace qui sont vus simultanément par cet œil. Du point de vue géométrique, il peut être assimilé à une forme plus ou moins conique et, selon que l'on s'intéresse à un ou aux deux yeux, il est qualifié de :

- monoculaire : zone perçue par un seul œil (cf. Figure 1).

- binoculaire : zone couverte par les 2 yeux correspondant à la perception du relief.

- ambinoculaire : zone perceptible par l'un ou l'autre œil.

- cyclopéen : approximation basée sur un champ de vision défini pour un œil fictif situé au centre du segment inter pupillaire. Il ne doit pas être utilisé lorsque l'objet observé est proche de l'œil (< 500 mm) car dans ce cas la distance interpupillaire, qui est de l'ordre de 65 mm, ne peut pas être négligée.

La visibilité, ou plus précisément la visibilité offerte par le véhicule à son

FIGURE 1

Illustration des différentes notions de champ de vision dans les plans horizontal (gauche) et sagittal (droite)

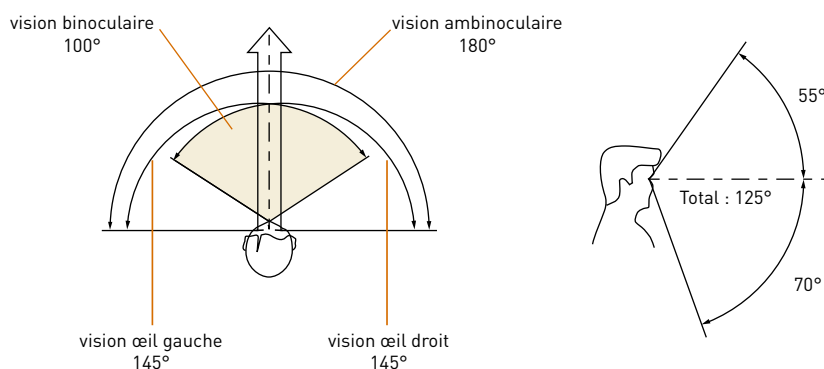
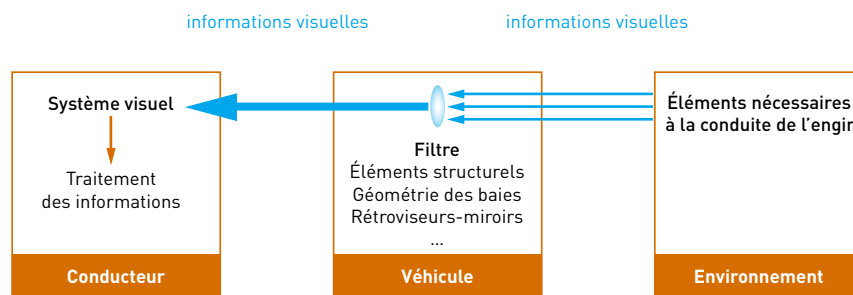


FIGURE 2

Illustration du système conducteur/véhicule/environnement par rapport à la visibilité (d'après [4])



conducteur, est un attribut du véhicule. Elle est en effet caractérisée par son architecture (carrosserie, garnitures, éléments du poste de conduite,...) qui se comporte du point de vue des informations visuelles comme un filtre, voire un masque, entre l'environnement et les yeux du conducteur (cf. Figure 2).

La visibilité¹ peut également être qualifiée de directe ou indirecte selon que le conducteur observe les éléments extérieurs directement au travers des ouvertures et des surfaces vitrées de l'engin ou par l'intermédiaire de miroirs ou de tout autre système d'aide visuelle (système caméra - écran, par exemple).

Les deux notions de champ de vision et de visibilité sont donc complémentaires et d'importance égale dès lors que l'on s'intéresse à la prise d'informations visuelles de la part du conducteur d'un engin. Elles font cependant appel à des domaines d'expertise totalement différents : physiologie du système visuel humain et traitement cognitif des informations pour le champ de vision, ingénierie optique pour la visibilité.

Nous n'aborderons dans cet article que le sujet de la visibilité. Après un bref rappel de la problématique, nous présenterons les approches réglementaires et normatives relatives aux engins de terrassement, aux chariots de maintenance et aux camions de transport. Ces éléments seront ensuite discutés au regard d'une analyse de la bibliographie sur ce sujet.

L'INSUFFISANCE DE LA VISIBILITÉ : UN FACTEUR DE RISQUE

Malgré les progrès accomplis sur les machines mobiles récentes, il subsiste des facteurs de limitation de la visibilité du conducteur, notamment du fait d'éléments structurels. Certains de ces éléments

¹ Par souci de simplification, le terme « visibilité » sera utilisé pour désigner la « visibilité offerte par le véhicule à son conducteur ».

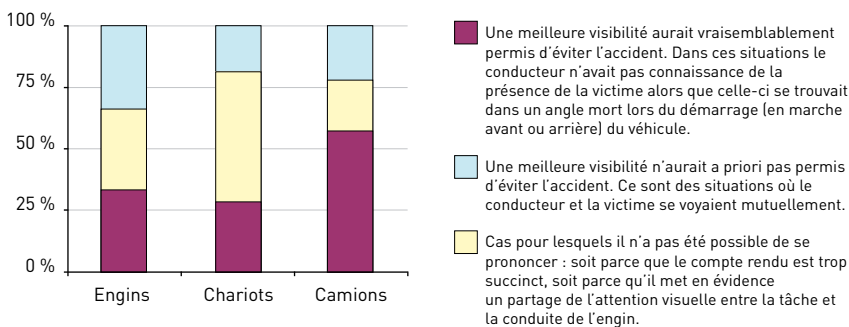
FIGURE 3

Illustration des postures prises par des conducteurs d'engins pour pallier un manque de visibilité



FIGURE 4

Estimation en pourcentage des accidents pour lesquels une meilleure visibilité aurait eu (ou non) une influence sur leurs survenues



ments sont d'ailleurs des éléments de sécurité comme les structures de protection contre le retournement de l'engin (ROPS²) ou contre la chute d'objets sur le conducteur (FOPS³). Les zones ainsi masquées, également dénommées « angles morts », peuvent changer en fonction des charges transportées, de la position et de la configuration de l'engin.

