

STABILITÉ DES PETITS COMPACTEURS À CYLINDRES À CONDUCTEURS PORTÉS

- Compacteur
- Renversement
- Stabilité
- Simulation numérique

► Vincent BOUFFIER, Pierre LEMERLE,
INRS, Département Ingénierie des équipements
de travail

STABILITY OF OPERATOR-DRIVEN MINI-MACHINES

For a number of years, the road industry has questioned the stability of operator-driven mini-machines, narrower than 1 metre, which are liable to overturn under common operating conditions. Furthermore, within the scope of European tandem vibratory roller standard revision, INRS, supported by the French employment ministry, has advised that stability tests be included in the future European draft standard pr EN 500-4. The purpose of this study was to back up the INRS advice with scientific and technical arguments.

This paper introduces the approach, stages and results of the digital simulation-based study concerning overturning of an 80 cm-wide current production model of tandem vibratory roller, when descending from a pavement.

Digital model development required measurements to identify the calculation parameters specific to the studied machine. Mass, centre-of-gravity position and inertia measuring methods are explained. The model was validated by checking that the pavement height limit without overturning, predicted by calculation, was indeed identical to the value obtained during testing.

The study highlights the difference between a tandem vibratory roller stability test on an inclined platform and a dynamic overturning test, with no initial velocity, from a pavement curb. It also shows the overturning effect of the three parameters that come into play, when descending from a pavement of given height: velocity, i. e. angle of attack and angle of steering lock. Increasing the machine velocity has a limited effect on stability. Increasing the angle of attack, the angle between the longitudinal axis of the machine front section and the pavement curb, has a stabilising effect. Angle of steering lock has a stabilising effect, when the machine turns towards the pavement curb, but increases the risk of lateral overturning in the opposite direction. Its effect is far greater than that of the angle of attack. Finally, we studied the combination of both angular parameters when performing pavement descent manoeuvres.

- Tandem vibratory roller
- Overturning
- Stability
- Simulation

La profession routière s'interroge depuis plusieurs années sur la stabilité des petits cylindres à conducteur porté, de largeur inférieure à un mètre, engins susceptibles de se renverser dans des conditions d'utilisation courante. Par ailleurs, dans le cadre de la révision des normes européennes sur les mini-compacteurs, l'INRS, soutenu par le Ministère du travail, a demandé que des essais de stabilité figurent dans le futur projet de la norme pr EN 500-4. Cette étude a pour objectif d'étayer, par des arguments techniques et scientifiques, l'avis de l'INRS.

Cet article présente la méthode, les étapes et les résultats de l'étude par simulation numérique du renversement d'un mini-compacteur du commerce, de largeur 80 cm, lors de la descente d'un trottoir. L'élaboration du modèle numérique a nécessité des mesures afin d'identifier les paramètres de calcul propres à la machine étudiée. Les méthodes de mesures de la masse, de la position du centre de gravité et des inerties sont explicitées. Le modèle a été validé en vérifiant que la hauteur limite de basculement d'un trottoir, sans renversement, prédite par calcul, est identique à la valeur obtenue lors des essais.

L'étude met en évidence la différence entre un test de stabilité statique d'un mini-compacteur sur une plate-forme inclinée et un test dynamique de basculement sans vitesse initiale depuis le bord d'un trottoir. Elle présente aussi l'effet sur le renversement des trois paramètres entrant en jeu dans la descente d'un trottoir de hauteur donnée : la vitesse, l'angle d'attaque et l'angle de braquage. L'augmentation de la vitesse a un effet limité sur la stabilité. L'accroissement de l'angle d'attaque, qui est l'angle entre l'axe longitudinal de la partie avant de la machine et le bord du trottoir, a un effet stabilisateur. L'angle de braquage est stabilisateur lorsque l'on vire vers le bord du trottoir et augmente le risque de renversement latéral dans le sens opposé. Son effet est bien plus important que celui de l'angle d'attaque. Enfin, la combinaison des deux paramètres angulaires a été étudiée pour la réalisation de manœuvres de descente de trottoir.

INTRODUCTION

La profession routière s'interroge depuis plusieurs années sur la stabilité des petits cylindres à conducteur porté, de largeur inférieure à 1 mètre. En effet, il s'avère que ce type de machine, couramment utilisée sur les chantiers urbains, sur trottoirs notamment, à la place des compacteurs à guidage manuel de type doubles-billes, peut se retourner dans des conditions normales d'utilisation : franchissement d'un trottoir, obstacle de petite dimension, ornière, affaissement de terrain, etc.

Les résultats d'une étude statistique sur l'utilisation des compacteurs, réalisée à partir de la base de données

EPICEA¹ révèle que le renversement est la première cause d'accidents tous types de compacteurs confondus (44 % des accidents recensés dans la base). En revanche, le critère de la largeur n'a pu être mis en évidence.

Par ailleurs, les normes européennes sur les mini-compacteurs étant en cours de révision (série des normes EN 500), l'INRS, soutenu par le Ministère du Travail, a demandé que des essais de stabilité figurent dans la révision de la norme pr EN 500-4 [1].

Une étude du comportement dynamique des mini-compacteurs lors de la

¹ EPICEA : Étude de Prévention par Informatique des Comptes-rendus d'Enquêtes d'Accidents du travail.

descente d'un trottoir a donc été engagée par le laboratoire de Modélisation des Systèmes Mécaniques de Prévention afin d'étayer l'avis de l'INRS par des arguments objectifs.

