Notes techniques

ÉQUIPEMENTS DE MANUTENTION MANUELLE ROULANTS

Influence des roues, roulettes et revêtements de sol sur l'effort de mise en mouvement

Les efforts nécessaires pour déplacer et faire pivoter un équipement de manutention manuelle roulant dépendent de ses roues ou de ses roulettes. L'adaptation de leurs caractéristiques techniques à la nature du sol permet de réduire les efforts, limitant ainsi les risques de développer des troubles musculosquelettiques (maladies professionnelles reconnues comme les plus fréquentes).
Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale analysant ces facteurs, en mouvement rectiligne et en pivotement, et propose des préconisations pour optimiser la conception des chariots de manutention manuelle.

STÉPHANE GILLE
INRS, département Ingénierie des équipements de travail

Contexte

Bien que les chariots manuels se motorisent et que les tâches de manutention soient de plus en plus automatisées, elles restent largement répandues dans de nombreux secteurs d'activité. Une des enquêtes de surveillance médicale des expositions des salariés aux risques professionnels (Sumer) [1] a souligné l'ampleur des tâches de manutention manuelle dans le milieu professionnel : tous secteurs confondus (privé et public), 34,3 % des salariés français, soit environ 8,5 millions de personnes, réalisent ce type de tâches. Parmi eux, 22,4 % y consacrent plus de 10 heures par semaine. Certains auteurs rapportent que ces activités, réalisées principalement à l'aide d'équipements de manutention, consistent pour moitié à tirer et/ou pousser du matériel roulant [2-3]. Quant à la taille du parc français de chariots manuels de manutention, bien qu'une estimation précise soit difficile, le syndicat des équipements pour la construction, les infrastructures, la sidérurgie et la manutention (Cisma) l'évaluait en 2002 à plusieurs dizaines de millions d'unités. À cela s'ajoutent les équipements roulants utilisés dans d'autres secteurs, comme le secteur de la santé, qui inclut des aides techniques pour le déplacement des patients, les lits d'hôpitaux, les brancards, etc. Ces tâches de tirer-pousser peuvent nécessiter des efforts importants de la part des opérateurs, sursollicitant le système musculosquelettique, et entraîner des troubles musculosquelettiques (TMS) [4-6] et notamment des lombalgies [7].

Les normes relatives à la conception des matériels roulants de manutention manuelle [8-9] précisent des méthodes d'évaluation des efforts nécessaires pour mettre en mouvement et maintenir le déplacement de ces équipements. Ces méthodes consistent à mesurer, à l'aide d'un dynamomètre, les efforts de tirer-pousser sur une plaque d'acier plane, lisse et horizontale, ou sur un sol en béton, à partir d'une position initiale statique. De même, deux normes ergonomiques (NF X 35-109 et NF ISO 11228-2 [10-11]), traitent des actions de tirer-pousser lors d'activités de manutention manuelle et fournissent, pour tous les secteurs d'activité, une méthode d'évaluation de la tâche *(Cf. Encadré 1)* pour définir la force initiale maximale acceptable (pic d'effort au démarrage) et la force soutenue maximale acceptable (effort en régime établi pour maintenir le déplacement). Cela permet de définir la capacité de charge maximale des équipements, en respectant une valeur maximale d'effort à ne pas dépasser. Toutefois, ces efforts dépendent

ENCADRÉ 1

ÉVALUATION DES EFFORTS MAXIMAUX ADMISSIBLES LORS DES ACTIONS DE TIRER - POUSSER

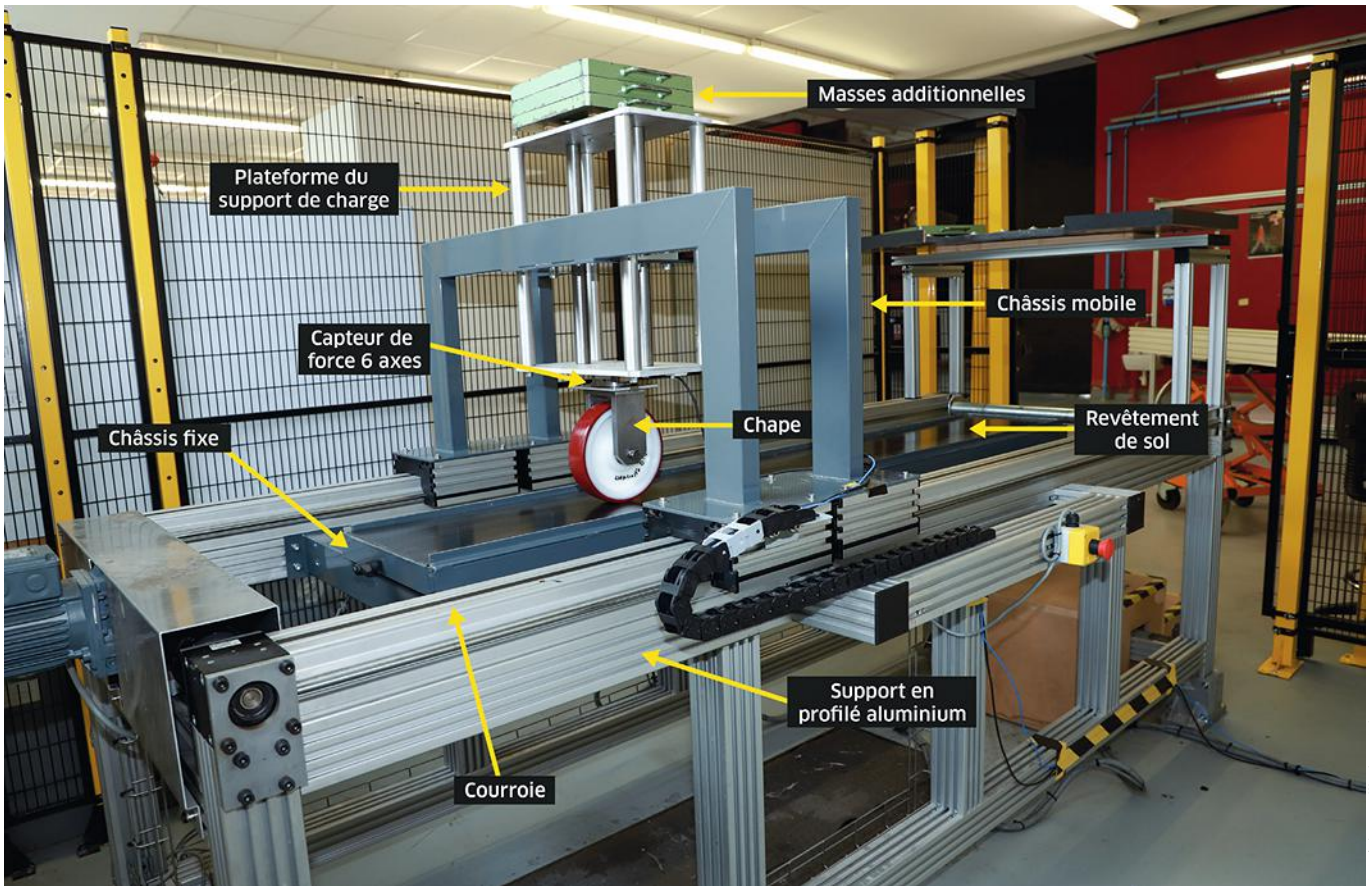
Les normes française NF X 35-109 et internationale ISO 11228-2 [10-11] traitent des actions de tirer-pousser lors d'activités de manutention manuelle.
Ces deux normes ergonomiques fournissent, pour tous les secteurs d'activité, une méthode d'évaluation de la tâche.
Cette méthode repose sur plusieurs critères portant sur l'équipement roulant, comme la hauteur des poignées ou la présence de roulettes en mauvais état ou inadaptées à la tâche. Elle prend également en compte les conditions d'exécution de la tâche, telles que la distance parcourue, la fréquence du mouvement, la visibilité ou la stabilité de la charge. Les conditions d'environnement sont aussi évaluées, par exemple l'état des sols, la présence d'obstacles ou l'adéquation de l'espace pour manœuvrer. Enfin, les conditions d'organisation de la tâche sont analysées, incluant le temps imparti ou les exigences de qualité. L'ensemble de ces critères permet de définir la force initiale maximale acceptable et la force soutenue maximale acceptable.