En conséquence, lorsque des informations visuelles nécessaires à la tâche ou à la conduite de l'engin se trouvent dans un de ces angles morts, le conducteur va chercher à les obtenir en adoptant des postures contraignantes, notamment des flexions et rotations prononcées du tronc et du cou [5 - 8] (cf. Figure 3). Au-delà des risques de pathologies dorsolombaires liées à ces postures inconfortables, l'insuffisance de visibilité est surtout un facteur de risque d'accidents pour :

■ les conducteurs eux-mêmes, qui peuvent ainsi se mettre en situation dangereuse du fait du masquage d'un obstacle, d'une déclivité, etc.,

■ les personnes évoluant à proximité de l'engin.

A titre d'exemple, si l'on reprend les comptes rendus d'accidents de la base EPICEA⁴ cités dans [1], la Figure 4 illustre la part respective de ceux qui, potentiellement, auraient pu (ou non) être évités si l'engin offrait au conducteur une visibilité parfaite. Pour les camions, elle est légèrement plus importante du fait de la prépondérance des accidents liés aux phases de mise à quai qui sont particulièrement dangereuses [9].

LA VISIBILITÉ : POINT DE VUE RÉGLEMENTAIRE ET NORMATIF

Du point de vue réglementaire, il faut distinguer les véhicules routiers⁵ au sens de la directive 70/156/CEE [10] et

les machines mobiles au sens de la directive dite « Machines » 2006/42/CE [11]. Les premiers sont exclus du champ d'application des secondes.

EXIGENCES DE VISIBILITÉ RELATIVES AUX VÉHICULES ROUTIERS

Les seules exigences en matière de visibilité directe pour les véhicules routiers sont celles définies par la directive 90/630/CEE [12] relatives aux véhicules dits légers (catégorie M1⁶). Cependant, afin d'améliorer la sécurité des usagers de la route, l'Union européenne a défini dans les directives 2003/97/CE [13] et 2007/38/CE [14] des dispositions complémentaires afin de réduire les angles morts des véhicules de transport de marchandises (catégorie N⁷). Ces directives donnent, en fonction des types de véhicules, des spécifications de conception, des prescriptions d'installation et des critères de performances des dispositifs de vision indirecte (retroviseurs, antéviseurs⁸, caméras/écran...).

Les critères de performance sont essentiellement définis par le dimensionnement de surface au niveau du sol. Les Figures 5 à 7 illustrent la définition des zones devant être couvertes par les retroviseurs extérieurs principaux, le retroviseur d'accostage côté passager et par l'antéviseur pour les véhicules de transport de marchandises ayant un poids maximal supérieur à 7,5 tonnes (catégories N2 et N3).

² ROPS : Roll-over protection structures.

³ FOPS : Falling-object protective structures.

⁴ EPICEA : Etude de prévention par informatique des comptes rendus d'enquêtes d'accidents du travail.

⁵ Véhicule à moteur destiné à circuler sur route, avec ou sans carrosserie, ayant au moins quatre roues et une vitesse maximale par construction supérieure à 25 km/h, ainsi que ses remorques, à l'exception des véhicules qui se déplacent sur rails, ainsi que des tracteurs et machines agricoles.

⁶ Catégorie M1 : véhicules à moteur de poids maximal excédant 1 tonne et affectés au transport de personnes comportant, outre le siège du conducteur, huit places assises au maximum (directive 70/156/CEE).

⁷ Catégorie N : véhicules à moteur affectés au transport de marchandises et ayant soit au moins quatre roues, soit trois roues et un poids maximal excédant 1 tonne (directive 70/156/CEE).

⁸ Antéviseur : miroir à l'avant de la cabine découvrant le pare-chocs avant pour voir les piétons devant le véhicule.

EXIGENCES DE VISIBILITÉ RELATIVES AUX MACHINES MOBILES

Dès lors qu'ils ne sont pas destinés à circuler sur route, les véhicules tels que les engins de terrassement ou les chariots de manutention entrent dans le champ d'application de la directive dite « Machines ».

Contrairement à celles relatives aux véhicules routiers, cette directive ne donne pas de spécifications de conception détaillées en matière de visibilité mais elle fixe les objectifs à atteindre au travers d'Exigences Essentielles de Sécurité (EES), à savoir :

■ la visibilité depuis le poste de conduite doit être telle que le conducteur puisse en toute sécurité, pour lui-même et pour les personnes exposées, faire fonctionner la machine et ses outils dans les conditions d'utilisation prévisibles. En cas de besoin, des dispositifs appropriés doivent remédier aux risques résultant de l'insuffisance de la vision directe (EES 3.2) ;

■ l'implantation du poste de travail des machines doit permettre la surveillance maximale des trajectoires des éléments en mouvement, afin d'éviter toute collision avec des personnes, du matériel ou d'autres machines fonctionnant simultanément, qui pourraient présenter un danger (EES 4.1.2.7).

C'est dans les normes européennes, qui viennent en appui de cette directive, que les fabricants d'engins vont pouvoir trouver les spécifications techniques détaillées leur permettant d'atteindre ces objectifs. Ainsi la norme NF EN 474-1 [15], relative aux prescriptions générales de sécurité pour les engins de terrassement, renvoie, pour la visibilité directe et indirecte, aux normes NF ISO 5006 [16] et ISO 14401-1/2 [17-18]. Elles définissent les méthodes d'évaluation et les critères de performance attendus en fonction des types d'engins ainsi que des spécifications de conception et des prescriptions d'installation des rétroviseurs et des miroirs de surveillance⁹. De même, les projets de normes Pr NF EN 15830 [19] et Pr NF ISO 13564-1 [20] sont relatifs aux chariots à portée variable tout terrain et aux chariots de manutention automoteur de capacité allant jusqu'à 10 tonnes.

Bien qu'il y ait des différences entre ces textes normatifs, le principe général d'évaluation de la visibilité reste le même. Il consiste à mesurer les ombres portées par les éléments de structure de

FIGURE 5

Champ de vision des rétroviseurs extérieurs principaux (classe II)

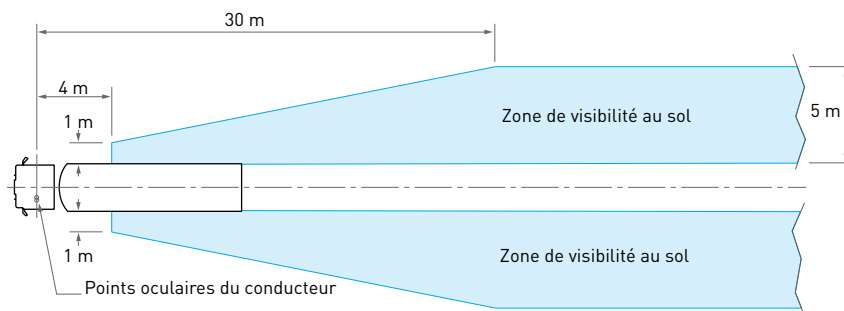


FIGURE 6

Champ de vision d'un rétroviseur d'accostage (classe V)