MÉTHODE

L'étude, réalisée par simulation numérique, porte sur le comportement dynamique d'un mini-compacteur du commerce (marque BOMAG, modèle BW80), lors de la descente d'un trottoir. L'approche par calcul offre l'avantage de réduire le nombre d'essais à réaliser et évite de soumettre le conducteur à des conditions expérimentales potentiellement dangereuses.

L'étude numérique comporte :

- l'élaboration du modèle de la machine, selon des hypothèses simplificatrices pré-établies ;
- le recueil des données bibliographiques (notices techniques) nécessaires à l'identification des paramètres physiques du modèle numérique de mini-compacteur ;
- la mesure des propriétés physiques et mécaniques de la machine non disponibles dans les notices techniques ;
- la validation du modèle par comparaison entre calculs et mesures dans des configurations d'essais contrôlées ;
- l'utilisation du modèle numérique pour réaliser une étude des paramètres de conception et de manœuvre influents.

MODÈLE NUMÉRIQUE, DESCRIPTION

L'étude a été réalisée à l'aide d'un logiciel de mécanique multi-corps rigides. Le mini-compacteur a été modélisé par des éléments géométriques simples (cube, cylindres, sphère...), liés entre-eux par des liaisons mécaniques parfaites (pivot, rotule...). Les caractéristiques dimensionnelles livrées dans la notice technique du constructeur ont servi de référence pour la construction géométrique du modèle, cf. *Tableau 1*.

La masse volumique de chaque élément géométrique a été recalée ultérieurement pour obtenir la position du centre de gravité et les inerties de la machine complète, données mesurées en laboratoire (cf. Chapitre suivant).

TABLEAU 1

Données issues de la fiche de caractéristiques techniques du constructeur
Data from manufacturer's technical specification

Poids	1500 kg
Longueur	1862 mm
Largeur	856 mm
Hauteur (hors arceau)	1482 mm
Diamètre cylindre vibrant av. et arr.	580 mm
Longueur cylindre vibrant av. et arr	800 mm
Rayon de braquage mini. intérieur	2020 mm
Angle de braquage	+/- 6°
Angle d'oscillations avant-arrière	+/- 31°
Vitesse d'avancement maximum	8 km/h
Vitesse de travail maximum	4,5 km/h
Angle limite d'équilibre statique	28°

REMARQUE

L'angle limite d'équilibre statique est obtenu par un essai quasi-statique consistant à déterminer l'angle d'inclinaison de la plate-forme supportant le mini-compacteur, au-delà duquel la machine bascule sous l'effet de la pesanteur. En supposant le mini-compacteur en appui sur l'arête d'un trottoir en son plan de symétrie transversale, la valeur de l'angle limite d'équilibre statique (28 degrés) correspond à une hauteur critique de trottoir de 187 mm (cf. *Figure 1*). Le mini-compacteur se renverse pour une hauteur de trottoir supérieure à 187 mm.

Deux liaisons de type pivot ont été introduites pour permettre la rotation des cylindres autour de leur axe de symétrie et une rotule modélise l'articulation de direction entre la partie avant et la partie arrière de la machine (+/- 30° de braquage ou lacet, +/- 6° de roulis, 0° de tangage).

Le modèle prend en compte les contacts entre les cylindres et le sol grâce à des liaisons spécifiques. Le modèle de contact, propre au logiciel utilisé, est de type ressorts-amortisseurs répartis aux points d'intersection des géométries, les efforts de réaction entre solides étant calculés en fonction de leur interpénétration et d'une valeur de raideur et d'amortissement. Les valeurs

de raideur et d'amortissement du contact cylindre/sol ont été déterminées par recalage, pour satisfaire la condition² de pénétration maximum de 7 mm du cylindre dans le sol, lors du basculement d'un trottoir de 185 mm.

Caractérisation mécanique du mini-compacteur

Certains paramètres physiques ne sont pas indiqués par le constructeur et doivent être pris en compte dans le modèle. Il s'agit de :

- la masse exacte de la machine,
- la position du centre de gravité,
- les inerties longitudinales et transversales.

Ces caractéristiques ont donc été déterminées en laboratoire par une série d'essais.

La masse a été mesurée par levage (cf. *Figure 4*). Le mini-compacteur est soulevé par une élingue accrochée à un capteur de force. La masse du mini-compacteur, avec son arceau de sécurité, son réservoir de carburant plein et son réservoir d'eau vide, est de 1364 kg.

La composante longitudinale du centre de gravité (selon l'axe X) est déterminée en plaçant le cylindre avant du mini-compacteur en appui sur un plan horizontal surélevé et en maintenant la machine dans la position horizontale à l'aide d'une élingue fixée en sa partie arrière (cf. *Figure 5-a*). L'effort dans l'élingue est mesuré à l'aide d'un capteur de force. L'application du théorème des moments à la machine en équilibre, fournit alors la distance $X_G = 646$ mm du centre de gravité par rapport au plan vertical passant par l'axe du cylindre avant.

