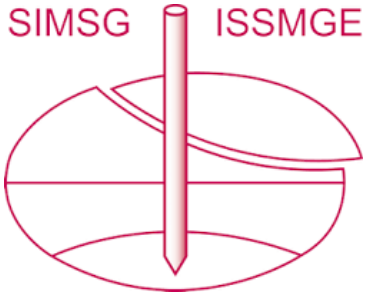
INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Déformabilité des chaussées continues

Deformation of Continuous Pavements

R. PELTIER, *Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Directeur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France*

PH. LEGER, *Ingénieur des Ponts et Chaussées, Chef de la Section "Mécanique des Chaussées," Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France*

SOMMAIRE

Cette communication résume l'état actuel en France des calculs rationnels de fondations de chaussées. Ces calculs supposent essentiellement que les matériaux de la chaussée sont, soit élastiques, soit viscoélastiques linéaires. Des vérifications expérimentales ont confirmé la validité de cette hypothèse; ou plutôt elles ont délimité ses domaines de validité. Les calculs effectués à ce jour ont permis de résoudre le problème de la chaussée multicouche statique et le problème dynamique du massif indéfini (charge roulante). On n'a pas encore totalement résolu le problème dynamique multicouche; cependant il semble qu'avec les vitesses actuelles des véhicules, il ne diffère pas sensiblement du problème statique.

SUMMARY

This paper gives a summary of the present methods for rational design of road foundations in France. Basically the methods assume an elastic or linear viscoelastic behaviour of the road materials. Some experimental tests have confirmed the validity of these assumptions; or rather, they have defined the boundaries of the hypothesis. At the present time the calculations have solved the problem of the static case of a multi-layer pavement and the dynamic problem in the case of an homogeneous pavement (mobile load). The dynamic problem in the case of a pavement with several layers is not entirely solved yet; however, it would appear that with existing vehicle speeds, this problem is not much different from that of the static case.

DÉFINITIONS ET DOMAINE DE VALIDITÉ

LA TECHNIQUE ROUTIÈRE distingue traditionnellement deux types de chaussées: les chaussées souples et les chaussées rigides. Pratiquement ces dernières sont les chaussées en béton de ciment. La présente étude se limitera au cas des chaussées souples et continues. Ce sont les seules dont l'étude semble pouvoir être abordée rationnellement dans l'état actuel de nos connaissances.

Généralement une chaussée souple est constituée par une ou plusieurs couches d'enrobés en surface, et plusieurs couches pierreuses ou sableuses en fondation dont la rigidité et la qualité décroissent avec la profondeur de la couche. Souvent la chaussée comporte de haut en bas (fig. 1): une

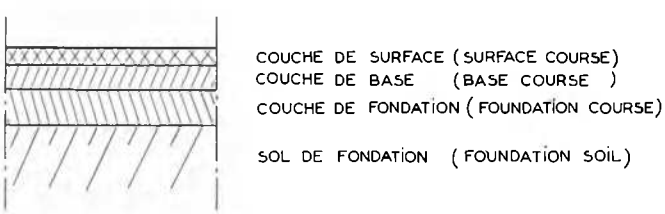


FIG. 1. Coupe schématique d'une chaussée type.

couche de surface (hydrocarbonée); une couche de base; une couche de fondation; le sol de fondation, qui peut être naturel ou amélioré. Ce schéma, qui est quadricouche, parce que le sol y est considéré comme une couche d'épaisseur infinie, est le plus fréquent.

Il peut arriver que la couche de base, et même la couche de fondation, soient traitées au ciment; c'est même là une technique qui se développe rapidement sur les routes à trafic lourd et les autoroutes, car permettant de réduire considérablement les déflexions, donc le travail des couches de surface. Si ces couches traitées au ciment comportent des joints ou des fissures de retrait hygrothermique, plus ou moins régulièrement disposés, la chaussée n'est plus du type continu. C'est le cas notamment des couches de base en béton maigre, ou en grave-ciment mal constituée, qui se fissurent nettement. C'est aussi le cas des chaussées constituées par une vieille chaussée en béton de ciment que l'on a surmontée d'une couche plus ou moins épaisse d'enrobés. La présente étude ne s'applique pas à ces chaussées discontinues.