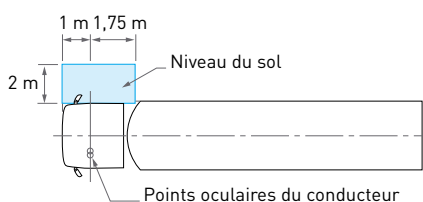
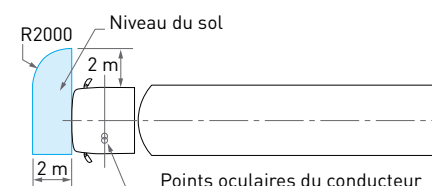


FIGURE 7

Champ de vision d'un antéviseur (classe VI)



l'engin lorsqu'ils sont illuminés par des lampes¹⁰ placées à l'emplacement des yeux du conducteur¹¹. Si, par défaut, l'écartement de ces lampes est de 65 mm afin de correspondre à l'écart inter-pupillaire moyen, il peut atteindre 405 mm (NF ISO 5006 et Pr EN 15830) ou 450 mm (Pr EN 13564) pour tenir compte des possibilités de mouvement de la tête et du tronc du conducteur.

Pour les normes NF ISO 5006:2007 et Pr EN 15830:2010, ce relevé se fait essentiellement de façon linéaire au niveau du sol sur un cercle de 12 m de rayon, ainsi qu'à 1 m 50 du sol sur un contour rectangulaire à 1 m de l'engin (cf. Figure 8). Cette hauteur de 1 m 50 correspond à la taille des plus petites personnes susceptibles de se trouver sur une zone de travail (5° percentile féminin).

Par type d'engin et secteur de visibilité, un nombre de masquages autorisés est défini, avec pour chacun un écartement des lampes tenant compte des possibilités de mouvement du conducteur. Sans rentrer dans le détail, les zones de masquage retenues sont celles qui, sur ces 2 périmètres de référence, sont supérieures à 300 mm. Cette distance représente l'épaisseur moyenne du buste d'une personne.

Le projet de norme ISO 13564-1:2007 relatif aux chariots de manutention auto-

moteurs se distingue des précédents textes car il prévoit un relevé surfacique des zones de masquage, par exemple sur un parallélogramme rectangle (1 m 20 x 0,5 m x 0,5 m) également dénommé « mannequin d'essai », que l'on déplace selon des trajectoires parallèles ou perpendiculaires à l'axe du chariot de manutention afin de simuler des déplacements rectilignes et des manœuvres. Onze configurations de test sont ainsi définies et, pour chacune d'elle, un pourcentage minimal de surface masquée est spécifié. Par exemple, pour les tests avec le mannequin d'essai censé représenter une personne, au moins 20 % de la surface verticale et 50 % de la surface horizontale doivent être visibles tout au long des trajectoires prévues.

Il faut également noter que les projets de normes ISO 13564-1:2007 et EN 13850:2010 ont des exigences complémentaires sur la visibilité des fourches ou de la plate-forme de charge des chariots concernés. Il n'y a pas d'équivalent pour les engins de terrassement.

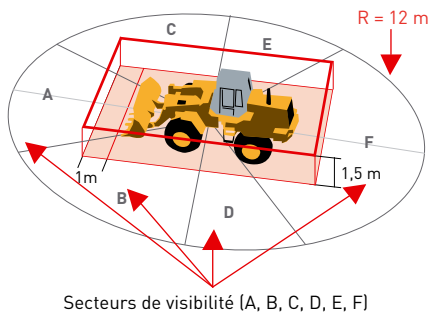
⁹ Les rétroviseurs permettent d'accroître la visibilité sur les côtés ou vers l'arrière d'un engin. Les miroirs de surveillance donnent une visibilité sur une zone particulière (Pr ISO 1440-1).

¹⁰ Lampes halogènes ou équivalent de 50 watts.

¹¹ Pour plus de détails, se reporter au texte intégral des normes en question.

FIGURE 8

Illustration des périmètres de mesure des masquages pour les normes NF ISO 5006:2007 et pr EN 13850:2010



système de lampe, etc.), plusieurs critiques ont été faites à ces approches.

La première porte sur l'absence, ou le manque de prise en compte, de la visibilité verticale. Les prescriptions normatives sont en effet principalement orientées vers la prévention des collisions avec des personnes ou des obstacles lors de phases de démarrage ou de manœuvre à vitesse réduite (relevé des zones de masquage entre 0 et 1 m 50 du sol). Il n'y a, par exemple, aucune prescription de visibilité vers le haut, permettant de voir le débattement complet

début des années 1990 [22], au télémètre laser [23, 24], puis à des techniques de mesure de luminance [25].

Parallèlement à l'évolution de ces méthodes expérimentales, d'autres travaux ont porté sur le développement de méthodes numériques. À partir d'une modélisation en 3D de l'environnement vu du poste de conduite de l'engin, des algorithmes de lancer de rayons (ray-tracing) développés spécifiquement, ou déjà intégrés dans des logiciels existants (infographie, mannequins numériques), permettent d'établir une cartographie de la visibilité directe et indirecte de l'engin en question. Les techniques de réalité virtuelle, qui permettent d'immerger un conducteur réel dans un modèle numérique de cabine, commencent également à être exploitées dans ce domaine [26, 27].

