

DIAGNOSTIC DES CHAUSSÉES ROUTIÈRES LE DÉFLECTOMÈTRE À MASSE TOMBANTE (FWD)

Afin d'améliorer les conditions de travail de ses techniciens et de gagner en efficacité, les services techniques de Colas Île-de-France Normandie mettent en avant l'usage du déflectomètre à masse tombante pour les mesures de déflexion, le substituant aux essais classiques à la poutre de Benkelman. Des campagnes d'essais croisés ont confirmé l'intérêt de ce matériel, qui permet d'optimiser les études de diagnostic et de conception des renforcements de chaussées.

Signalisation pour une auscultation sur une route nationale.



Dans le cadre de travaux de réhabilitation ou de renforcement d'une chaussée, il est nécessaire d'en connaître les caractéristiques pour proposer une solution optimisée et adaptée à son

usage. Les principaux éléments à évaluer sont l'épaisseur des couches et la déformabilité.

La déflexion d'une chaussée est définie comme le déplacement vertical en un point d'une chaussée, engendré par le passage d'une charge (NF P98-200-1³). En France, la charge de référence est celle de l'essieu de référence : essieu isolé à roues jumelées de charge égale à 130 kN (NF P98-086³).

Pour les études qui présentent des linéaires importants, les mesures de déflexion sont réalisées avec des appareils à grand rendement comme les déflectographes ou les curviamètres.

Sur les chantiers de quelques centaines de mètres, l'intervention de ces matériels est contraignante et onéreuse. La mesure de la déflexion est donc couramment réalisée avec poutre Benkelman et un camion. Dans le contexte de la région parisienne, la réalisation d'essais à la poutre pose notamment des problèmes de sécurité. L'usage d'un déflectomètre à masse tombante se présente donc comme une alternative intéressante.

MESURES DE DÉFLEXION À LA POUTRE DE BENKELMAN

CONDITIONS DE RÉALISATION

Les conditions de réalisation des mesures de déflexion à la poutre sont définies dans la norme NP P98-200-2³ : « On mesure en un point donné de la chaussée et dans des conditions spécifiées, la déflexion provoquée par une charge roulante se rapprochant du point de mesures.

Celle-ci est constituée par un demi-essieu à roue jumelée de charge F/2. La mesure permet de tracer la « ligne d'influence » qui traduit les variations de la déformation de la chaussée en fonction de la distance du point de mesure à la charge mobile. Au cours du déplacement, le point de mesure reste dans l'axe du jumelage. »

DIFFICULTÉS DE MISE EN ŒUVRE

L'application de cette norme présente plusieurs difficultés de mise en œuvre.

La charge roulante

Le camion utilisé pour les mesures doit avoir un essieu simple à roues jumelées à l'arrière (photo 1).

AUTEURS

Emmanuel Loison
Chef du service Auscultation
CST Colas SA

Joao Manuel Vieira
Chef de service technique
Colas Île-de-France Normandie

Sébastien Denaes
Chef du service Métrologie
CST Colas SA

Sébastien Pellevrault
Directeur
Rincent ND Technologies

-Photo 1-

Mesure de la déflexion à la poutre Benkelman sur chaussée.



-Photo 2-

Déflectomètre à masse tombante Heavydyn de Rincenc ND Technologies.



Si certains camions sont spécialement préparés et lestés, il est très courant qu'un camion de chantier soit utilisé. Dans ce cas, son chargement doit être particulièrement soigné.

L'essieu arrière, pesé seul sur une bascule, doit atteindre les 130 kN de référence à $\pm 2\%$. Cet essieu standard est dénommé « 13 tonnes ». Toutefois, en toute rigueur, il faudrait que la balance indique une valeur de 13,250 t $\pm 0,265$, dépassant la charge maximale autorisée de 13 t pour un essieu telle que définie dans l'article R312-5 du Code de la route.

De plus, lors du déplacement du camion vers le site d'essai, la charge peut se trouver légèrement déplacée vers l'avant et diminuer la charge réelle lors des essais. La charge étant répartie de façon inégale dans la benne, le chauffeur donne parfois des coups de frein énergétique pour redistribuer son chargement.