de plusieurs facteurs, notamment de la nature et des caractéristiques du sol sur lequel l'équipement roulant est déplacé, ainsi que de ses caractéristiques techniques et plus particulièrement de ses roues [12-14]. L'INRS a mené une étude pour analyser l'effort en poussée. Un banc d'essais a été conçu afin de mesurer les forces de résistance à l'avancement (en ligne droite) et celles de pivotement, qui constituent les efforts minimaux à surmonter pour assurer le mouvement d'un équipement roulant. Cet article présente le banc d'essais, les protocoles expérimentaux adoptés et l'évaluation des forces de résistance à l'avancement et au pivotement, pour divers types de roues, roulettes et sols. L'impact des caractéristiques techniques de ces éléments sur ces forces est également analysé et des recommandations de prévention sont émises.

Banc d'essais et modes opératoires

Description du banc d'essais

Un banc d'essais a été développé *(Cf. Figure 1)* pour permettre l'analyse de l'interaction roue/sol, en isolant une roulette *(Cf. Encadré 2)* sur un sol. Cette configuration permet de mesurer les forces de résistance à l'avancement et celles de résistance au pivotement. Elle offre l'avantage de s'affranchir des forces s'opposant au mouvement liées aux caractéristiques techniques propres à chaque équipement roulant, telles par exemple la déformation du châssis



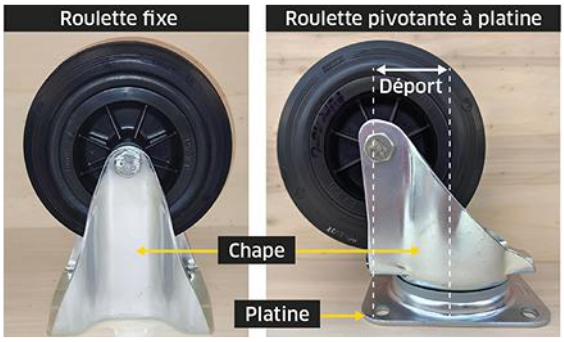
© Stéphane Gille / INRS / 2024

↓ FIGURE 1
Banc d'essais permettant de caractériser la force de résistance à l'avancement d'un couple roue/sol (ici, pour un essai mené avec une roulette fixe).

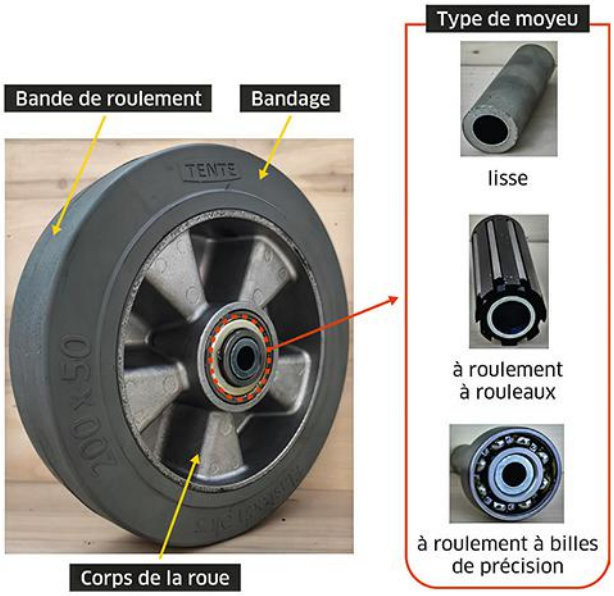
ENCADRÉ 2

ROULETTES ET ROUES : QUELLES DIFFÉRENCES ?

Une roulette est composée d'une roue ou de plusieurs roues (roulette jumelée), ainsi que d'une monture (chape) permettant sa fixation à l'équipement. On distingue les roulettes fixes, qui ne permettent qu'un mouvement en ligne droite, et les roulettes pivotantes, offrant également une rotation à 360° autour de leur axe vertical. Les premières sont équipées d'une chape fixe, tandis que les secondes possèdent une chape pivotante, avec divers types de fixation à l'équipement (platine, tige, œil). Les roulettes pivotantes se distinguent par leur déport qui correspond à la distance horizontale entre l'axe du pivot de la chape et de l'axe du moyeu de la roue.