Ces méthodes numériques présentent l'avantage de pouvoir être utilisées :

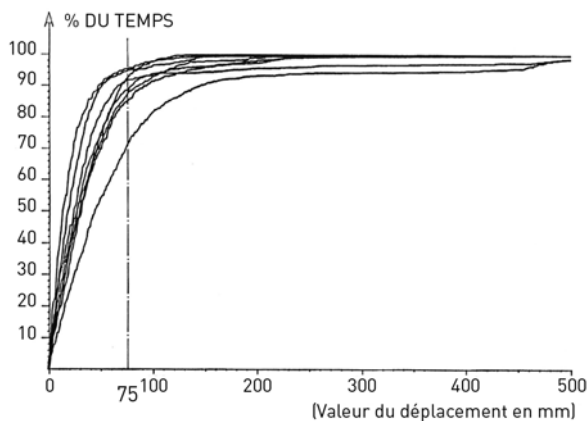
- en conception, pour évaluer la visibilité d'engins, qui dans certains cas n'existent pas encore, à partir de leur dossier de conception. Le NIOSH¹² a ainsi fait établir la cartographie de différents engins de chantiers par simulation à partir de leur modèle CAO¹³ et du logiciel d'infographie MayaTM [28, 29]. D'autres travaux ont porté sur l'utilisation de logiciels de mannequins numériques (JackTM, HumanTM, SammieTM, HumancadTM) pour identifier les paramètres de conception ayant un impact sur la visibilité d'engins miniers de type LHD¹⁴ [30], de chariots élévateurs [31, 32], de camions [33] ou de tracteurs agricoles [34] ;

- en exploitation, pour évaluer l'impact sur la visibilité des modifications apportées sur des engins en service : ajout d'accessoires dans le poste de conduite ou d'un nouvel outil de travail, surfaces vitrées plus ou moins propres, présence d'éclats ou de fissures, d'auto-collants. Dans ce cas, le modèle de l'environnement est obtenu par numérisation de l'engin en question. Là encore, les méthodes proposées évoluent avec l'état de la technique. Alors que l'IRSST¹⁵ proposait début des années 90 une numérisation par points [35], les travaux plus récents utilisent des lasers à balayage [24, 33] ou de la photogrammétrie [34].

Il faut toutefois noter que la plupart de ces travaux se limitent à des démonstrations de faisabilité. Les seuls qui ont réellement fait l'objet d'une évaluation comparative avec les méthodes normali-

FIGURE 9

Déplacement moyen de la tête pour chaque sujet d'après [21].



Que ce soit pour les engins de terrassement ou les chariots de maintenance, si les performances de visibilité ne peuvent pas être satisfaites de façon directe, il est alors admis d'avoir recours à des dispositifs supplémentaires (miroirs, caméras, etc.) pour les atteindre de façon indirecte. En complément, et uniquement pour les engins de terrassement, la norme ISO 14401-2 définit des critères supplémentaires de visibilité indirecte. Ce sont des champs latéraux et/ou arrière qui doivent être visibles par l'intermédiaire des rétroviseurs miroirs ou autres dispositifs d'aide visuelle (système caméra-écran, par exemple).

LA VISIBILITÉ : ANALYSE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

Dans la littérature, de nombreuses publications proposent des améliorations à ces approches normatives (notamment à celle de l'ISO 5006, plus ancienne et publiée courant des années 1990, les autres étant encore à l'état de projet). En effet, au-delà des difficultés expérimentales (nécessité d'un local sombre, positionnement de l'engin et du

des fourches d'un chariot élévateur ou du godet d'une pelleteuse.

La seconde concerne l'écartement maximal des lampes simulant les yeux du conducteur. En se basant sur des résultats d'analyses d'activité, F. HELLA et al. de l'INRS [21] ont montré que les mouvements latéraux de la tête des conducteurs de chariots élévateurs sont en moyenne inférieurs à +/- 75 mm, soit un écartement de 150 mm (cf. Figure 9), alors que le projet de norme EN ISO 13564-1:2007 prévoit un écartement maximal de 450 mm.

Enfin, la frontière entre une zone éclairée et une zone masquée n'est pas toujours facilement identifiable. De ce fait, le relevé des zones de masquage est pour partie subjectif.

Afin de pallier ces défauts, plusieurs méthodes d'évaluation surfacique de la visibilité sont proposées dans la littérature. Elles sont basées sur l'utilisation d'équipements de mesure de plus en plus performants au fil du temps. On est ainsi passé de l'appareil photographique grand angle, proposé par l'INRS

sées sont ceux de l'INRS et de CHOI et al. de l'université d'Anjou (Corée).

Début des années 1990, la méthode planimétrique proposée par l'INRS a été comparée à celle de l'ISO 5006 sur 15 modèles de pelles hydrauliques et 9 modèles de compacteurs [22]. Les limites d'une évaluation basée sur un simple relevé linéaire au niveau du sol, comme le proposait alors cette norme, ont alors été mises en évidence.

Plus récemment (2010), dans le cadre d'une étude sur l'amélioration de la visibilité des chariots de manutention, CHOI et al. [31] ont, quant à eux, comparé les résultats obtenus selon le projet de norme ISO 13564-1 (évaluation surfacique) avec ceux issus, d'une part, d'une simulation numérique et, d'autre part, d'une expérimentation avec sujets (6). Selon les auteurs, ces résultats sont peu différents les uns des autres. Ils n'ont toutefois porté que sur 4 configurations de tests parmi les 11 du projet de norme.

S'il existe de nombreux travaux portant sur les méthodologies d'évaluation de la visibilité, peu abordent la définition de critères de performance.

Dans le domaine des véhicules routiers de grand gabarit (camions, bus...), nous pouvons citer l'étude réalisée pour le compte du département des transports du Royaume-Uni (DTER¹⁶) par R. TAIT et al., Université de Loughborough. Après avoir constaté l'absence d'exigences réglementaires spécifiques à ces catégories de véhicules en matière de visibilité directe, ils ont montré que la simple transposition de celles définies pour les véhicules légers est insuffisante [36]. Il est, par exemple, spécifié pour ces derniers qu'à part des obstructions engendrées par certains éléments structurels (montants du pare-brise, essuie glace, rétroviseur...), il ne doit en exister aucune dans le champ de vision direct du conducteur vers l'avant entre un plan horizontal et un plan incliné de 4° vers le bas se croisant au niveau des yeux du conducteur (cf. Figure 10). Si, pour une voiture, le strict respect de cette règle permet une visée vers le sol à environ 17 m, appliquée à un camion, ce point se situera à plus de 35 m du fait de la différence de hauteur du poste de conduite.