Le mode opératoire

La norme spécifie que le camion, placé à plusieurs mètres du point de mesure, doit reculer pour que la pointe de la poutre vienne se loger entre les pneus du jumelage, ce qui est facilité par l'usage d'une règle de guidage. La déflexion doit être alors lue régulièrement à différentes distances pour tracer une ligne d'influence.

Dans la pratique, seule la valeur de la déflexion maximale est lue sur le comparateur à aiguille et la ligne d'influence n'est pas tracée. Le rayon de courbure n'est pas calculé.

De façon presque généralisée, la mesure de la déflexion est réalisée en plaçant la pointe de la poutre entre les roues du jumelage, puis en faisant avancer le camion. Cette dérogation, acceptée par Laboroute, contribue à limiter les accidents matériels (poutres fréquemment écrasées par le camion) et surtout à éviter le risque de voir un technicien renversé par le camion. La déflexion mesurée doit alors être appelée « déflexion élastique » et non « déflexion maximale ».

Les conditions de travail

La mesure de déflexion est un essai qui nécessite de transporter le matériel sur l'ensemble du linéaire. Régulièrement le technicien doit se baisser, poser la poutre, la placer et régler le comparateur, faire sa mesure et se relever pour repartir quelques mètres plus loin. Une poutre Benkelman pesant entre 10 et 15 kg, cet essai reste assez physique. Pour limiter les risques de troubles musculosquelettiques, il est conseillé d'en limiter la fréquence et d'alterner les opérateurs.

La sécurité

Les essais sont souvent réalisés sur une chaussée sous circulation. Cela implique la mise en place d'un dispositif adapté, parfois lourd et contraignant. De plus, même si la voie est neutralisée, les mesures dans les bandes des roulements nécessitent que le technicien reste proche des voies circulées. Sur des chaussées fortement circulées, cet essai reste à risque.

MESURES DE DÉFLEXION AU DÉFLECTOMÈTRE À MASSE TOMBANTE

Dans le cadre de ses travaux routiers, Colas Île-de-France Normandie réalise de nombreuses études de réhabilitation ou de renforcement de voiries, pour lesquelles les mesures de déflexion sont nécessaires.

Soucieux de préserver la sécurité de son personnel, la direction technique a décidé fin 2018 de limiter la réalisation d'essais de déflexion à la poutre de Benkelman et d'investir dans un déflectomètre à masse tombante ou FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

Le choix de Colas Île-de-France Normandie s'est porté sur l'Heavydyn de Rincenc ND Technologies (photo 2).

HISTORIQUE

Apparus dans les années 1980, les déflectomètres à masse tombante ont connu un développement important en Europe et dans le monde. D'usage limité en France, où les déflectographes font référence, ils sont principalement utilisés sur chaussées aéronautiques, avec une configuration « lourde » ou HWD pour *Heavy Weight Deflectometer* (plaques de 30 ou 45 cm de diamètre, charge de 250 kN). Une méthodologie est précisée dans le guide technique *Auscultation des chaussées souples aéronautiques au HWD*⁴.

Les déflectomètres à masse tombante sont cités dans le guide *Diagnostic et conception des renforcements de chaussées*⁵ pour des mesures ponctuelles de déflexion, mais aucune méthode n'est actuellement définie et aucune norme ne régit la réalisation de mesures avec cet outil sur chaussée routière en France.

Pourtant, dès 1997, le déflectomètre à masse tombante est décrit comme « juste et répétable » et préciser qu'il « est également concevable de l'utiliser dans le cadre d'entretiens sur des sections relativement courtes de chaussées souples, surtout si l'on veut exploiter les informations pour dimensionner une opération d'entretien structurel »⁶.

Dans d'autres pays, comme par exemple au Royaume-Uni, l'usage des déflectomètres à masse tombante pour les chaussées routières est routinier : ils sont cités dans le volume 7 du *Design Manual for Road and Bridges*⁷ et l'étalonnage est décrit dans la notice *Accreditation and Quality Assurance of Dynamic Plate Test Survey Devices*⁸.

