

1 Information sur le Falling Weight Deflectometer

Ces appareils sont les leaders mondiaux en nombre depuis une dizaine d'années bientôt, et leader également en qualité de part les informations qu'ils donnent.



1.1 L'appareil FWD

Le déflectomètre à masse tombante ou FWD (**F**alling **W**eight **D**eflectometer) est conçu pour mesurer le bassin des déflexions provoqué par une masse tombante appliquée sur une plaque (de diamètre 30 cm).

Il se compose :

- d'une remorque tractée de 850 kg environ transportant les éléments de mise en charge et les neuf capteurs de déplacement,
- d'un système de pilotage automatique, d'acquisition et de traitement de l'information, embarqué dans le véhicule tracteur.

Après la mise en station de la remorque au droit du point de mesure, la masse est libérée d'une hauteur pouvant varier de 2 à 40 cm provoquant une force variable de 7 à 135 kN. La hauteur de chute et la force appliquée sont fixées en fonction de la nature de la structure testée. La transmission de la charge se fait par un ressort dont la constante permet de définir la durée du chargement. Les 9 capteurs (dont un est au centre de la plaque) enregistrent la déformée longitudinale sur 2 mètres environ du point d'application de la charge.

Pour les structures routières, les caractéristiques de chargement sont réglées de manière à obtenir une impulsion d'une durée de 28 ms, soit environ 34 Hz, correspondant à la durée de charge d'un poids lourd circulant à une vitesse moyenne d'environ 70 km/h.

1.2 Les mesures avec le FWD

Au droit de chaque station, **9 déflexions** sont enregistrées par les 9 capteurs répartis le long d'une poutre. Le premier capteur est situé au centre de la plaque de chargement, et le dernier à 1,80 m environ dans l'axe longitudinal et dans le sens des mesures. L'opérateur, qui contrôle tous les éléments sur l'écran de l'ordinateur de bord, fait exécuter au moins deux fois l'essai avant de valider la mesure.

A ce stade, on dispose de la **demi déformée** (voir figure) **provoquée par un demi essieu standard**, ainsi que de tous les paramètres nécessaires à l'exploitation future des résultats, par exemple :

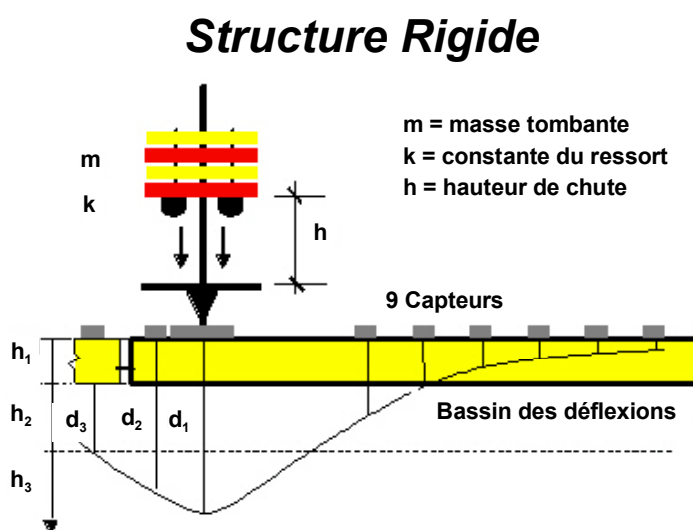
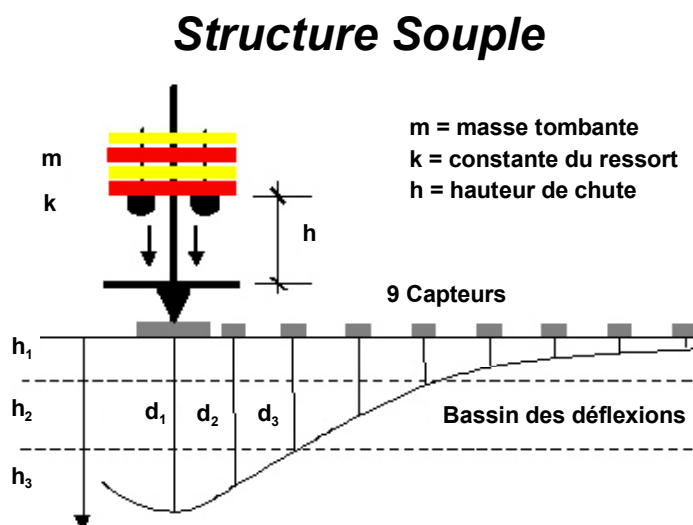
- la pression de contact sous la plaque et la charge totale,
- la durée d'application de la charge en ms
- les déflexions enregistrées par les 9 capteurs