De la même manière, il est possible de déterminer la position transversale du centre de gravité (selon l'axe Y). Le mini-compacteur est alors placé en appui sur un élément profilé positionné longitudinalement sous les cylindres, du côté droit et maintenu par une élingue de l'autre côté (cf. *Figure 5-b*). La distance du centre de gravité au plan de symétrie transversale ainsi mesurée vaut $Y_G = 15,5$ mm.

La hauteur du centre de gravité est obtenue à partir de la relation entre la

² Cette hypothèse est issue d'un calcul préliminaire avec un module de Young d'enrobé à 20°C et des hypothèses sur la surface de contact.

FIGURE 1

Limite de stabilité statique. Équivalence entre hauteur maximale de trottoir et angle limite d'inclinaison de la machine
 Static stability limit. Equivalence between maximum pavement height and machine limiting angle

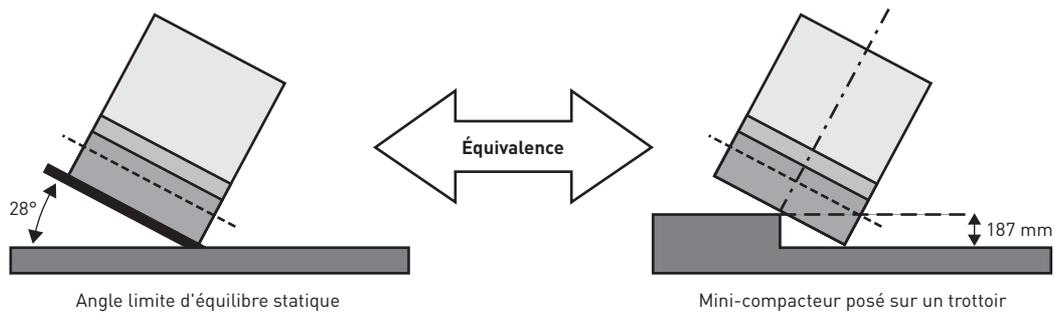


FIGURE 2

Schéma cinématique du modèle de mini-compacteur
 Kinematical diagram of tandem vibratory roller model

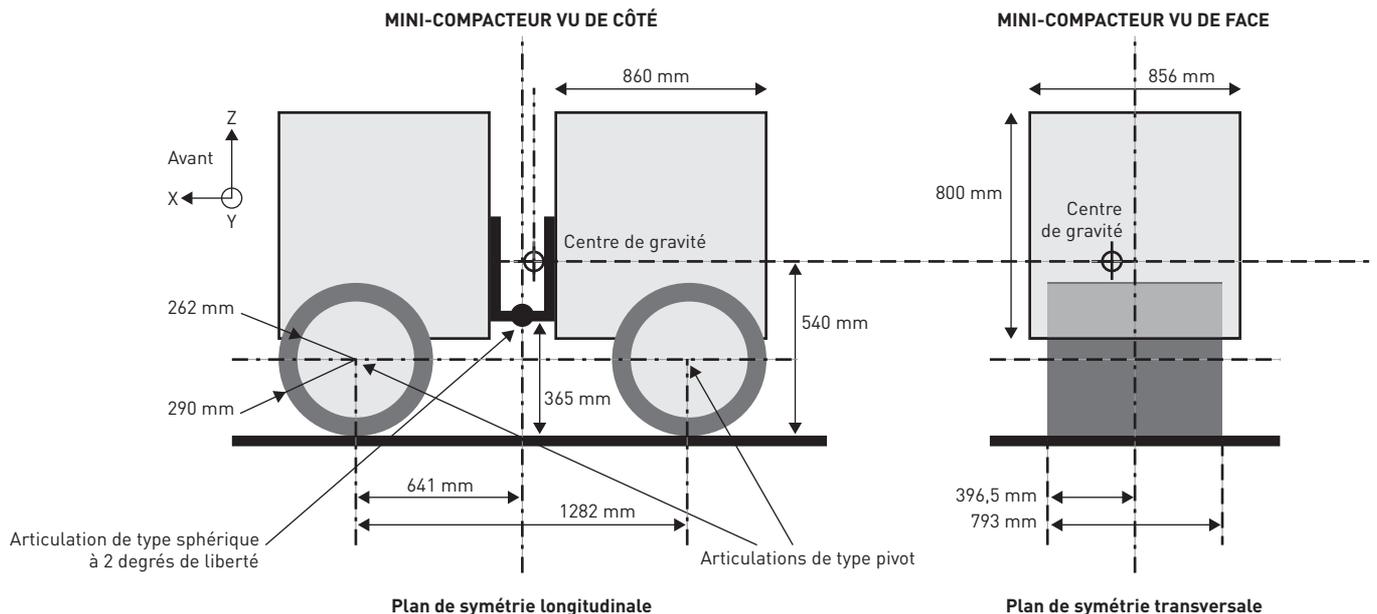
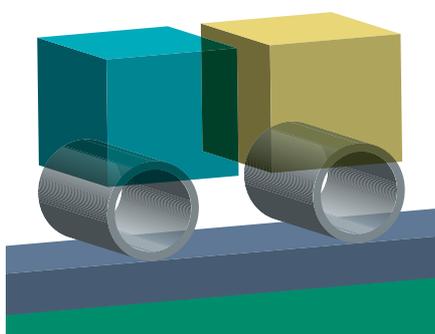


FIGURE 3

Allure du modèle de mini-compacteur
 Appearance of tandem vibratory roller model



force dans l'élingue et l'angle d'inclinaison du mini-compacteur, lorsqu'il est en appui sur le cylindre avant et lorsque l'élingue est fixée en sa partie arrière (cf. Figure 5-c). La position longitudinale du centre de gravité étant connue, la relation de dépendance entre la force et l'angle d'inclinaison est directement liée à la hauteur de centre de gravité. La hauteur de centre de gravité ainsi déterminée vaut $Z_G = 540$ mm.