Une roue se compose d'un corps entouré d'un bandage, terminé par une bande de roulement en contact direct avec le sol. Son centre intègre un moyeu, assurant une rotation fluide et uniforme.



ou une distribution de masse non uniforme entre les trains avant et arrière. Le banc d'essais est constitué de deux châssis rigides mécano-soudés, reposant sur un support en profilé aluminium. L'un des châssis, fixe, sert de support pour le revêtement de sol, tandis que l'autre, mobile, supporte la roulette. Différentes masses (de 13 kg à 62 kg) peuvent être ajoutées sur une plateforme fixée au châssis mobile, permettant de modifier les charges appliquées sur la roulette. La roulette est mise en mouvement rectiligne grâce à une courroie positionnée le long du châssis et entraînée par un moteur. La vitesse en régime établi (c'est-à-dire à vitesse constante) a été fixée à 2,5 km/h, une valeur représentative des vitesses moyennes observées sur le terrain lors des déplacements d'équipements roulants de manutention manuelle. Les forces de résistance à l'avancement et au pivotement sont mesurées à l'aide d'un capteur de force six axes placé à l'interface entre la platine de la chape de la roulette et la plateforme du support de charge.

Par ailleurs, l'accélération de la roulette est mesurée à l'aide d'un accéléromètre placé sur le châssis mobile du support de la roulette *(Cf. Figure 2 page suivante)*. L'ensemble des données est enregistré à une fréquence de 100 Hz, grâce à une centrale d'acquisition de données.

Méthode de caractérisation de la force de résistance à l'avancement

La force de résistance à l'avancement est liée au contact entre les roues et le sol. Elle constitue, par conséquent, la force minimale à surmonter pour maintenir l'équipement en mouvement. Afin de l'évaluer, une chape universelle rigide et non pivotante *(Cf. Figure 2)* a été utilisée avec différentes roues. Conçue spécifiquement pour cette étude, elle s'adapte à l'ensemble des roues sélectionnées pour la réalisation des essais analysant les interactions entre les sols et les roues. La force de résistance à l'avancement est calculée pendant un déplacement rectiligne uniforme de la roulette (c'est-à-dire déplacée en ligne droite à vitesse constante). La roulette, initialement immobile, est accélérée en mouvement rectiligne jusqu'à atteindre un régime établi à vitesse constante (2,5 km/h). En fin de course, elle est décélérée avant l'inversion de son sens de déplacement, puis réaccélérée une fois le changement de direction effectué. La force de résistance à l'avancement est mesurée en régime établi, ce qui permet de s'affranchir de l'influence de la force d'inertie présente pendant la phase d'accélération (la force d'inertie traduit la résistance d'un objet à toute variation de son mouvement : elle s'exprime comme le produit de sa masse par l'accélération que subit l'objet). La force de résistance à l'avancement est ensuite calculée en moyennant les valeurs obtenues en régime établi sur trois allers-retours.

Méthode de caractérisation de la force de résistance au pivotement

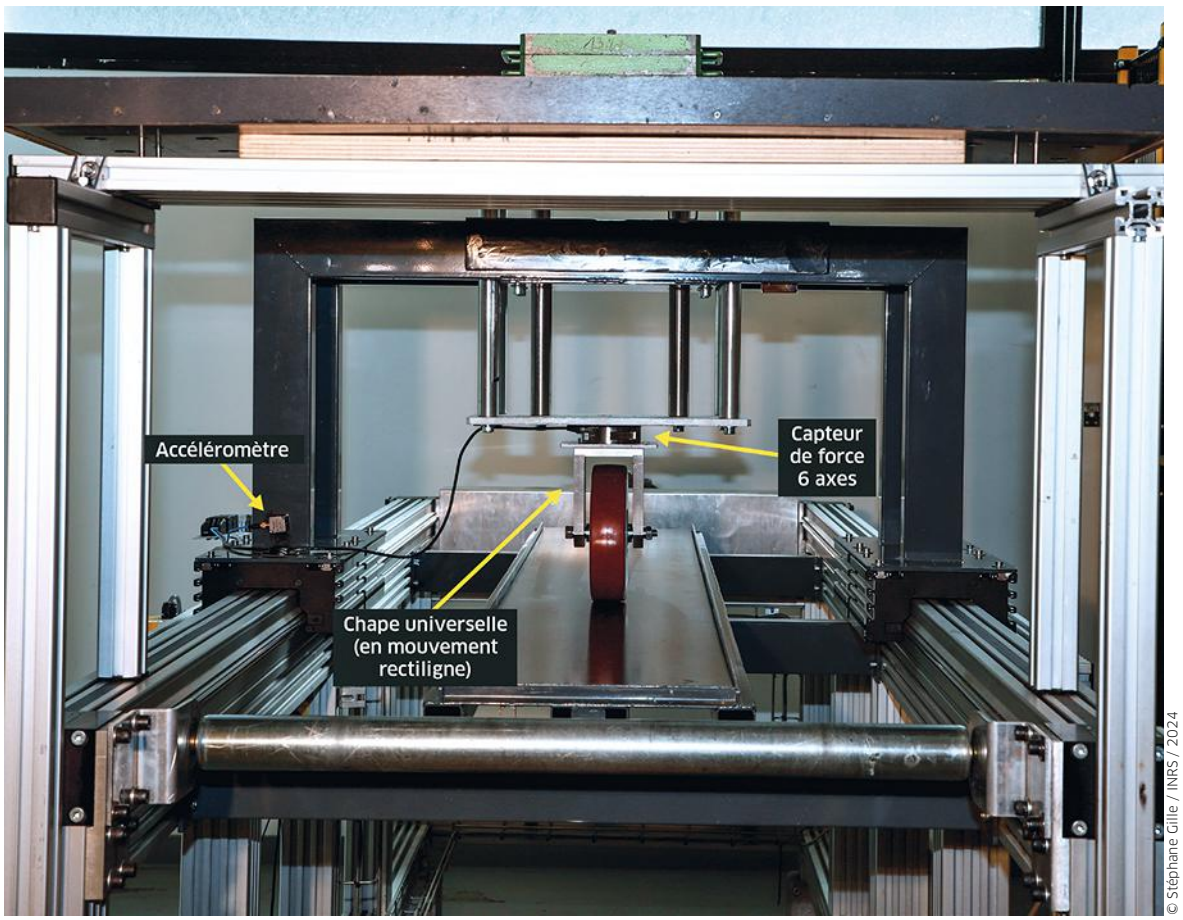
Le pivotement de la roulette d'un équipement roulant autour de son axe vertical est assuré par une chape dotée d'un palier pivotant. Pour faciliter ce