Un des avantages de l'appareil FWD, et non des moindres par rapport aux appareils "concurrents" utilisant des poutres Benkelman ou similaires, c'est qu'il est **utilisable sur les chaussées rigides**.

En effet, l'essai n'étant pas réduit à une seule mesure ponctuelle de la déflexion, les structures rigides discontinues (par exemple dalles béton) peuvent être testées au même titre que les chaussées souples. Les caractéristiques "de référence" de chaque dalle sont mesurées au centre. Au bord et sur le coin, les mêmes caractéristiques sont relevées afin de les comparer aux résultats de référence (centre). La technique de mesures au bord et au coin de dalle est représentée sur l'illustration.

La possibilité de mesurer simultanément de part et d'autre de la dalle chargée, permet de calculer par exemple la qualité du "**transfert de charge**" et la "**déformation différentielle**" au joint.

En résumé, le FWD simule le passage d'un poids lourd circulant à une vitesse de 70 km/h et enregistre la déformée induite sur une longueur de 2 m environ. Le but étant de mesurer en vraie grandeur les réponses de la chaussée pour laquelle il faut donner un avis pertinent concernant d'une part son état "structurel" actuel et, d'autre part, sa capacité à supporter correctement le trafic futur.



2 Exploitation des mesures FWD

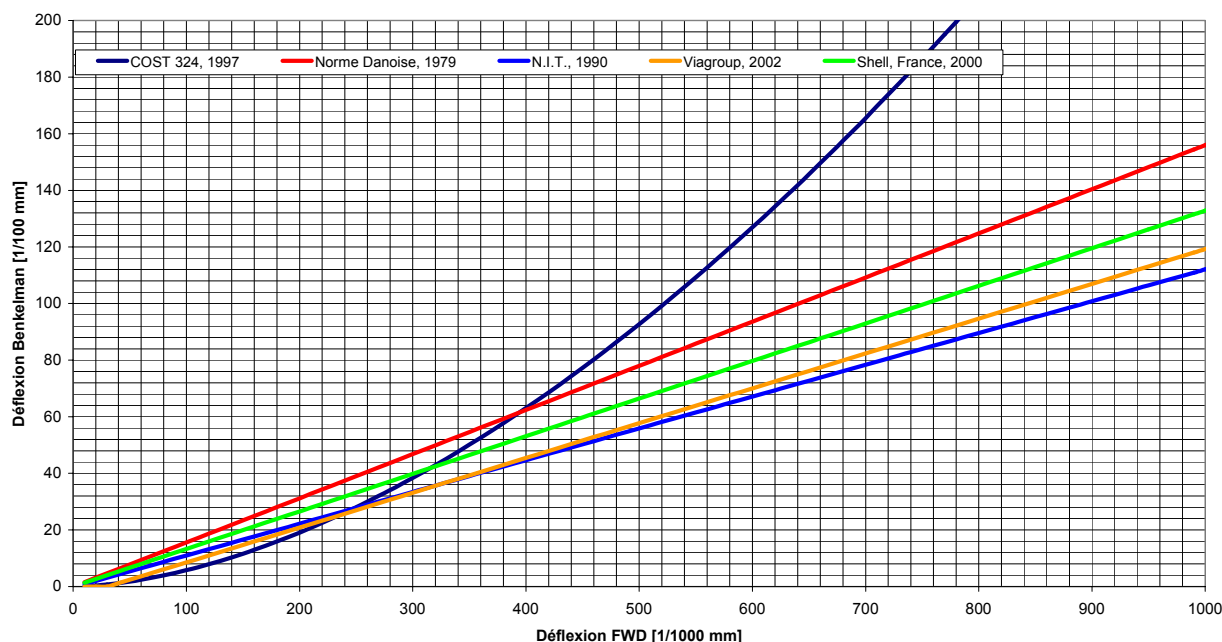
Pour l'évaluation de la portance des chaussées routières et aéroportuaires, souples ou rigides notre société propose l'utilisation de son déflectomètre à masse tombante FWD (Falling Weight Deflectometer).