PRINCIPE DE L'ESSAI

Pour mesurer la déflexion, une masse coulissante est lâchée sur une plaque circulaire placée sur le point de mesure. La déformation induite est alors mesurée par une série de géophones placés sur une barre de mesure posée sur la chaussée (figure 1). En complément des tampons en caoutchouc (ou *buffers*), qui amortissent le choc sur la plaque, un capteur enregistre la force appliquée sur la plaque.

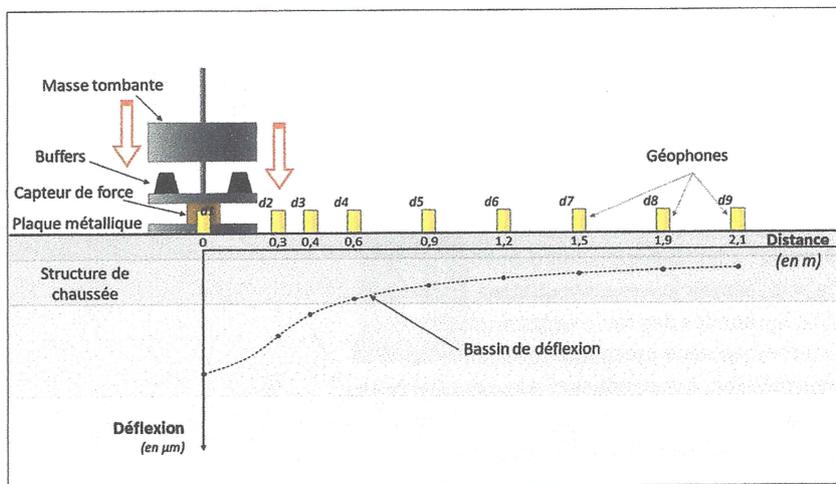
Si la mesure est ponctuelle, le chargement est dynamique, de type impulsionnel. Il est possible de modifier la masse de la masse tombante, de régler la hauteur de chute, de choisir la dureté des tampons et de changer le diamètre de la plaque selon la charge et la configuration souhaitées.

Pour des essais sur chaussée routière, la charge appliquée peut être de 65 kN (en référence à l'essieu standard) sur une plaque de 30 cm de diamètre. Le temps d'impulsion de cette charge est d'environ 30 à 40 millisecondes, ce qui correspond au passage d'un poids lourd roulant à 70 km/h.

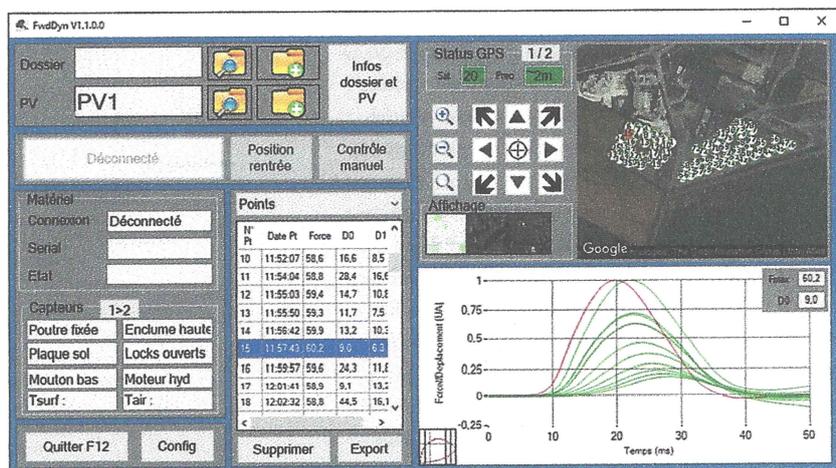
Selon la configuration du chantier et la facilité de déplacement, il est possible de réaliser entre 30 à 50 mesures par heure.

À chaque essai, la température de surface de la chaussée et la température de l'air sont enregistrées. L'emplacement de l'essai est localisé par un GPS, complété par odomètre qui détermine la distance entre les emplacements de mesure (photo 3). L'ensemble du matériel est placé sur une remorque, équipée d'éléments de signalisation (gyrophare, rampe LED, panneau travailleur AK5...). Une caméra permet un positionnement précis de la plaque si nécessaire.