Les inerties sont déduites des mesures de période des oscillations libres du mini-compacteur autour d'une position d'équilibre horizontal.

Les oscillations autour de la position d'appui du cylindre avant sur un plan surélevé, permettent de déterminer l'inertie de tangage, la machine étant soutenue par des ressorts de raideur connue, de l'autre côté, comme le montre la Figure 6-a.

$$I_{xx} = 873 \text{ Kg.m}^2$$

Les oscillations autour d'un axe longitudinal matérialisé par un élément profilé placé sous les cylindres permettent de déterminer l'inertie de roulis (cf. Figure 6-b).

$$I_{yy} = 840 \text{ Kg.m}^2$$

Par la suite, les termes croisés de la matrice d'inertie ont été négligés (du fait de la symétrie de la machine, les axes de

FIGURE 4

Pesage du mini-compacteur sans son arceau de sécurité
Weighing of tandem vibratory roller without its safety roll bar



FIGURE 5

Détermination de la position du centre de gravité
Determination of centre-of-gravity position

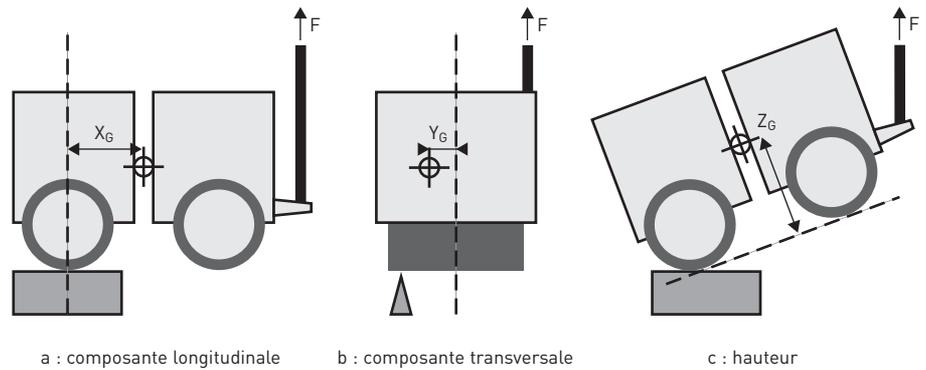


FIGURE 6

Détermination des inertias par mesure de la période des oscillations libres
Determination of inertias by measuring free oscillation period



a : tangage



b : roulis



référence étant supposés axes principaux d'inertie).

VÉRIFICATION DU MODÈLE

Afin de s'assurer du caractère prédictif du modèle, plusieurs essais ont été réalisés pour comparer les calculs aux mesures dans des conditions expérimentales contrôlées.

Les essais ont consisté à déterminer la hauteur limite de trottoir pour laquelle le mini-compacteur peut rester en

appui sans se renverser, le plan de symétrie transversale de la machine étant positionné à l'aplomb de l'arête du trottoir et le mini-compacteur étant initialement immobile, horizontal et en porte-à-faux sur le trottoir, puis lâché sans vitesse initiale.

Les essais conduisent à une hauteur limite de trottoir comprise entre 135 mm et 140 mm.

Premier essai : le mini-compacteur est posé sur un trottoir de 135 mm. On le laisse basculer dans le vide mais il ne se

renverse pas. Il est élingué de manière à éviter son renversement total et donc sa détérioration, sans entraver son mouvement de basculement (cf. Figure 7).

Lors du second essai, le mini-compacteur est posé sur un trottoir de 140 mm. On le laisse basculer dans le vide, il se renverse : il termine son mouvement incliné sur le côté retenu par les élingues, comme le montre la Figure 8.

FIGURE 7

Essai de basculement d'un trottoir de 135 mm Overturning test for 135 mm high pavement



FIGURE 8

Essai de basculement d'un trottoir de 140 mm Overturning test for 140 mm high pavement



La même configuration d'essai a été simulée à l'aide du modèle numérique de mini-compacteur pour les deux hauteurs de trottoir. Pour une hauteur de trottoir de 135 mm, les calculs montrent que le mini-compacteur revient en position d'équilibre, en appui sur l'arête du trottoir, conformément aux essais (cf. Figure 9).

Pour une hauteur de trottoir de 140 mm, la simulation prédit le renversement total du mini-compacteur, en accord avec les résultats d'essais (cf. Figure 10).

La corrélation entre les calculs et la mesure permet de conclure à la validation de la répartition des masses du modèle et du contact sol/cylindre.

REMARQUE

Si l'on considère l'angle d'inclinaison limite de 28° ³, un mini-compacteur peut être posé sur un trottoir de 187 mm (au niveau de son plan de symétrie transversale) sans qu'il se renverse. En revanche, s'il bascule d'un trottoir de la même hauteur, il se renverse sous l'effet des forces d'inertie car la hauteur maximale de stabilité pour cet essai dynamique est seulement de 135 mm (cf. Figure 10).

ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DE LA DESCENTE D'UN TROTTOIR

Après avoir vérifié que l'on retrouve par calcul l'angle de stabilité quasi-statique (essai dynamique de renversement latéral à vitesse initiale nulle), différentes simulations ont été réalisées pour une hauteur de trottoir supérieure à 135 mm, afin d'étudier l'influence des différents facteurs intervenant dans le renversement. Parmi ces facteurs, la vitesse, l'angle d'attaque de la descente et l'angle de braquage ont été analysés.

³ Valeur donnée par le constructeur.

FIGURE 9

Simulation du basculement d'un trottoir de 135 mm
Overturning simulation for 135 mm high pavement

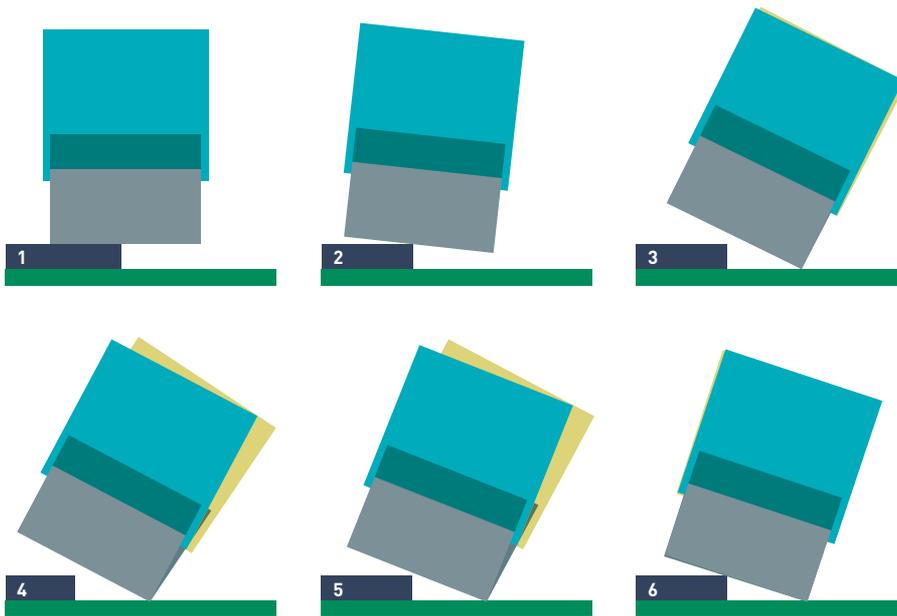
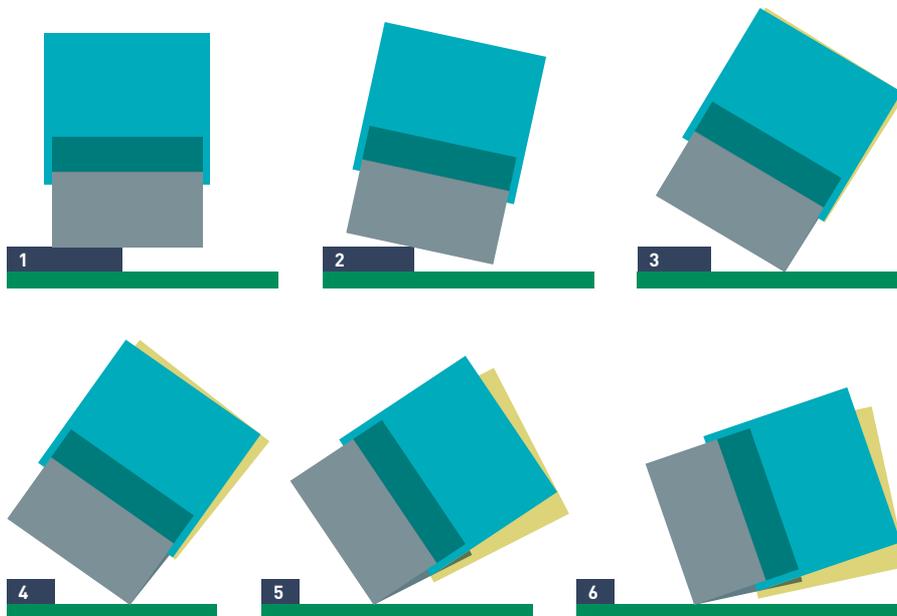


FIGURE 10

Simulation du basculement d'un trottoir de 140 mm.
Overturning simulation for 140 mm high pavement



ANGLE DE STABILITÉ STATIQUE
DU MODÈLE

La limite de stabilité statique au renversement latéral est une propriété géométrique faisant intervenir la masse, la position du centre de gravité et la surface de contact avec le sol. La limite de stabilité est atteinte lorsque la projec-

tion du centre de gravité sur la surface de contact franchit les contours du polygone de sustentation.

Des simulations ont été réalisées avec le modèle numérique de mini-compacteur. La machine a été modélisée en contact avec une surface inclinable.

Le mini-compacteur est posé initialement sur une plate-forme à 36°.

Sous l'effet de la gravité, la machine se renverse complètement, comme le montre la *figure 11*.