RÉSUMÉ

Les efforts requis pour déplacer les équipements roulants de manutention manuelle dépendent des roues, des roulettes et de la nature des revêtements de sol. Cet article présente l'analyse de ces efforts réalisée sur un panel de 44 roues et cinq sols distincts, à l'aide d'un banc d'essai spécialement conçu à cet effet. L'impact de plusieurs paramètres, tels que le diamètre des roues, le type de moyeu, la bande de roulement, le déport offert par la chape et la nature du sol sur les forces de résistance à l'avancement et au pivotement, a été évalué. Les résultats montrent que ces éléments peuvent jouer un rôle significatif dans l'effort requis. Un choix judicieux de caractéristiques techniques adaptées aux conditions d'utilisation, permettrait de réduire les efforts nécessaires aux déplacements des équipements roulants, et ainsi de limiter les risques de développer des troubles musculosquelettiques. Cette note technique propose des préconisations afin de guider les acquéreurs dans ce choix, pour faciliter les tâches de manutention manuelle.

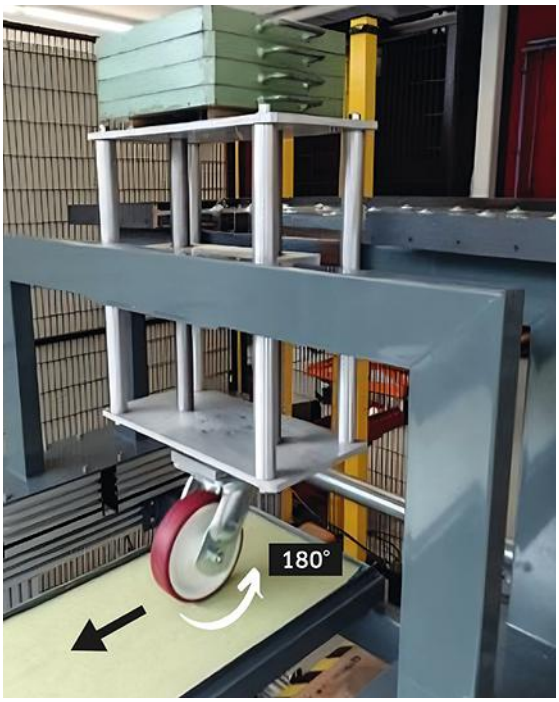
WHEELED MANUAL HANDLING EQUIPMENT: INFLUENCE OF WHEELS, CASTERS AND FLOOR COVERING ON THE EFFORT REQUIRED TO OVERCOME INERTIA

The effort required to move wheeled manual handling equipment depends on the wheels, the casters and the nature of the floor covering. This article presents an analysis of the efforts involved, measured for a selection of 44 wheels and five distinct floor coverings, using a test bench specially designed for this purpose. The impact of several parameters on the forces of resistance hindering advancing and pivoting was assessed. The parameters studied included the wheel diameter, the hub type, the tyre tread, the fork offset, and the floor types. The results show that these parameters can play a significant role in the effort required. Informed selection of technical characteristics adapted to the usage conditions could reduce the effort necessary to move wheeled equipment, and thus limit the risk of onset of musculoskeletal disorders. This technical note provides recommendations to guide buyers in this choice, with the aim of facilitating manual handling tasks.



© Stéphane Gille / INRS / 2024

← **FIGURE 2**
Vue de face du banc d'essais instrumenté.



© Stéphane Gille / INRS / 2024

FIGURE 3 → Position initiale de la roue à 180° par rapport à sa position en régime établi lors du déplacement.

pivotement, la roue est fixée à l'extrémité d'une fourche offrant un déport horizontal entre l'axe vertical de la roue et celui du palier pivotant *(Cf. Encadré 2)*. Afin de mesurer la force de résistance au pivotement sur le banc d'essai, la roulette est initialement orientée à 180° par rapport au sens de déplacement *(Cf. Figure 3)*, simulant ainsi la configuration d'un chariot se déplaçant dans le sens inverse de celui précédemment parcouru. Cette orientation présente également l'avantage d'être la position naturellement adoptée par la roulette lorsqu'elle revient à sa position initiale à la fin de l'essai.

Une fois l'essai lancé, le pivotement de la roulette ne se produit pas dans la phase d'accélération, mais intervient lors du déplacement en régime établi, lorsque la vitesse de déplacement est constante (à l'instant initial, le couple permettant le pivotement de la roulette n'est pas suffisant). Lors d'un déplacement en ligne droite, la force s'exerce dans la direction du déplacement. En revanche, lors du pivotement de la roulette, la force de résistance au pivotement se scinde en une composante longitudinale (dans la direction de déplacement) et une composante transverse (dans la direction perpendiculaire au déplacement). La force de résistance au pivotement est transitoire, car elle disparaît une fois le pivotement achevé. Son évaluation repose sur la moyenne des pics d'efforts des composantes longitudinales et transverses associées au pivotement, observées lors de cinq allers-retours. Afin d'isoler cette force, la force de résistance à l'avancement en mouvement rectiligne, qui est permanente et indépendante du pivotement, est soustraite de cette valeur moyenne.

Roues et sols

Les roues

Un panel de 44 roues, ayant les capacités de charge dynamique et statique suffisantes pour supporter les charges testées, a été sélectionné afin d'étudier l'influence de trois paramètres – le diamètre, le type de moyeu et la bande de roulement – sur les forces de résistance à l'avancement et au pivotement. Quatre diamètres de roue ont été sélectionnés (80, 100, 160 et 200 mm), trois types de moyeu (lisse, roulement à rouleaux, roulement à billes) et sept bandes de roulement présentant plusieurs duretés[1] pour certaines (caoutchouc semi-élastique de duretés A85 et A80, caoutchouc élastique de duretés A64, A67 et A68, caoutchouc thermoplastique de dureté A87, caoutchouc synthétique de duretés A87 et A88, polyuréthane injecté de duretés A91, A92 et A95, polyuréthane coulé de dureté A92, polyamide de dureté D75).