En conséquence, les auteurs proposent les critères supplémentaires suivants : une sphère de 18 cm de rayon, située à 1 m 61 (50^e percentile féminin)

FIGURE 10

Illustration de la transposition de l'exigence de visibilité directe vers l'avant des véhicules légers aux poids lourds

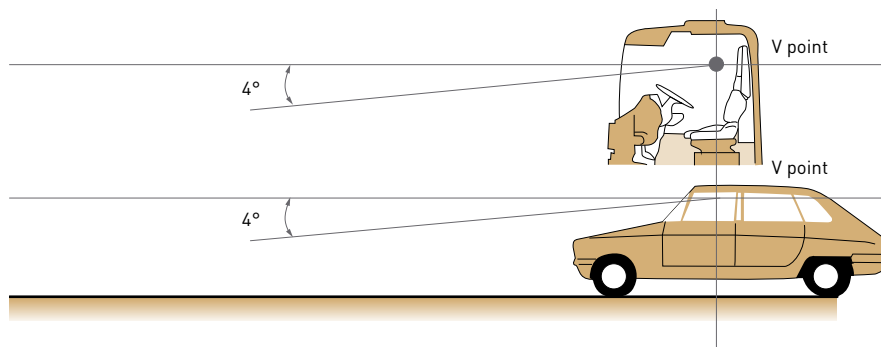
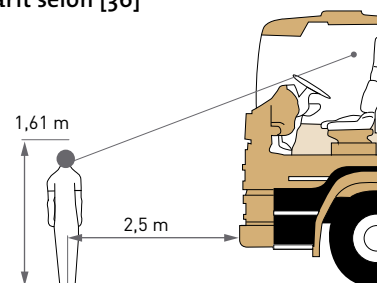


FIGURE 11

Recommandation minimale pour la visibilité directe des véhicules de grand gabarit selon [36]



du sol, doit être visible en différents points situés à 2 m sur les côtés du véhicule et à 2 m 50 vers l'avant. Ils correspondent à la perception de la tête d'une personne de petite taille se tenant debout autour de la cabine du véhicule (cf. Figure 11).

Pour les compacteurs à pneus, la CNAMTS¹⁷ [3] préconise l'utilisation d'engins respectant la règle du 1 m x 1 m selon laquelle le conducteur peut, dans tous les cas, voir depuis son poste de conduite un point situé à 1 m du sol (taille d'une personne accroupie) à 1 m devant ou derrière l'engin (cf. Figure 12). Alors que le HSE [37] préconisait une règle similaire pour tous les engins de chantiers, celle-ci a été modifiée pour être en adéquation avec les nouvelles préconisations de la norme NF ISO 5006:2007 (point situé à 1 m 50 du sol à 1 m de l'engin).

Au-delà de ces exigences réglementaires et normatives qui autorisent des zones de masquage quel que soit le type d'engins et, ce, même en visibilité indirecte, différents organismes ont engagé des travaux afin de développer, spécifier et évaluer des solutions techniques visant à pallier les angles morts rési-

FIGURE 12

Illustration de la règle 1mx1m



duels. Ce sont ce que la norme ISO 16001:2008 [38] dénomme des aides visuelles complémentaires, à savoir des rétroviseurs, des miroirs de surveillance et des systèmes caméras-écran.

Si l'ajout de miroirs convexes est une solution largement utilisée pour améliorer la visibilité des véhicules, l'interprétation des distances par le conducteur peut être difficile du fait des déformations engendrées par leur rayon de courbure. Comme le confirme les résultats d'une étude comparative menée par R. TAIT et al. (toujours pour le compte du DTER), plus le rayon de courbure est faible, plus la surestimation des distances est importante : d'une fois et demi à plus de deux fois pour des rayons de courbure allant de 800 mm à 150 mm [33].

En complément, les mêmes auteurs ont évalué l'apport de systèmes caméras-

¹² NIOSH : National institute for occupational safety and health.

¹³ CAO : Conception assistée par ordinateur.

¹⁴ LHD : Load haul dump.

¹⁵ IRSST : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.

¹⁶ DTER : Department of the environment, transport and the regions.

FIGURE 13

Illustration d'un Load haul dumper (LHD)



écran pour ramener au conducteur de la visibilité sur des zones difficilement accessibles par d'autres moyens. Fin des années 1990, ils ont ainsi testé ce type d'équipement pour visualiser l'arrière immédiat de camions de transport. Douze conditions expérimentales ont été présentées à trois conducteurs : six avec un obstacle¹⁸ dans le champ de la caméra et les six autres sans obstacle. Les résultats ont également été comparés à ceux obtenus dans les mêmes conditions avec un miroir sphérique de 450 mm de rayon de courbure. En moyenne, la pige n'a pas été perçue dans 14 % des cas en conditions de jour, et dans 50 % des cas en conditions de nuit. Dans tous les cas, les résultats obtenus avec le miroir étaient meilleurs (5 %). Les auteurs expliquent ces faibles performances par les distorsions engendrées par les caméras alors utilisées, ainsi que par leur implantation à 4 m 25 du sol (hauteur d'une remorque de camion). En complément, des tests sur route ont été réalisés sur un camion ainsi équipé par 10 conducteurs expérimentés. Tous ont émis un avis positif sur l'intérêt de ce système pour sécuriser les manœuvres en marche arrière [35].

De façon similaire, P.S. RAU et al. [39] ont mené, au début des années 2000, une étude pour le compte du NHTSA¹⁹ visant à réduire les angles morts des camions de transports routiers à l'aide de caméras vidéo. Après avoir analysé de façon théorique et expérimentale différentes configurations, ils ont retenu un dispositif composé de 3 caméras couplées à 3 écrans et 8 sources d'éclairage par LED infrarouges afin de couvrir les zones latérales et l'arrière immédiat du véhicule. Des algorithmes permettant de renforcer les contours des

objets et de réduire les halos provoqués par des sources lumineuses intenses (phares des autres véhicules, par exemple) ont également été développés spécifiquement. Ce système a ensuite été testé en conditions réelles de circulation de jour, de nuit, par temps de pluie, etc. avec 8 conducteurs expérimentés [39]. Les résultats montrent que, par rapport aux rétroviseurs classiques, le système proposé tend à réduire l'erreur absolue sur l'estimation de distance. L'analyse des mouvements des yeux montre également que les conducteurs regardent autant les rétroviseurs que les écrans relatifs aux caméras : les deux systèmes semblent donc complémentaires. Enfin, les conducteurs ont évalué subjectivement ce système de façon très positive en tant qu'aide à la conduite (note de 7,7 à 8,1 sur 10).

Citons enfin différents travaux sur l'utilisation de caméras pour améliorer la visibilité sur des engins miniers de type LHD, pour lesquels il ne s'agit pas uniquement de sécuriser la marche arrière, mais toutes les manœuvres. En effet, ces engins étant longs et larges comparativement à leur hauteur, la visibilité offerte au conducteur est très faible (cf. Figure 13).

Une étude du HSE au début des années 2000 a permis de déterminer qu'il faut au moins deux caméras pour couvrir les angles morts sur ce type d'engin [41]. La majorité des conducteurs (11/14) qui ont participé à cette expérimentation confirme l'intérêt de ces caméras pour l'identification de piétons ou des obstacles se trouvant sur la trajectoire de l'engin, à condition que son objectif reste propre. Plus récemment (2009), A. GODWIN et al. (Université du Laurentian, Canada) ont

déterminé par simulation qu'une combinaison de 3 caméras permet de réduire le taux d'angles morts des LHD de 80 % à 27 % [42].