Cet appareil est exploité avec succès depuis 1992 sur tous les types de structures routières suisses. Il sert actuellement de fil conducteur d'une part à l'établissement des futures normes SN valables pour le dimensionnement "dynamique" des structures routières (Cf. mandat de recherche OFR 18/94) et, d'autre part, à la confection des "pré-normes" européennes (Suisse y compris).

Bien que cette catégorie d'appareil soit conçue pour exploiter analytiquement l'entier de la déformée (9 déflexions sur 1,80 m de longueur) mesurée au droit de chaque station de mesure, il est bien sûr possible d'exploiter la déflexion maximale seule, transformée en "standard" Benkelman ou Lacroix.

2.1 En terme de déflexion Benkelman / Lacroix / Curviamètre

La déflexion maximale FWD est "transformable" en valeur équivalente Benkelman / Lacroix / Curviamètre, selon des coefficients qui sont définis par exemple dans les normes Danoises ou dans le mandat de recherche COST324, « **Long Term Performance of Road Pavement** », Final report of the action, Brussels 1997. La figure ci dessous illustre quelques transformations Deflexions FWD-Déflexions Benkelman.



Notre société a obtenu l'accréditation (STS 090) pour la plupart de ses prestations d'analyses des matériaux en automne 1994 déjà, y compris pour les mesures in situ des déflexions avec le FWD.

Enfin si les données de la superstructure le permettent (épaisseurs connues des bétons bitumineux, dans le profil en long et en travers), la durée de vie résiduelle de la chaussée testée peut être calculée : en terme de cm de renforcement nécessaire ou de nombre d'années disponibles sans renforcement.

2.2 En terme de vie résiduelle et épaisseur de renforcement

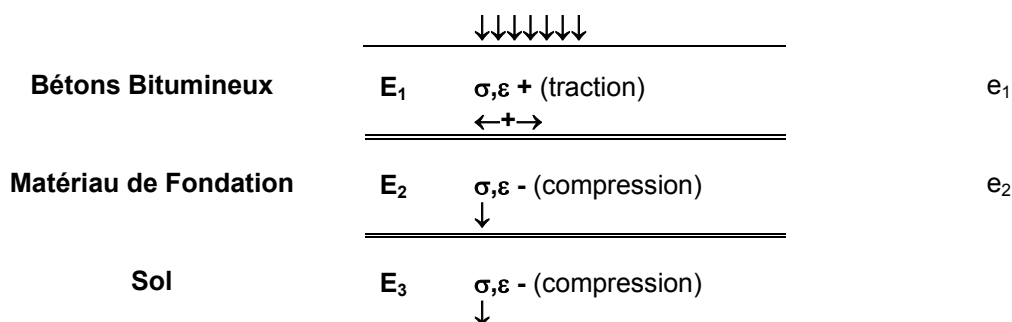
C'est dans ce domaine particulier que l'appareil FWD excelle et pour lequel il a été conçu.