Les sols

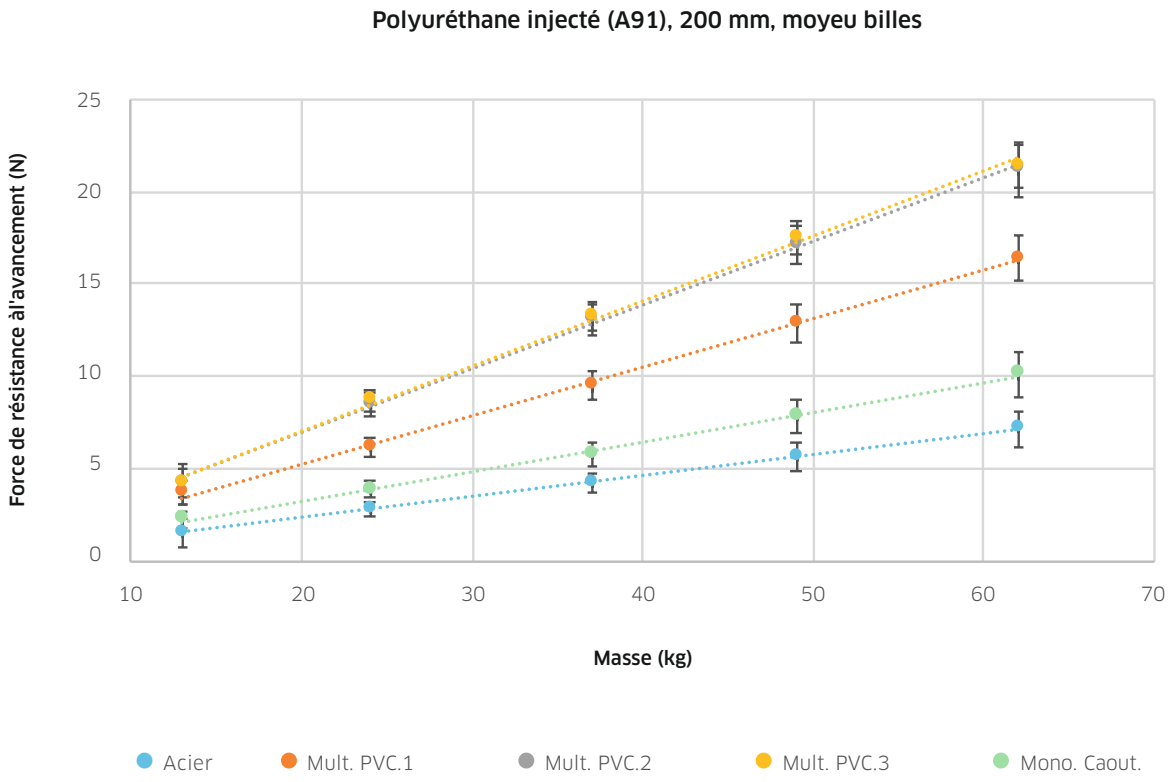
Cinq sols différents ont été étudiés : une plaque en acier plate, lisse et horizontale (considérée comme sol de référence dans certaines normes) et quatre revêtements de sol résilients (plus souples, déformables), dont trois multicouches en PVC (classés U3 P3 E2/3 C2 selon le classement UPEC[2] établi par le CSTB), notés Mult. PVC.1, Mult. PVC.2, et Mult. PVC.3, ainsi qu'un revêtement monocouche en caoutchouc (classé U4 P3 E1/2 C1/2) noté Mono. Caout. Pour réaliser ces essais, les revêtements de sol ont été collés sur une plaque d'acier (de longueur : 2000 mm et de largeur : 300 mm). Les revêtements de sol multicouches sont constitués d'une superposition de strates : une couche d'usure (la couche supérieure), une couche intermédiaire compacte et une semelle (la couche inférieure). En outre, leur résilience leur offre la capacité de retrouver leur forme originelle après une déformation.

Force de résistance à l'avancement

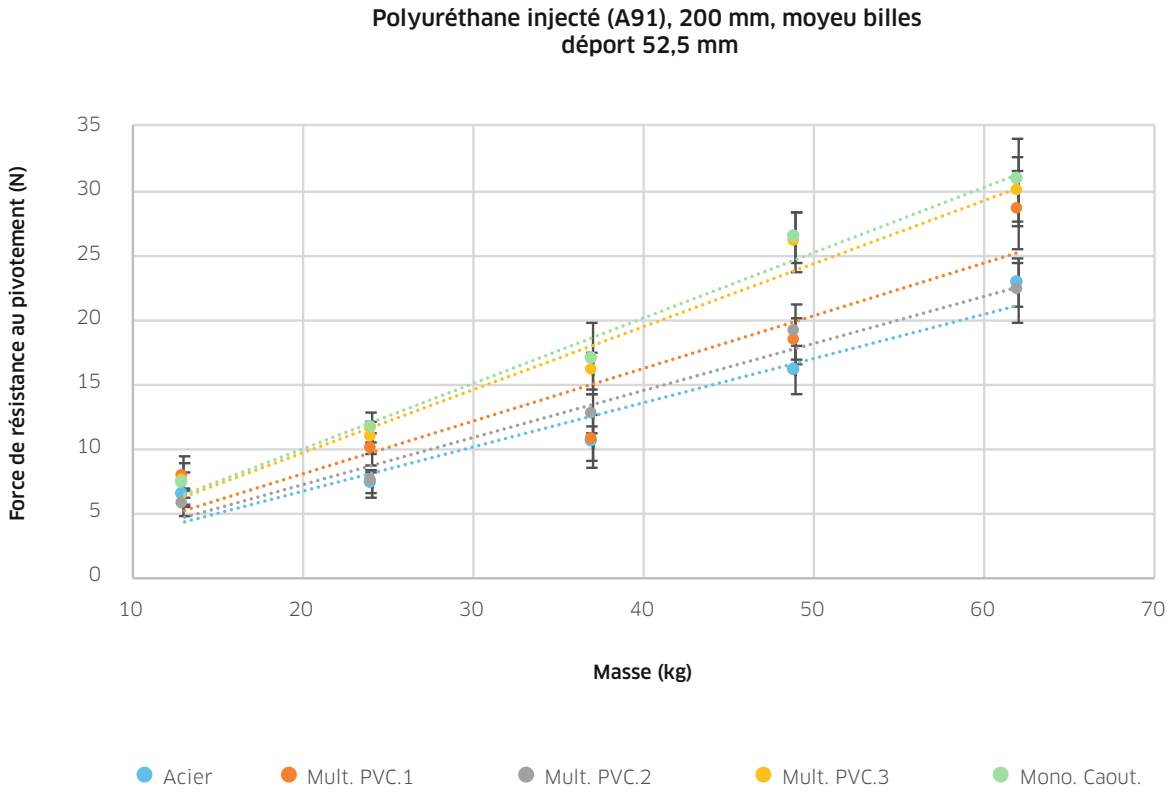
L'analyse des résultats, en particulier l'analyse statistique des données, a permis d'identifier que la force de résistance à l'avancement est influencée par différents facteurs : la masse manutentionnée, le diamètre de la roue, le type de bande de roulement, le type de moyeu, ainsi que le type de sol.