DISCUSSION

Il existe en matière de visibilité de nombreux textes réglementaires ou normatifs à destination des fabricants d'engins qui définissent les méthodes d'évaluation et des critères de performance. L'analyse bibliographique réalisée fait cependant ressortir certaines limites.

Pour les véhicules routiers, les seules exigences en termes de visibilité directe sont celles définies dans la directive 90/630/CEE pour les véhicules de type M1 (véhicules légers). Comme l'ont montré R. TAIT et al. dans leur étude pour le DTER du Royaume-Uni, la simple transposition de ces exigences aux poids lourds est insuffisante. Ils proposent de ce fait des exigences complémentaires afin que le conducteur puisse avoir une visibilité directe sur une personne se tenant debout à proximité de la cabine du véhicule.

Pour les machines mobiles, alors que la directive « Machines » stipule que la visibilité depuis le poste de conduite doit permettre la surveillance maximale des trajectoires des éléments en mouvement, les prescriptions normatives sont essentiellement ciblées sur le risque de collision avec des piétons. Elles ne prennent donc pas complètement en compte l'activité visuelle des conducteurs dans toutes les situations de travail possibles. C'est pour cette raison que de nombreux travaux préconisent une évaluation surfacique de la visibilité, sans toutefois proposer de critères de performance. De même, s'il est bien mentionné que la visibilité directe est prioritaire sur la visibilité indirecte, il n'est pas indiqué de seuil minimum,

¹⁷ CNAMTS : Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés.

¹⁸ Cylindre plastique gris de 1 m de haut et 75 mm de diamètre : pige de test définie dans la norme ISO TR 1255 : Commercial vehicles - Obstacle detection device during reversing - Requirements and tests (1994).

¹⁹ NHTSA : National highway traffic safety administration (USA).

ce qui pourrait conduire à des engins offrant majoritairement une visibilité indirecte. La mise en place de miroirs ou de caméras peut en effet se révéler beaucoup moins coûteuse et complexe que la (re)conception d'un engin pour améliorer la visibilité directe.

Par ailleurs, comme le soulignent plusieurs auteurs, alors que les méthodologies d'évaluation de la visibilité sont lourdes à mettre en œuvre, les critères de performances sont relativement « permissifs ». Par exemple, pour un engin de terrassement, un poste de conduite n'offrant que des ouvertures de quelques millimètres de hauteur mais judicieusement placées pour viser les 2 contours de référence pourrait respecter les critères de la norme NF ISO 5006:2007 !

Heureusement que pour satisfaire aux exigences du marché, les fabricants s'imposent des contraintes bien supérieures.

Il appartient également aux utilisateurs de s'assurer que la visibilité initiale de l'engin n'a pas été réduite (ajout d'accessoires dans le poste de conduite, d'un nouvel outil de travail, surfaces vitrées plus ou moins propres, présence d'éclats ou de fissures...). Comme nous l'avons indiqué, différentes méthodes numériques ont été spécifiquement développées à cet effet. Ce type d'évaluation peut également être réalisé de façon pratique par la perception visuelle d'une personne assise au poste de conduite. Aidée d'un assistant qui déplace une pige autour du véhicule, elle indique les positions pour lesquelles la pige est masquée [42].

Les utilisateurs doivent également s'assurer que la visibilité d'un engin est en adéquation avec ses conditions réelles d'exploitation. Un même engin peut en effet être utilisé dans des situations totalement différentes en termes de co-activité et, comme le rappelle le HSE dans une note à destination de ses agents de terrains, l'évaluation de la visibilité n'est pas une fin en soi, elle doit être mise en perspective avec une analyse des risques. Par exemple, bien que la norme NF ISO 5006:2007 autorise pour de nombreux engins de terrassement de fortes restrictions de visibilité vers l'arrière, ces zones ne sont pas nécessairement dangereuses si des mesures organisationnelles ont permis d'en exclure tous les risques d'obstacles ou de piétons. Dans le cas

contraire, il est nécessaire de ramener au conducteur de la visibilité sur ces zones.

Si des rétroviseurs et des miroirs sont depuis longtemps utilisés à cet effet, les systèmes caméras-écran prennent une part de plus en plus importante. En diminuant leur coût et en améliorant leur robustesse et leurs performances vidéo (résolution, luminosité, contraste...), l'essor des techniques numériques renforce encore les évaluations positives obtenues début des années 2000 avec des systèmes analogiques. Il existe aujourd'hui sur le marché une grande gamme de « caméras-vidéo », des systèmes bon marché diffusés sur le web à ceux spécifiquement conçus pour équiper des engins de terrassement, des chariots de maintenance, ou des camions,... Ces derniers peuvent non seulement être installés en première monte (matériel neuf), mais également sur des engins en service. Ils sont spécifiquement durcis pour résister aux contraintes d'exploitation sévères (chocs, vibrations, températures, poussières, intempéries...) liées à l'utilisation de ces types d'engin. Le service prévention de la CARSAT (Caisse d'assurance retraite et de la santé au travail) Bourgogne et Franche-Comté a, par exemple, préconisé l'installation de caméras de recul sur tous les engins de terrassement du chantier LGV [44]. Des préconisations similaires sont faites par nos homologues étrangers [45, 46].

Toutefois, en plus de celles inhérentes aux systèmes vidéo (sur ou sous-éclairage, salissures de l'objectif, reflets sur l'écran...), l'utilisation de systèmes « caméras-écran » peut présenter des limitations qui ne sont pas techniques mais liées aux aspects cognitifs de l'activité de conduite. Différentes études ont en effet montré qu'un conducteur d'engin n'est pas toujours en capacité de distribuer simultanément son attention sur plusieurs sources d'information. Concentré sur sa tâche, il peut ne pas prêter attention à l'écran lui permettant de voir des piétons se trouvant à proximité de son engin [8, 9, 46]. En conséquence, afin de l'alerter d'un risque de collision potentiel, ces systèmes « caméras-écran » peuvent utilement être complétés avec des systèmes de détection d'obstacles ou de personnes [40, 47, 48]. Un autre risque mentionné à plusieurs reprises [33, 39] à propos de ces systèmes est qu'ils peuvent amener les conducteurs et les piétons à négliger

les mesures de prévention organisationnelles qui doivent en tout état de cause rester prioritaires.