2.2.1 Cas des structures souples

Au droit de chaque station de mesures, nos logiciels d'exploitation procèdent selon deux phases qui sont les suivantes :

- **validation des mesures de déflexions**, en s'assurant que la demi-déformée longitudinale enregistrée par les 9 capteurs satisfait aux équations générales de Boussinesq (massif semi-infini) et peut donc être reproduite précisément avec un module moyen,
- **calcul des modules élastiques E_i** des couches. Après avoir introduit les épaisseurs (e_i) des différentes couches de la structure et compte tenu d'une part du module moyen défini et, d'autre part, des valeurs mesurées lors de l'essai, le module de chacune des couches est calculé (calcul inverse) ainsi que les contraintes et déformations correspondantes. Les éléments théoriques utilisés lors de cette phase de calculs itératifs sont basés sur le principe MET (Method of Equivalent Thicknesses), ou méthode d'Odemark-Kirk, complétés par la théorie de Boussinesq.

A la fin de cette première phase d'exploitation des mesures, les données suivantes, qui sont les réponses in-situ de la structure, sont disponibles au droit de chaque point testé :



Après cette partie analytique, il reste à interpréter les résultats en terme de "résistance globale à la portance" vis à vis du trafic futur prévu. Dans un premier temps, plusieurs paramètres doivent être définis, en particulier la variation des modules des bétons bitumineux en fonction de la température. **L'interprétation "empirique" des résultats**, que nous proposons au travers d'un logiciel original, combine un critère "structurel" qui est la déformation horizontale à la base des bétons bitumineux, et un critère "fonctionnel", qui définit la contrainte verticale sur les couches non liées de fondation.

Tous deux permettent de définir le volume de trafic admissible, ou durée de vie résiduelle.

Ainsi pour chaque station de mesures avec notre FWD, nous disposons en plus des modules de chaque couche et des contraintes et déformations aux interfaces :

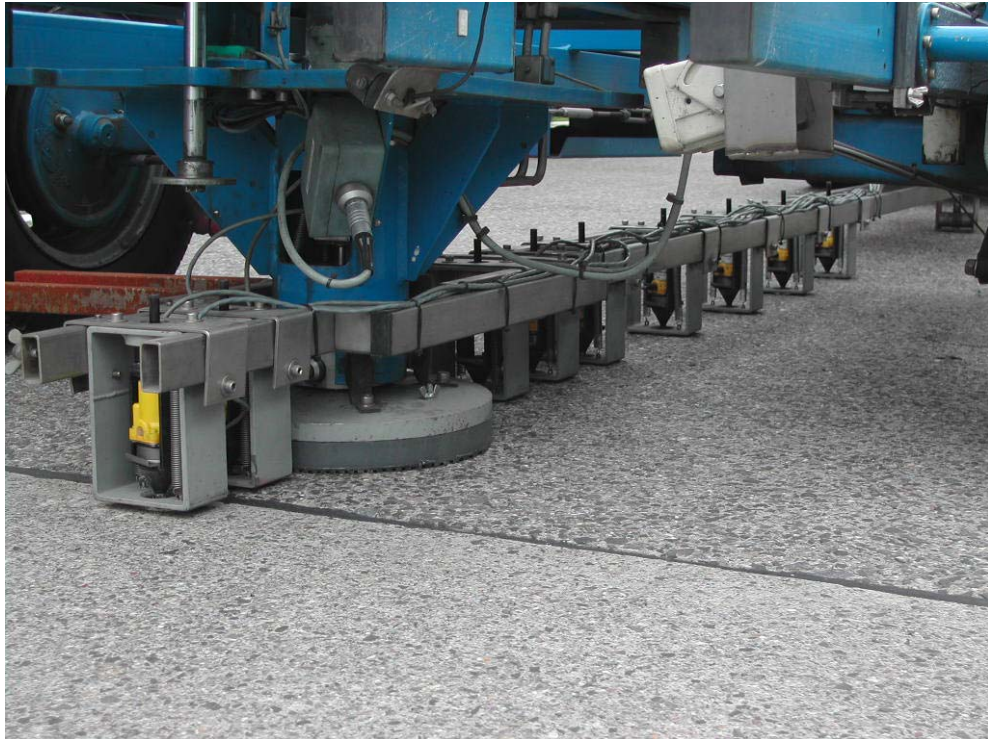
- de la vie résiduelle de la structure,
- de l'épaisseur éventuelle de renforcement nécessaire ainsi que la couche à l'origine de la "ruine" de la structure.