Effet de la charge

Pour tous les types de sol, la force de résistance à l'avancement de l'équipement augmente linéairement avec la charge, comme le montre, à titre d'exemple, la *Figure 4* pour une configuration composée d'une roue de 200 mm en polyuréthane injecté (dureté A91) avec roulement à billes de précision. Pour l'ensemble des 44 roues testées, la force maximale de résistance à l'avancement observée (49 Newton [N]) a été mesurée avec une roue de diamètre 80 mm en caoutchouc semi-élastique



↑ **FIGURE 4** Évolution de la force de résistance à l'avancement en fonction de la charge pour une roue sur les cinq sols étudiés.



↑ **FIGURE 5** Évolution de la force de résistance au pivotement en fonction de la charge pour une roulette sur les cinq sols étudiés.

(A85), équipée d'un moyeu lisse, supportant une masse de 62 kg et se déplaçant en ligne droite sur un revêtement de sol Mult. PVC.3.

Effet du revêtement de sol

Le revêtement de sol joue un rôle déterminant dans l'effort de résistance à l'avancement des équipements roulants de manutention manuelle. Pour toutes les roues testées, les efforts requis sont plus élevés sur les revêtements de sol étudiés que sur la plaque d'acier. En effet, un sol lisse et rigide, comme une plaque d'acier ou un béton, offre une faible résistance à l'avancement, facilitant ainsi la mise en mouvement et le déplacement en ligne droite. À titre d'exemple, pour une roue en polyamide supportant une charge de 62 kg, l'effort requis sur le revêtement de sol Mult. PVC.3 s'est avéré trois fois plus important que sur la plaque en acier. Une hiérarchisation des revêtements de sol a pu être élaborée en fonction des efforts observés. Ceux dont la semelle est plus molle, tels que Mult. PVC.2 et Mult. PVC.3, nécessitent un effort plus important pour déplacer un équipement roulant, quel que soit le type de roue utilisée. Par ailleurs, le classement UPEC ne s'avère pas pertinent pour différencier les revêtements en fonction de la résistance à l'avancement. Bien que ce classement évalue la durabilité et l'adéquation des sols à différents usages, il ne prend pas en compte cet aspect spécifique. En particulier, le critère P du classement, relatif au poinçonnement, est identique pour les quatre revêtements testés, ce qui empêche de les différencier en termes d'influence sur l'effort à fournir. Ainsi, pour évaluer la résistance à l'avancement d'un revêtement de sol, il est préférable de se baser sur la dureté de sa semelle : plus celle-ci est dure, plus l'effort nécessaire au déplacement est réduit.

Effet du diamètre de la roue

Le diamètre de la roue joue un rôle important dans les efforts de mise en mouvement et de maintien du mouvement d'un équipement roulant. La force de résistance à l'avancement diminue lorsque le diamètre de la roue augmente.

Effet de la bande de roulement

La bande de roulement de la roue influence de manière significative ces efforts, car elle conditionne la force de résistance à l'avancement en fonction de son type. Cette force est maximale pour les bandes de roulement en caoutchouc semi-élastique (A80, A85), et plus faible pour celles en caoutchouc élastique (A64, A67, A68) ainsi que celles en polyuréthane injecté (A91, A92, A95) et coulé (A92). Entre ces deux extrêmes, on trouve les autres bandes de roulement dont les duretés varient de A87 à D75. À la lumière de ces résultats, il apparaît que la sélection d'une bande de roulement plus dure n'est pas un critère pertinent pour diminuer l'effort requis lors du déplacement d'un équipement roulant.

Effet du moyeu

Le type de moyeu influence la force de résistance à l'avancement en raison des frottements qu'il peut générer. Pour réduire les efforts, il est préférable d'éviter les roues à moyeu lisse, car l'axe entre en contact direct avec un palier lisse, ce qui entraîne des frottements élevés, même si les matériaux sont à faible coefficient de frottement ou lubrifiés. Il est donc plus pertinent d'opter pour des moyeux à roulement à billes ou à rouleaux, qui permettent de réduire considérablement ces frottements.

Force de résistance au pivotement

Les facteurs influençant la force de résistance au pivotement ont été identifiés : la masse manutentionnée, le diamètre de la roue, le type de bande de roulement, le déport et le type de sol. En revanche, le moyeu n'a pas d'impact sur la force de résistance au pivotement, son rôle se limitant à transmettre le mouvement de rotation de la roue dans le sens longitudinal.