CONCLUSION

Comme nous venons de le voir, la visibilité d'un véhicule est un élément déterminant pour la prévention des collisions. La visibilité directe, essentiellement déterminée lors de la conception de l'engin, doit en tous les cas être privilégiée. Il appartient donc aux fabricants de poursuivre leurs efforts d'innovation dans ce domaine.

La visibilité doit également être adaptée aux conditions d'exploitation. Dans le cas où une analyse fait ressortir un risque potentiel de collision qu'il n'est pas possible d'éviter par des mesures organisationnelles, et si celui-ci se situe dans un angle mort du véhicule, il est alors du ressort de l'exploitant d'essayer de ramener de la visibilité sur cette zone, par exemple via des miroirs de surveillance ou des systèmes « caméras-écran ». Pour les véhicules routiers et les engins de terrassement, des caractéristiques fonctionnelles minimales et des prescriptions d'installation sont respectivement données dans la directive 2003/97/CE et la norme ISO 16001. En plus de ces prescriptions, le choix et l'installation de ces dispositifs doit s'appuyer non seulement sur une analyse des risques (caractérisation des zones dangereuses) mais également sur l'analyse de l'activité du conducteur : un écran ou un miroir mal positionné par rapport à la direction du regard pour la tâche considérée nuirait à l'efficacité de la solution. La mise en place de ces systèmes doit également être accompagnée d'une formation sur leur fonctionnement, les réglages possibles, leur entretien, les consignes d'utilisation particulières. Il est également important de rappeler aux conducteurs et aux piétons que ces aides visuelles ne se substituent en aucun cas aux mesures organisationnelles (séparation des voies de circulation, règles d'approche des véhicules de la part des piétons, port de gilets haute visibilité, etc.).

Reçu le : 17/03/2011

Accepté le : 29/07/2011

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MARSOT J., CHARPENTIER P., TISSOT C. - *Collisions engins-piétons : analyse des récits d'accidents de la base EPICEA*. Hygiène et sécurité du travail, ND 2318, 4^e trimestre 2009, 217, pp. 23-32.
- [2] POMIAN J.L. et al. - *La circulation en entreprise*. ED 975, INRS, Paris, 2006, 87 p.
- [3] *Prévention des risques occasionnés par les véhicules et engins circulant ou manœuvrant sur les chantiers du BTP*. R 434, CNAMTS, 1^{ère} édition, juin 2008, ISBN 978-2-7389-1662-4, 4p.
- [4] ESTEVE B. - *Définition en vue d'une intégration dans le processus de conception des éléments qualifiant et quantifiant la visibilité d'un véhicule automobile*. Thèse ENSAM-PSA, 1999, 234 p.
- [5] GODWIN A., EGER T., SALMONI S., DUNN P. - *Postural implications of obtaining line-of-sight for seated operators of underground mining load-haul-dump vehicles*. In *Ergonomics* 2007, 50, 2, pp. 192 - 207.
- [6] EKLUND, J., ODENRICK P., ZETTERGREN, S. - *Head posture measurements among work vehicle drivers and implications for work and workplace design*. In *Ergonomics*, 1994, 37, pp. 623-639.
- [7] HELLA F., TISSERAND M., SCHOULLER J.F. - *Evaluation of visibility constraints in fork lift trucks by the study of lateral head movement of drivers*. Proceedings of 4th Conference of Eye Movement, September 1987, Gottingen, Germany, pp. 159-160.
- [8] VEZEAU S., HASTEY P., GIGUÈRE D., GAGNE N., LAURE C., RICHARD J.G., et al. - *Chariots élévateurs : étude ergonomique et analyse des stratégies de conduite des caristes*. Rapport R 601, IRSST, 2009, 115 p.
- [9] HELLA F., SCHOULLER J.F., CLEMENT D. - *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.
- [10] Directive 70/156/CEE - *Rapprochement des législations des Etats membres relatives à la réception des véhicules à moteur et de leurs remorques*. Journal officiel n° L 042 du 23/02/1970, pp. 01-15.
- [11] Directive 2006/42/CE - *Rapprochement des législations des Etats membres relatives aux machines*. Journal officiel n° L 76 du 16 mars 2007, pp. 35-35
- [12] Directive 90/630/CEE - *Adaptation au progrès technique de la directive 77/649/CEE du Conseil concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives au champ de vision du conducteur des véhicules à moteur*. Journal officiel n° L 341 du 6 décembre 1990, pp. 20-29.
- [13] Directive 2003/97/CE - *Rapprochement des législations des Etats membres relatives à la réception ou à l'homologation des dispositifs de vision indirecte et des véhicules équipés de ces dispositifs*. Journal officiel L 25 du 29 janvier 2004, pp. 01-45.
- [14] Directive 2007/38/CE - *Rapprochement des législations des Etats membres relatives au montage a posteriori de rétroviseurs sur les poids lourds immatriculés dans la Communauté*. Journal officiel n° L 84 du 14 juillet 2007, pp. 25-28.
- [15] NF EN 474-1 - *Engins de terrassement - Sécurité - Prescriptions générales*, AFNOR, Paris, janvier 2009, 53 p.
- [16] NF ISO 5006 - *Engins de terrassement - Visibilité du conducteur - Méthode d'essai et critères de performances*. Paris, AFNOR, janvier 2007, 22 p.
- [17] ISO 14401-1 - *Engins de terrassement - Champ de visibilité des rétroviseurs et miroirs de surveillance*. Partie 1 : méthode d'essai. ISO, 2009, 11 p.
- [18] ISO 14401-2 - *Engins de terrassement - Champ de visibilité des rétroviseurs et miroirs de surveillance*. Partie 2 : critères de performance. ISO, 2009, 15 p.
- [19] Pr NF EN 15830 - *Visibilité - Chariots à portée variable tous terrains - Méthodes d'essai et vérification*. CEN/TC 150, 2010, 33 p.
- [20] Pr ISO 13564-1 - *Chariots de manutentions automoteurs - Méthode d'essais pour la vérification de la visibilité*. Partie 1 : chariots à conducteur assis et debout ayant une capacité allant jusqu'à 10 t incluses. ISO, 2007, 21 p.
- [21] HELLA F., TISSERAND M., SCHOULLER J.F. - "Visibility requirements for the driver's stand of lift trucks - Experimental study of driver's lateral head movements" *Applied Ergonomics*, 1988, Vol. 19, issue 3, pp. 225-232.
- [22] HELLA F., SCHOULLER J. F., TISSERAND M. - *Development of a new method to evaluate driver visibility from earth moving machinery*. Implementation of Safety and Health on construction sites, Aves Dias Coble (eds), 1996, Balkena, Rotterdam, ISBN 90 5410 847 9, pp. 533-541
- [23] HELLA F., SCHOULLER J. F. - *Development of a computer based method of assessing the visibility from construction site machinery*. Proceedings of the International Conference on computer-aided ergonomics and safety. Barcelone (Espagne), May 1999.
- [24] TEIZER J., ALLREAD B.S., MANTRIPRAGADA U. - *Automating the blind spot measurement of construction equipment*. *Automation in Construction*, n° 19, 2010, pp. 491-501.
- [25] BARON J.P., OWENDE P.M.O, Mc DONNEL K.P., WARD S.M. - *A method for assessment of task visibility from operator cabins of field machines*. *Industrial Ergonomics*, 2005, vol. 35, pp. 65-673.
- [26] LORISSON J. - *Réalité virtuelle dans l'industrie - Développement des produits et des processus*. Techniques de l'ingénieur TE 5 965, 2010, 24 p.
- [27] RABELLINO F. - *Real time ray tracing applied on non-planar surface for truck's visibility regulation checking*. JVR 09, Lyon, 7-9 décembre 2009.
- [28] HEFNER R. E. - *Construction Vehicle and Equipment Blind Area Diagrams*. Final report Caterpillar Inc, 2003, 87 p. <http://www.cdc.gov/niosh/topics/highwayworkzones/BAD/pdfs/catreport1.pdf>.
- [29] HEFNER R.E. - *Construction Vehicle and Equipment Blind Area Diagram*. Contract modification final report. Contract 200-2002-00563. Caterpillar Inc Peoria, Illinois, June 29, 2004, 62 p. <http://www.cdc.gov/niosh/topics/highwayworkzones/BAD/pdfs/catreport2.pdf>.
- [30] WEST J., HAYWOOD M., DUNN M., EGER P., GRENIER T., WHISSEL S. - *Comparison of operator line-of-sight (LOS) assessment techniques: evaluation of an underground load-haul dump (LHD) mobile mining vehicle*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2007, 107, pp. 315-321.
- [31] CHOI C.B., PARK P., KIM Y.H., HALLBECK M.S., JUNG M.C. - *Comparison of visibility measurement techniques for forklift truck design factors*. *Applied Ergonomics*, 2009, 40, 2, pp.280-285.
- [32] LARUE C., BELLEMARE M., BEAUGRAND S. - *Integration into a design process of simulation center on work activities: case study of two molden plates transporters*. International Computer-aided Ergonomics and Safety Conference (CAES), 1999 May 19-21, Barcelona, Spain, 4 p.