—Figure 1—
Schéma de principe d'un déflectomètre à masse tombante.



—Photo 3—
Écran de commande et de contrôle de réalisation des essais.



EXPLOITATION DES RÉSULTATS

La méthodologie retenue pour le diagnostic et la conception des renforcements des chaussées est présentée dans le guide de l'Idrim. La prise en compte des déflexions centrales issues de déflectomètres à masse tombante reste identique à celles issues de mesures à la poutre ou de déflectographes.

Les déflectomètres à masse tombante embarquent entre 7 et 15 géophones pour la mesure du bassin de déflexion, un capteur de force et deux capteurs de température. L'exploitation complète de ces données nécessite des logiciels spécialisés de rétrocalcul, les plus courants étant Alizé-LCPC via le module « Rétrocalcul », ELMOD ou encore ROSY.

Cependant, l'analyse des données peut être succinctement classée en 3 niveaux :

- Utilisation du capteur de déflexion central à charge constante (typiquement 65 kN en utilisation routière) pour obtenir la déflexion caractéristique de la chaussée telle que réalisée à la poutre de Benkelman. Les premiers essais croisés montrent que cette déflexion est très fortement corrélée à celle de la poutre de Benkelman et permettent une exploitation directe sur chantier des résultats.
- Utilisation des capteurs de déflexion autour du centre, entre -300 mm et +300 mm, pour obtenir une mesure du rayon de courbure.
- Utilisation de l'ensemble des capteurs pour obtenir, par rétrocalcul, le module des couches de chaussée. Cette exploitation nécessite aussi la connaissance de la structure interne de la chaussée (épaisseur, matériaux, collage) obtenue par ailleurs par radar géophysique ou carottage.

Le service Dimensionnement du Campus scientifique et technique (CST) Colas a développé une méthodologie de traitement des données issues des mesures de déflectomètres à masse tombante pour les structures routières. Elle prend en compte ces mesures de déflexion en apportant les correctifs rendus nécessaires par une surface de chargement et une vitesse de sollicitation différentes de celles réalisées avec un essieu standard.

COMPARAISON DES MÉTHODES D'ESSAIS

LA SURFACE DE CHARGEMENT

Pour les deux types d'essais, la charge appliquée sur la chaussée est de 65 kN (en référence au demi-essieu standard). Toutefois, son application sur la chaussée est différente. En effet, le camion applique cette charge par ses pneumatiques, modélisés par une pression de 0,662 MPa sur deux cercles de 25 cm de diamètre avec un entraxe de 37,5 cm. Pour un déflectomètre à masse tombante, la charge est appliquée par la plaque de 30 cm de diamètre, pour laquelle la pression modélisée est de 0,920 MPa. Cette différence d'application de la charge sur la chaussée implique une réponse en déflexion qui pourra être différente en fonction du type de structure, des épaisseurs et du module des couches, ainsi que des caractéristiques du sol support.

LA SOLLICITATION

Pour la mesure avec la poutre Benkelman, l'essai peut être considéré comme statique. En effet, pour des mesures réalisées en marche avant (dérogation Laboroute), le camion est à l'arrêt et la poutre positionnée entre les roues d'un des jumelages arrière. Le camion avance alors et s'arrête hors de la zone d'influence. Le technicien lit sur le comparateur la déformation associée à la relaxation de la charge appliquée.

Dans le cas des déflectomètres à masse tombante, la charge est dynamique. Par exemple, pour les essais présentés, les temps d'application (*pulse time*) sont de l'ordre de 30 ms.

Le comportement mécanique des matériaux bitumineux est sensible à la température (d'où la correction apportée aux mesures de déflexion, pour les ramener à la température conventionnelle de 15 °C), mais aussi à la vitesse d'application de la charge. Une impulsion de 30 ms correspondrait à une fréquence de sollicitation de l'ordre de 30 Hz. Selon la structure de la chaussée, l'influence du type de sollicitation peut mener à des différences de déflexion.

CAMPAGNE D'ESSAIS

Afin de promouvoir l'utilisation des déflectomètres à masse tombante au lieu de la poutre Benkelman, une série d'essais croisés a été réalisée par le laboratoire central de Colas Île-de-France Normandie et le CST Colas, associés à Rincen ND Technologies.