Effet de la charge

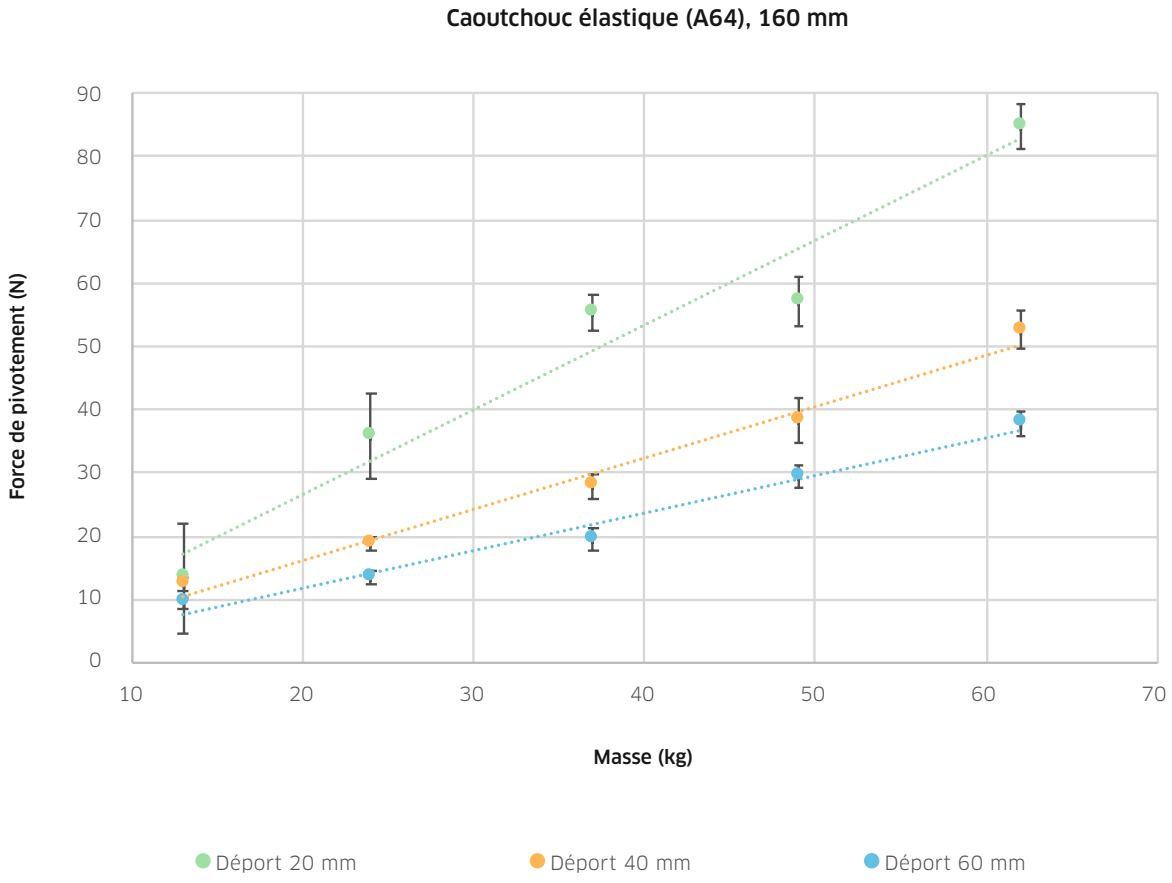
À l'instar de la force de résistance à l'avancement, celle de résistance au pivotement croît également de manière linéaire avec la masse, comme l'illustre la *Figure 5* pour les mêmes caractéristiques de roues que celles présentées dans la *Figure 4*. La roulette présente un déport de 52,5 mm (valeur proposée par le fabricant). Pour l'ensemble des roulettes, les forces de résistance au pivotement varient entre une valeur minimale de 33 N et une valeur maximale de 181 N, pour la masse maximale testée (62 kg).

Effet du diamètre de la roue

Aucune différence significative n'a été observée entre les diamètres de 80 mm, 100 mm et 160 mm. Seul le diamètre de 200 mm se démarque des autres ; la force de résistance au pivotement augmentant par rapport aux trois autres diamètres.

Effet de la bande de roulement

La force de résistance au pivotement est influencée par le matériau de la bande de roulement, mais pas par sa dureté. Cette force est étroitement liée au frottement entre la bande de roulement et le sol. Pour minimiser la force de résistance au pivotement, il est recommandé de privilégier une combinaison bande de roulement / sol présentant un faible coefficient de frottement. La bande de roulement en polyamide affiche les frottements les plus faibles pour tous les types de sol, tandis que celles en caoutchouc élastique de duretés A67 et A68 affichent les frottements les plus élevés. À noter que la bande de roulement en caoutchouc élastique de dureté A64, génère des frottements plus faibles que celles en caoutchouc élastique de dureté A67 et A68, ce qui s'explique certainement par le fait que la composition des bandes de roulement en caoutchouc élastique de dureté A67 et A68 diffère de celle



↑ **FIGURE 6** Effet du déport (roue de diamètre 160 mm en caoutchouc élastique sur une plaque en acier) sur la force de pivotement.

du caoutchouc élastique de dureté A64. Toutefois, le caoutchouc élastique, bien que pénalisé par une forte résistance au pivotement, demeure l'un des matériaux offrant une faible résistance à l'avancement (quelle que soit sa dureté). Cette bande de roulement reste donc intéressante si le trajet emprunté ne provoque pas de pivotement des roulettes.

Effet du déport

Un déport important facilite le pivotement d'une roulette. Ceci entraîne une réduction de la force de résistance au pivotement. La *Figure 6* illustre la force de résistance au pivotement en fonction de la charge pour des déports de 20, 40 et 60 mm, avec une roue de diamètre 160 mm en caoutchouc élastique (dureté A64) en mouvement de pivotement sur une plaque en acier. À noter que pour le déport de 20 mm, le phénomène de « *shimmy* » apparaît. Il s'agit d'une oscillation rapide et de forte amplitude de la roulette autour de son axe de pivotement vertical. Ce phénomène génère des vibrations importantes, entraînant des difficultés de guidage et une usure prématurée de la bande de roulement des roues.

Conclusion

Cette étude a mis en évidence que l'utilisation de sols durs, tels que l'acier ou le béton, préconisée dans les normes de conception des équipements roulants de manutention manuelle pour mesurer les efforts de déplacement, conduit à sous-estimer les efforts réellement requis en conditions réelles (ces équipements étant utilisés fréquemment sur des revêtements de sol souples).

Le choix des roues, des roulettes et des revêtements de sol joue un rôle clé dans la réduction des efforts nécessaires pour initier et maintenir le mouvement en ligne droite et lors des changements de direction des équipements roulants de manutention manuelle. Ainsi, une sélection adaptée de ces éléments en fonction des conditions d'utilisation permet de mieux prendre en compte ces paramètres lors des tâches de manutention de chariots et de limiter l'exposition des travailleurs aux facteurs de risques pouvant conduire à l'apparition de troubles musculosquelettiques liés à des efforts excessifs. Pour minimiser les efforts en déplacement rectiligne, il serait approprié d'opter pour des roues de grand diamètre, équipées d'un moyeu à roulements à billes ou à rouleaux et d'une bande de roulement offrant une faible résistance à l'avancement, comme le polyuréthane injecté ou coulé, le polyamide ou le caoutchouc élastique. Concernant le pivotement, un déport important favorise une réduction de l'effort nécessaire en diminuant la résistance au pivotement. Le choix d'une bande de roulement offrant un faible

→

coefficient de frottement sur différents types de sol, comme le polyuréthane ou le polyamide, réduit les efforts. Cependant, un équilibre doit être trouvé entre ces caractéristiques, car certaines bandes de roulement qui réduisent l'effort en mouvement rectiligne peuvent, en contrepartie, accroître la résistance au pivotement. C'est notamment le cas des bandes de roulement en caoutchouc élastique de duretés A67 et A68, dont le coefficient de frottement est élevé pour tous les sols étudiés. Ainsi, si les activités impliquent de fréquents changements de direction, il convient d'éviter ces bandes de roulement.