Un second calcul a été effectué avec un angle d'inclinaison de 35°. Le mini-compacteur reste alors en équilibre sur la surface inclinée.

REMARQUE

Le modèle montre que l'angle limite d'inclinaison de 28° indiqué par le fabricant est inférieur à l'angle réel de renversement. On peut supposer qu'il prend en compte non seulement le conducteur et le réservoir d'eau plein, mais aussi un coefficient de sécurité.

INFLUENCE DE LA VITESSE

La vitesse lors de la descente d'un trottoir a un effet stabilisateur, dans des conditions particulières. Des simulations ont été conduites, pour différentes valeurs de la vitesse et pour une manœuvre identique de descente d'un trottoir :

- la hauteur du trottoir est fixée à 185 mm (hauteur correspondant à une inclinaison de 28°),
- le mini-compacteur avance à vitesse constante,
- l'axe longitudinal du mini-compacteur fait un angle de 7° avec le bord du trottoir.

Pour cette configuration, toutes les simulations prédisent le renversement du mini-compacteur jusqu'à ce qu'il atteigne une vitesse seuil à partir de laquelle il n'y a plus renversement. Cette vitesse se trouve être, pour la manœuvre donnée, la vitesse maximale de la machine (8 km/h).

On peut en conclure que la vitesse est un facteur qui influe sur la stabilité, mais qui n'est pas utilisable dans la pratique, pour des raisons de sécurité.

INFLUENCE DE L'ANGLE D'ATTAQUE

L'angle d'attaque (α) est défini comme l'angle formé par l'axe longitudinal de la partie avant du mini-compacteur et le bord du trottoir. (cf. *Figure 13*).

FIGURE 11

Essai statique du mini-compacteur posé sur une plate-forme à 36°
Tandem vibratory roller static test on a 36° platform

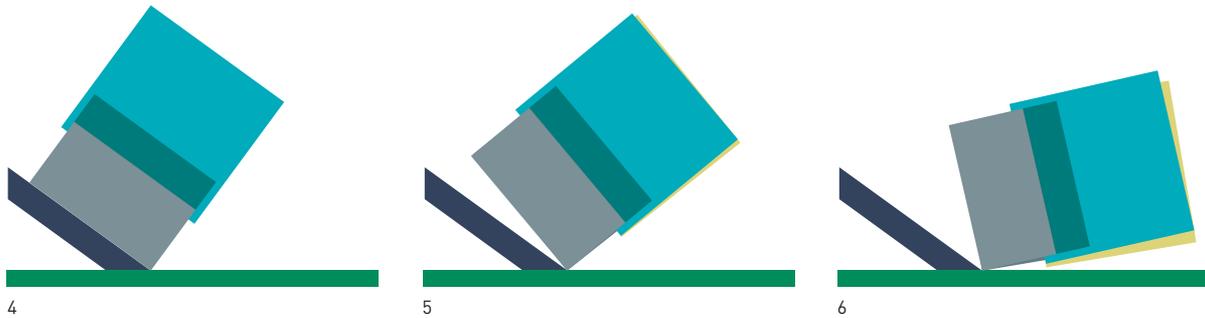


FIGURE 12

Essai statique du mini-compacteur posé sur une plate-forme à 35°
Tandem vibratory roller static test on a 35° platform

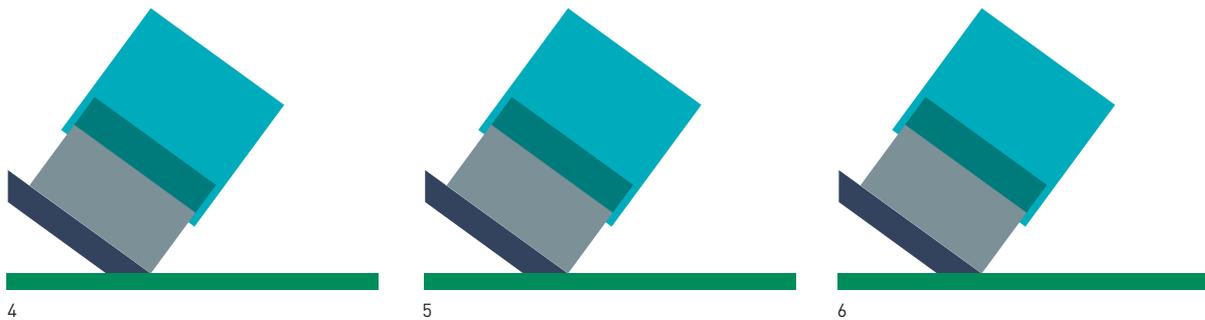


FIGURE 13

Angle d'attaque, mini-compacteur vu de dessus
Leading angle, tandem vibratory roller, top view

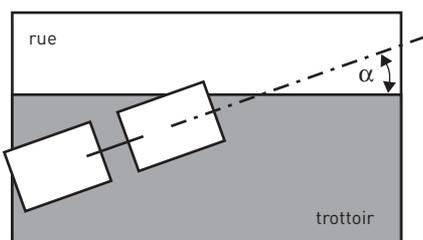
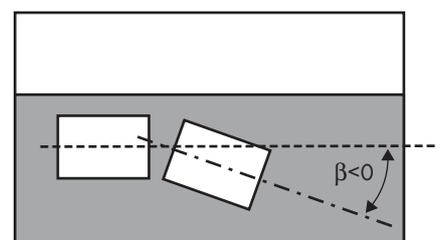
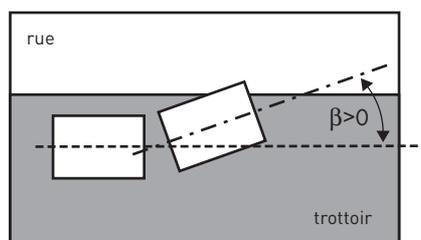