[33] TAIT R., SOUTHALL D. - *Driver's field of view from large vehicles*. Loughborough University, DETR Phase 3 report, 12/98, 85 p. <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/549/1/TT872%20AR1902.pdf>.

[34] CHANG J.H., FATHALLAH F.A., PICKETT W., MILLER B.J., MARLENGA B. - *Limitations in fields of vision for simulated young farmer tractor operators*. *Ergonomics*, 2010, vol. 53, Issue 6, pp. 758-766.

[35] LARUE C., GIGUERE D. - *Use of a coordinate measuring machine and of computer assisted drawing for the measurement of blind spots around trucks: a feasibility study*. Actes du 12^e congrès de l'IEA, 15-19 août 1994, Toronto, Canada, pp. 327-329.

[36] TAIT R., SOUTHALL D. - *Driver's field of view from large vehicles*. Loughborough University, DETR final report, 11/99, 50 p. <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/540/1/TT872%20AR2085.pdf>.

[37] « *Assessing Field of Vision for Operators of Earth Moving Machinery on Construction sites* » SIM, 02/2007/02, HSE, Grande Bretagne, 07/2007, 8p. http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/sectors/construction/2_07_02.pdf.

[38] ISO 16001 - *Engins de terrassement – systèmes de détection de risques et systèmes d'aide visuelle – Exigences de performances et essais*, ISO, 2008, 56 p.

[39] RAU P.S., WIERWILLE W.W., SCHAUDT W.A., GUPTA S., HANOWSKI R.J. - *Development of a Performance Specification for Indirect Visibility Systems on Heavy Vehicles*, Virginia tech transport institute, 2003, 09-0570, 14 p.

[40] RAU P.S., WIERWILLE W.W., SCHAUDT W.A., GUPTA S., HANOWSKI R.J. - *Enhanced camera/video imaging systems (E-C/VISs) for heavy vehicles*. Virginia tech transport institute, 2005, 07-0238, 10 p.

[41] *Improving the safety of workers in the vicinity of mobile plant*. Contract research report 358/2001, HSE, Grande Bretagne, ISBN 0 7176 2071 9, 2001, 99 p.

[42] GODWIN A., EGER T. - *Using virtual computer analysis to evaluate the potential use of a camera intervention on industrial machines with line of sight impairments*. *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 39, 2009, pp. 146-151.

[43] LARUE C., GIGUERE D. - *Field of visibility evaluation of industrial and commercial road vehicles: an ergonomic review*. Int L'économie de l'ergonomie : actes du 25^e congrès annuel de l'Association canadienne d'ergonomie, 25-28 octobre 1992, Hamilton, Canada, pp. 7-12.

[44] *Génie civil et terrassement – Sécurité sur toute la ligne*. Travail & Sécurité N° 687, septembre 2008, pp. 42-45.

[45] *Closed circuit TV on road going vehicles*. HSE, Operational Circular OC 803/70, 11/2002, 4 p. http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/fod/oc/800-899/803_70.pdf.

[46] ENSINGER W. - *Voir et être vu lors de l'utilisation d'engins de chantier*. Kanbrief 02/10, <http://www.kan.de/>, 2010, pp 6-8.

[47] RUFF T.M. - *Evaluation of Devices to Prevent Construction Equipment Backing Incidents*. NIOSH, <http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pdfs/edpce.pdf>, 10 p.

[48] COOPER D.L., DUFFY S., ORRICK P., RAGLAND D.R. - *Develop Methods to Reduce or Prevent Backing Crashes*. California PATH Research Report, UCB-ITS-PRR-2010-30, <http://www.path.berkeley.edu/PATH/Publications/PDF/PRR/2010/PRR-2010-30.pdf>, ISSN 1055-1425, May 2010, 75 p.