Deux types de déflectomètres ont été utilisés :

- le Heavydyn de Colas Île-de-France Normandie, produit par Rincen ND Technologies (photo 4) ;
- le PRI 2100-S du CST Colas, produit par Carlbro (désormais Sweco) (photo 5).

—Photo 4—
Déflectomètre Heavydyn
du laboratoire central de Colas
Île-de-France Normandie.



—Photo 5—
Déflectomètre PRI 2100-S du CST Colas.



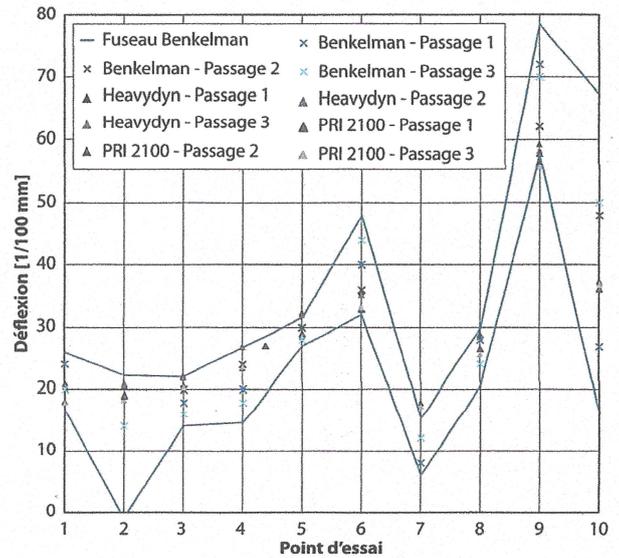
-Photo 6-

Localisation des 10 points de mesure sur le parking du laboratoire.



-Figure 2-

Déflexions mesurées à la poutre et avec les déflectomètres (charge de 65 kN).



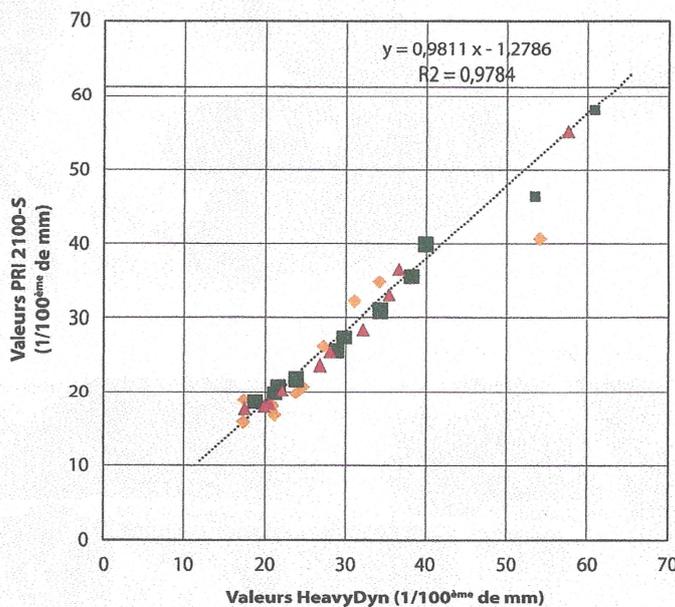
-Tableau 1-

Comparaison des déflexions mesurées à différentes charges.

	Poutre	Heavydyn			PRI 2100-S		
		55 kN	60 kN	65 kN	55 kN	60 kN	65 kN
Moyenne (m)	25,1	27,2	29,6	31,7	24,3	27,6	29,9
Écart-type (σ)	15,7	10,9	11,8	12,6	8,6	11,6	12,1
Déflexion caractéristique ($m + 2\sigma$)	56,4	49,1	53,2	56,8	41,5	50,9	54,0

-Figure 3-

Comparaison des mesures des deux déflectomètres.



- 6 séries de mesures de déflexion à la poutre Benkelman ;

- pour chaque déflectomètre, une série de mesures de déflexion à 55, 60 et 65 kN.