Le meilleur compromis est de s'orienter vers des bandes de roulement en polyuréthane (injecté ou coulé) ou en polyamide.

Le type de revêtement de sol influence fortement l'effort de mise en mouvement et son maintien. Plus le revêtement de sol est mou (en particulier sa semelle), plus l'effort sera important. Ainsi, lorsque l'équipement est déplacé sur un revêtement de sol mou, il est conseillé de diminuer la charge manutentionnée.

Enfin, les forces de résistance à l'avancement, mesurées à l'aide du banc d'essais, correspondent à l'effort minimal nécessaire pour initier le mouvement rectiligne d'une roue. Pour estimer l'effort total de poussée d'un équipement roulant de manutention manuelle, un modèle mécanique simplifié, non détaillé dans cet article, a été développé [14]. Ce modèle intègre les données d'accélération, les forces de résistance à l'avancement des trains avant et arrière obtenues dans cette étude, ainsi que les caractéristiques géométriques de l'équipement et la répartition de la charge entre les trains.

Ce modèle met en évidence qu'un paramètre non analysé dans cette étude influe également sur l'effort requis pour initier le mouvement de l'équipement : l'accélération appliquée par l'utilisateur pour pousser ou tirer le chariot afin de le faire passer de la position d'arrêt à sa vitesse de déplacement. Ce paramètre fera l'objet de recherches approfondies dans de futurs travaux menés par l'INRS. ●

1. La dureté Shore, mesurée avec un duromètre, évalue la capacité d'un matériau à résister à la pénétration d'un corps dur sous une charge donnée. En particulier l'échelle Shore A s'appliquent aux matériaux souples, alors que l'échelle Shore D est utilisée pour les matériaux plus rigides. Dans les deux cas, plus la valeur qui suit la lettre A ou D est élevée, plus le matériau est dur et offre une meilleure résistance à la pénétration.

2. Classement de durabilité des revêtements de sol en fonction de l'usage. U = Usure au trafic ; P = Poinçonnement par l'action d'équipements fixes ou mobiles ; E = Tenue vis-à-vis de l'eau et de l'humidité ; C = Tenue aux agents chimiques et aux produits tachants. Les chiffres qui suivent vont de 1 à 4 ; 4 étant associé à la plus forte résistance. CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Matinet B., Rosankis E., Léonard M. – *Les expositions aux risques professionnels : les contraintes physiques. Résultats de l'enquête Sumer 2017.* Dares, Synthèse.stat', 2020, p. 227.

[2] Pinupong C. *et al.* – The effects of ramp gradients and pushing–pulling techniques on lumbar spinal load in healthy workers. *Safety and health at work,* 2020, 11 (3), pp. 307-313. Accessible sur : https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.05.001

[3] Baril-Gingras G., Lortie M. – The handling of objects other than boxes: univariate analysis of handling techniques in a large transport company. *Ergonomics,* 1995, 38, pp. 905-925. Accessible sur : https://doi.org/10.1080/00140139508925159

[4] Hoozemans M.J.M. *et al.* – Pushing and pulling in relation to musculoskeletal disorders: a review of risk factor. *Ergonomics,* 1998, 41, pp. 757-781. Accessible sur : https://doi.org/10.1080/001401398186621

[5] Hoozemans M.J.M. *et al.* – Pushing and pulling in association with low back and shoulder complaints. *Occupational and environmental medicine,* 2002, 59, pp. 696-702. Accessible sur : http://dx.doi.org/10.1136/oem.59.10.696

[6] Argubi-Wollesen A. *et al.* – Human body mechanics of pushing and pulling: analyzing the factors of task-related strain on the musculoskeletal system. *Safety and health at work,* 2017, 8 (1), pp. 11-18. Accessible sur : https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.07.003

[7] Desbrosses K., Meyer J.P., Didry G. – Les efforts de tirer-pousser : points de repère. *Hygiène & sécurité du travail,* 2012, 228, ND 2365, pp. 49-58. Accessible sur : https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202365

[8] Norme NF EN Iso 10535 – *Produits d'assistance. Lève-personnes pour transférer des personnes. Exigences et méthodes d'essai.* Afnor, 2021. Accessible sur : https://www.boutique.afnor.org (site payant).

[9] Norme NF EN 1757-3 – *Sécurité des chariots de manutention. Chariot de manutention à plateforme à propulsion manuelle.* Afnor, 2022. Accessible sur : https://www.boutique.afnor.org (site payant).

[10] Norme NF X 35-109 – *Ergonomie – Manutention manuelle de charge pour soulever, déplacer et pousser/tirer. Méthodologie d'analyse et valeurs seuils.* Afnor, 2011. Accessible sur : https://www.boutique.afnor.org (site payant).

[11] Norme NF Iso 11228-2 – *Ergonomie – Manutention manuelle. Partie 2 : actions de pousser et de tirer.* Afnor, 2007. Accessible sur : https://www.boutique.afnor.org (site payant).

[12] Gille S., Clerc-Urmès I. – A new approach to prevent injuries related to manual handling of carts: correcting resistive forces between floors and wheels to evaluate the maximal load capacity. *Safety,* 2024, 10, p. 69. Accessible sur : https://doi.org/10.3390/safety10030069

[13] Al-Eisawi K.W. *et al.* – Factors affecting minimum push and pull forces of manual carts. *Applied ergonomics,* 1999, 30 (3), pp. 235-245. Accessible sur : https://doi.org/10.1016/S0003-6870(98)00019-2

[14] Gille S. – Design of manual handling carts: a novel approach combining corrective forces and modelling to prevent injuries. *Safety,* 2025, 11 (1), p. 25. Accessible sur : https://doi.org/10.3390/safety11010025