Information sur le Falling Weight Deflectometer

2.2.2 Cas des structures rigide

Les mesures au Falling Weight Deflectometer (FWD) sur dalle béton nous permettent de calculer les informations suivantes :

- le **module élastique** des différentes couches en MPa (modèle multicouche)
- la durée de **vie résiduelle** [an] et les **épaisseurs de renforcement** [mm] éventuellement nécessaires (en béton bitumineux) compte tenu du trafic escompté (au joint comme au centre)
- le **module de réaction K** (Westergaard [MN/m³]) des couches inférieures (au joint comme au centre des dalles)
- le **transfert de charge** LT (selon la formule ci-dessous [%]) entre 2 dalles jointives (bord et/ou coin de dalle)
- la **déformation différentielle** DIF entre 2 dalles jointives (selon formule ci-dessous [10⁻⁶ mm])
- les **contraintes et déformations** relatives (traction à la base de la dalle et compression sur la couche de fondation)
- d'éventuelles **vides** sous les dalles



Le transfert de charge **LT** et la déformation différentielle **DIF** se calculent selon les formules suivantes :

$$LT = \frac{2 \cdot (d_3)}{(d_2 + d_3)} \cdot 100 [\%]$$

$$DIF = (d_2 - d_3) [10^{-3} mm]$$

avec :

LT	[%]	transfert de charge
DIF	[10 ⁻³ mm]	déformation différentielle
d₂	[10 ⁻³ mm]	déflexion sur dalle de référence chargée (8,16 t)
d₃	[10 ⁻³ mm]	déflexion sur dalle adjacente

2.3 En terme de ACN – PCN

La méthode ACN – PCN a été développée par l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale).

Le nom ACN – PCN provient de :

- ACN (Aircraft Classification Number) qui « exprime l'effet relatif d'un aéronef sur une chaussée souple ou rigide pour une résistance type spécifiée du terrain de fondation » et de
- PCN (Pavement Classification Number) qui « exprime la force portante d'une chaussée souple ou rigide pour une exploitation sans restriction.

Le PCN ainsi calculé indiquera qu'un avion dont l'ACN est inférieur ou égal à ce chiffre peut utiliser la chaussée sous réserve d'une restriction éventuelle en ce qui concerne la pression des pneus.

La méthode ACN – PCN prévoit également la communication des renseignements suivants :

- type de chaussée (F = souple, R = rigide)
- catégorie de résistance du terrain de fondation (A = élevée, B = moyenne, C = faible, D = très faible)
- pression admissible des pneus (W = élevée, X = moyenne, Y = faible, Z = très faible)
- méthode utilisée pour l'évaluation de la chaussée (T = évaluation technique, U = évaluation faite par l'expérience acquise sur les avions)

2.3.1 Cas des structures souples

Dans le cas des chaussées souples, le modèle de calcul sera basé sur les contraintes et déformations calculées avec les équations de Boussinesq pour un massif élastique, homogène et isotopique. Le CBR du sol de fondation sera l'élément de base pour la détermination des coefficients PCN.

2.3.2 Cas des structures rigides

Dans le cas des chaussées rigides, le modèle de calcul sera basé sur la théorie de Westergaard pour une fondation Winkler. Le coefficient k du sol de fondation sera l'élément de base pour la détermination des coefficients PCN.