Les valeurs de déflexion mesurées à la poutre Benkelman et celles mesurées au moyen des deux déflectomètres pour un chargement à 65 kN sont présentées sur la **figure 2**. Les valeurs ont été corrigées en fonction de la température, comme indiqué dans le guide de l'Idrri.

Dans l'ensemble, les déflexions mesurées sont faibles (inférieures à 70 1/100^e de mm). Elles sont caractéristiques d'une structure semi-rigide.

Sur ces essais croisés avec les déflectomètres sous une charge de 65 kN, les déflexions mesurées sont souvent plus élevées que celles relevées à la poutre (**tableau 1**). Les mesures à 60 kN présentent une meilleure corrélation, mais cela ne peut pas être extrapolé à d'autres types de structures et ni à d'autres niveaux de déformabilité.

Sur l'ensemble des 30 mesures réalisées avec les deux déflectomètres d'âge et de conception différentes, les différences point par point sont inférieures à 5 1/100^e de mm, à l'exception d'un point aberrant (**figure 3**).

Ces valeurs de corrélation sont celles typiquement rencontrées durant les essais croisés européens CROW (Pays-Bas, campagne biannuelle) et TRL (Royaume-Uni, campagne annuelle), où les différences entre les instruments sont inférieures à 5 %⁹⁻¹⁰.

Une première campagne d'essais a été réalisée dans la cour du laboratoire de Guyancourt (91) en avril 2019. Les mesures ont été réalisées sur 10 points repérés (**photo 6**). L'ensemble du programme d'essai comprenait :

BILAN DES ESSAIS

Cette campagne de mesures, même si elle reste modeste, confirme la bonne répétabilité des essais réalisés avec les déflectomètres à masse tombante. De même, les résultats obtenus sont cohérents

avec ceux obtenus avec la poutre de Benkelman. Toutefois, si les valeurs sont proches, elles ne sont pas identiques, comme pour toutes les autres mesures réalisées avec des méthodes d'essai et des matériels de conception différente. Pour corriger cela, il est nécessaire d'établir une méthodologie d'utilisation des déflexions réalisées avec un déflectomètre.

CONCLUSION

Face aux contraintes de réalisation des essais à la poutre Benkelman, l'utilisation d'un déflectomètre à masse tombante par les services techniques de Colas Île-de-France Normandie est une alternative avantageuse, aussi bien du point de vue sécuritaire pour ses techniciens, que pour les informations complémentaires fournies lors de l'essai, permettant d'optimiser les solutions techniques proposées.

Les campagnes d'essais croisés entre mesures à la poutre Benkelman et déflectomètres à masse tombante ont confirmé l'intérêt d'utiliser ces derniers pour le diagnostic et la conception des renforcements des chaussées.

Les matériels testés lors de ces campagnes donnant satisfaction, Colas Île-de-France Normandie et le

CST Colas ont entamé une campagne d'essais complémentaires à plus large échelle depuis l'été 2019 afin d'étoffer leur expertise sur une plus large gamme de déflexions et de structures routières. ■

RÉFÉRENCES

1. NF P98-200-1, « Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 1 : définitions, moyens de mesure, valeurs caractéristiques », juillet 1991.
2. NF P98-086, « Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves - Chaussées - Terrassement - Dimensionnement et terminologie - Vérification du dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves », mai 2019.
3. NF P98-200-2, « Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 2 : détermination de la déflexion et du rayon de courbure avec le déflectomètre Benkelman modifié », novembre 1992.
4. STAC, *Auscultation des chaussées souples aéronautiques au HWD*, Guide technique, 2014.
5. Idrrim, *Diagnostic et conception des renforcements de chaussées*, 2016.
6. P. Lepert, J.-M. Simonin, J.-M., R. Kobish, « Le FWD : performances, utilisations en France et en Europe », *BLPC*, mai-juin 1997, pp. 19-28.
7. Highways England, *Design Manual for Road and Bridges*, 2008.
8. UK Road Liaison Group, *Accreditation and Quality Assurance of Dynamic Plate Test Survey Devices*, éd. Version 2.0, July 2019.
9. CROW, "FWD Correlation trial 2017", 2017.
10. TRL, "Highways Agency 2018 national Falling Weight Deflectometer Correlation trials", 2018.