FIGURE 14

Angle de braquage, mini-compacteur vu de dessus
Steering angle, tandem vibratory roller, top view



Une série de simulations a été conduite avec comme seul paramètre d'étude l'angle d'attaque du mini-compacteur, afin de déterminer la valeur à partir de laquelle il n'y a plus renversement, dans la manœuvre suivante :

- trottoir de hauteur 185 mm (hauteur correspondant à une inclinaison de 28°),
- le mini-compacteur avance à une vitesse constante de 1 km/h,
- l'angle de braquage du mini-compacteur (angle formé par les axes des cylindres) est nul.

L'angle d'attaque au-delà duquel il n'y a plus renversement est de 12°.

INFLUENCE DE L'ANGLE DE BRAQUAGE

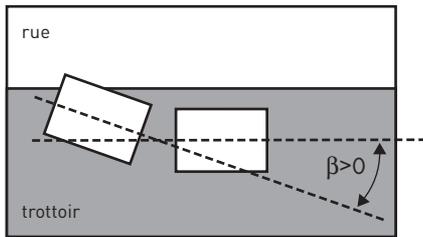
L'angle de braquage (β) est l'angle formé entre le cylindre avant et le cylindre arrière, il est positif lorsque l'on braque vers le bord du trottoir et négatif lorsque l'on braque dans l'autre sens (contre-braquage) (cf. Figure 14).

Une série de simulations a été conduite avec, cette fois, comme seul paramètre d'étude, l'angle de braquage du mini-compacteur, afin de déterminer la valeur à partir de laquelle il n'y a plus renversement du mini-compacteur dans la manœuvre suivante :

- trottoir de hauteur 185 mm (hauteur correspondant à une inclinaison de 28°),
- le mini-compacteur avance à une vitesse constante de 1 km/h,
- l'angle d'attaque du mini-compacteur est nul initialement (cf. Figure 15).

FIGURE 15

Position initiale du mini-compacteur vu de dessus, angle d'attaque 0° et angle de braquage $+5^\circ$
Tandem vibratory roller initial position, top view, leading angle 0° , steering angle lock $+5^\circ$



L'angle de braquage au-delà duquel il n'y a plus renversement est de 5° .

L'angle de braquage a un effet stabilisateur lorsqu'il est positif et augmente le risque de renversement lorsqu'il est négatif.

Son action, qu'elle soit stabilisatrice ou non, est plus importante que celle de l'angle d'attaque. En effet, un angle de braquage de 5° est suffisant pour pouvoir descendre un trottoir de 185 mm de hauteur à une vitesse de 1 km/h, alors qu'un angle d'attaque de 12° est nécessaire

pour effectuer le même franchissement avec un angle de braquage nul.

Cependant, l'angle de braquage et l'angle d'attaque sont liés, ce dernier étant la conséquence de l'existence du premier. Lors de la descente d'un trottoir, si l'angle de braquage est nul, alors l'angle d'attaque est constant et si l'angle de braquage est constant alors l'angle d'attaque varie. Il est alors difficile de quantifier l'effet du braquage par rapport à l'effet de l'angle d'attaque sans aller plus loin dans la description de la descente d'un trottoir.

L'angle de braquage a pour effet de modifier l'angle d'attaque du cylindre arrière par rapport à l'angle d'attaque du cylindre avant. Lorsqu'il est positif (respectivement négatif), l'augmentation de l'amplitude de l'angle de braquage a également pour effet d'augmenter (respectivement diminuer) la longueur de la trajectoire et par conséquent l'intervalle de temps séparant le contact du cylindre avant avec le sol du contact du cylindre arrière. L'instant du second choc peut soit amplifier le mouvement de renversement initié par le choc du cylindre avant, soit au contraire l'atténuer. Ce phénomène d'interférence a été mis en évidence grâce au modèle et doit être pris en compte dans la perspective de mise au point d'un code d'essai de stabilité dynamique.

MANŒUVRE DE DESCENTE : COMBINAISON ANGLE D'ATTAQUE ET ANGLE DE BRAQUAGE

La descente d'un trottoir peut s'exécuter de deux manières, en combinant braquage et angle d'attaque.

La Figure 16 illustre la manière la plus risquée. Elle consiste à braquer dans un premier temps puis à contrebraquer pour amener le cylindre avant tangent au bord du trottoir. L'angle de braquage est négatif, la partie avant ayant un angle d'attaque inférieur à la partie arrière.

La seconde manière est moins intuitive (cf. Figure 17) : elle nécessite de contrebraquer dans un premier temps puis de braquer, pour obtenir un angle de braquage positif.

Les deux types de manœuvres ont été modélisés avec un angle de braquage et un angle d'attaque figés, afin de déterminer la hauteur maximum de trottoir ne provoquant pas de renversement :

■ Pour une vitesse de 0,5 km/h, un angle de braquage $\beta = -10^\circ$ et un angle d'attaque $\alpha = 10^\circ$, la hauteur franchissable est au maximum de 154 mm (cf. Figure 16).

■ Pour une vitesse de 0,5 km/h, un angle de braquage $\beta = 10^\circ$ et un angle d'attaque $\alpha = 10^\circ$, la hauteur franchissable est au maximum de 204 mm (cf. Figure 17).

Les calculs montrent clairement que la deuxième manœuvre est la plus stable. Une recommandation simple pour le conducteur est d'orienter la machine dans le sens de la plus grande pente. Cette recommandation est par ailleurs applicable à tout type de véhicule dont la longueur est supérieure à la largeur, ce qui est le cas de la majorité des machines mobiles.

FIGURE 16

Premier type de manœuvre de descente : risque élevé de renversement latéral
First type of descending manoeuvre: high lateral overturning risk

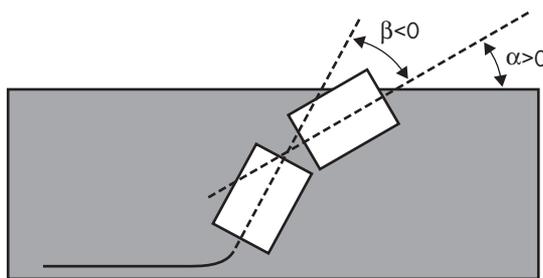
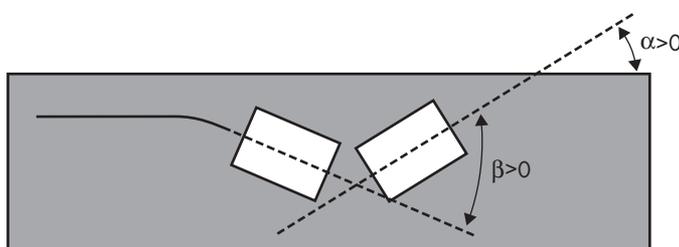


FIGURE 17

Second type de manœuvre de descente : risque faible de renversement latéral
Second type of descending manoeuvre: low lateral overturning risk



CONCLUSION

Cette étude avait pour but de déterminer les limites de stabilité latérale d'un mini-compacteur du commerce, de largeur 80 cm, dans des conditions statiques et dynamiques.

L'étude a été réalisée par calcul numérique, à l'aide d'un modèle mis au point et validé par des essais en laboratoire.

Cette étude du comportement dynamique d'un mini-compacteur lors de la descente d'un trottoir, a mis en évidence les points suivants :

■ Dans le cas d'un essai quasi-statique de basculement d'un trottoir, compacteur à l'arrêt, en porte-à-faux sur le bord du trottoir : le basculement est obtenu pour une hauteur de trottoir supérieure à 135 mm. Cette hauteur limite de trottoir (135 mm) garantissant la stabilité de la machine, est plus faible que la hauteur des trottoirs habituellement rencontrée (140 mm pour une bordure de trottoir normalisée de type T2 [2]). Cette hauteur

limite est également sensiblement plus faible que la hauteur limite obtenue par un essai normalisé quasi-statique.

■ Les calculs ont montré que la vitesse a un effet sur la stabilité. Cet effet est très modéré et ne peut en aucun cas être retenu comme paramètre de contrôle de la stabilité pour des recommandations aux conducteurs.

■ L'angle d'attaque, qui est l'angle entre l'axe longitudinal de la partie avant et le bord du trottoir, a un effet stabilisateur mais, bien que plus influent que la vitesse, il reste modéré.

■ Le troisième et dernier facteur étudié est l'angle de braquage, angle formé par l'axe du cylindre avant et l'axe du cylindre arrière. Il a un effet stabilisateur lorsque le braquage tend à orienter la machine perpendiculairement au bord du trottoir et augmente le risque de renversement latéral dans le cas contraire. Son effet est nettement plus important que celui de l'angle d'attaque dans les deux sens, effet stabilisateur ou augmentation du risque de renversement latéral.

■ Enfin, lors de la descente d'un trottoir

combinant un angle d'attaque non nul et un braquage, deux types de manœuvre ont été étudiés : la première, consistant à braquer en direction du bord du trottoir puis à amener le cylindre avant tangent au trottoir en contre-braquant, présente le risque de renversement le plus important. La seconde manœuvre, consistant à contre-braquer d'abord puis à braquer en direction du trottoir, réduit, elle, le risque de renversement.

Plus largement, cette étude a permis de démontrer et d'expliquer l'effet des paramètres influant sur la stabilité dynamique des cylindres à conducteur porté. Il apparaît ainsi clairement qu'un code d'essai de stabilité pourrait s'échafauder sur la base d'un essai de roulement à faible angle d'attaque, faible vitesse et faible angle de braquage. Il serait plus représentatif que l'essai normalisé actuellement en vigueur.

Reçu le : 07/04/2005

Accepté le : 21/10/2005

BIBLIOGRAPHIE

[1] Norme NF EN 500-4 Novembre 1995 Machines mobiles pour la construction de routes - Sécurité - Partie 4 : exigences spécifiques pour engins de compactage.

[2] Norme NF P98-302 "bordures et caniveaux préfabriqués en béton".