Par contre, seront considérées comme continues les chaussées comportant une dalle en béton précontraint, ou une dalle en béton armé continue, à condition que les joints, s'il en existe, soient très espacés et traités spécialement pour éviter les effets de discontinuité. Bien entendu, cette définition de la continuité de la chaussée ne s'entend que dans le sens longitudinal. Dans le sens transversal, la chaussée est limitée par des bords; les effets des bords doivent être pris en compte dans un calcul rationnel des chaussées.

HYPOTHÈSE DU COMPORTEMENT ELASTIQUE DES CHAUSSÉES

L'hypothèse de base des calculs rationnels des chaussées est que leur comportement est élastique. Sinon tout calcul serait, sinon impossible, tout au moins très difficile, dans l'état actuel d'élaboration des théories générales des matériaux à comportement linéaire.

Par contre, les calculs peuvent être étendus au cas où le comportement des matériaux est viscoélastique, à condition qu'il s'agisse de viscoélasticité linéaire. Cette extension a été rendue possible par les récents progrès de la théorie de la viscoélasticité linéaire.

M. Mandel, Professeur à l'Ecole Polytechnique, a en effet démontré qu'en utilisant la transformation de Carson, on ramenait l'étude d'un problème de viscoélasticité linéaire à

un problème d'élasticité. La transformation de Carson est définie par la formule:

$$f^*(p) = p \cdot \int_0^\infty \exp^{-p \cdot t} \cdot f(t) \cdot dt.$$

$f^*(p)$ est l'image de la fonction: $f(t)$. En appliquant la transformation de Carson au comportement des matériaux viscoélastiques linéaires, on aboutit à la relation fondamentale suivante:

$$\sigma ij^* = \lambda^* \cdot \theta^* \cdot \delta ij + 2\mu^* \cdot \epsilon^* ij$$

où σij^* est l'image de la contrainte, $\epsilon^* ij$ l'image de la déformation, $\theta^* = \Sigma \epsilon^* ii$ et λ^* et μ^* les images de deux fonctions du temps, caractéristiques du matériau.

Cette relation n'est autre que la relation fondamentale de l'élasticité. Il en résulte qu'un problème de viscoélasticité linéaire se ramène au problème correspondant en élasticité, à condition de remplacer les contraintes et les déformations par leurs images. Une fois cette solution obtenue pour les images des contraintes et des déformations, il convient d'inverser la transformation dans la solution du problème élastique. C'est là un problème purement mathématique que l'on sait résoudre dans de nombreux cas d'une façon exacte, grâce à l'existence de tables de transformation de Laplace donnant la fonction originale, d'une image donnée. Sinon, on fait appel à une formule intégrale dite de Mellin Fourier qui réalise l'inversion. On notera que si un matériau élastique est caractérisé par deux constantes d'élasticité λ et μ (ou le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν) un matériau viscoélastique linéaire est caractérisé par deux fonctions de relaxation: $\lambda(t)$ et $\mu(t)$.

VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES DE L'HYPOTHÈSE DE BASE

Cette hypothèse de base conduit à un schéma de chaussée à calculer qui n'a de valeur que pour autant que cette hypothèse a pu être vérifiée expérimentalement. Plus exactement, ces vérifications expérimentales permettent de délimiter le domaine où ce schéma est valable, avec une approximation donnée.

Ces vérifications expérimentales ont été faites dans de nombreux pays; nous nous bornerons ici à exposer les résultats des travaux français. Ces vérifications expérimentales sont de plusieurs sortes:

1. Tout d'abord, il convenait de vérifier en laboratoire le comportement élastique ou viscoélastique linéaire des matériaux employés dans la confection des diverses couches de chaussées. Ces vérifications sur éprouvettes ont été faites au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. On a ensuite vérifié ce comportement dans un centre d'expérimentation routière installé à Rouen; il s'agit d'un organisme de recherche qui est intermédiaire entre le laboratoire proprement dit et la route (on a suivi là une tendance générale en matière de recherche industrielle, qui consiste, après l'invention faite en laboratoire sur éprouvettes, à procéder dans des centres appropriés à une mise au point sur des modèles prototypes plus ou moins réduits du procédé de fabrication qui sera ensuite utilisé en usine). Enfin des vérifications expérimentales sont faites sur chaussées réelles, soit expérimentales, soit courantes.

2. Le comportement boltzmannien (c'est-à-dire viscoélastique linéaire) des enrobés hydrocarbonés a pu être démontré en laboratoire sur des éprouvettes découpées dans des revêtements de chaussées réelles, soit par des méthodes de

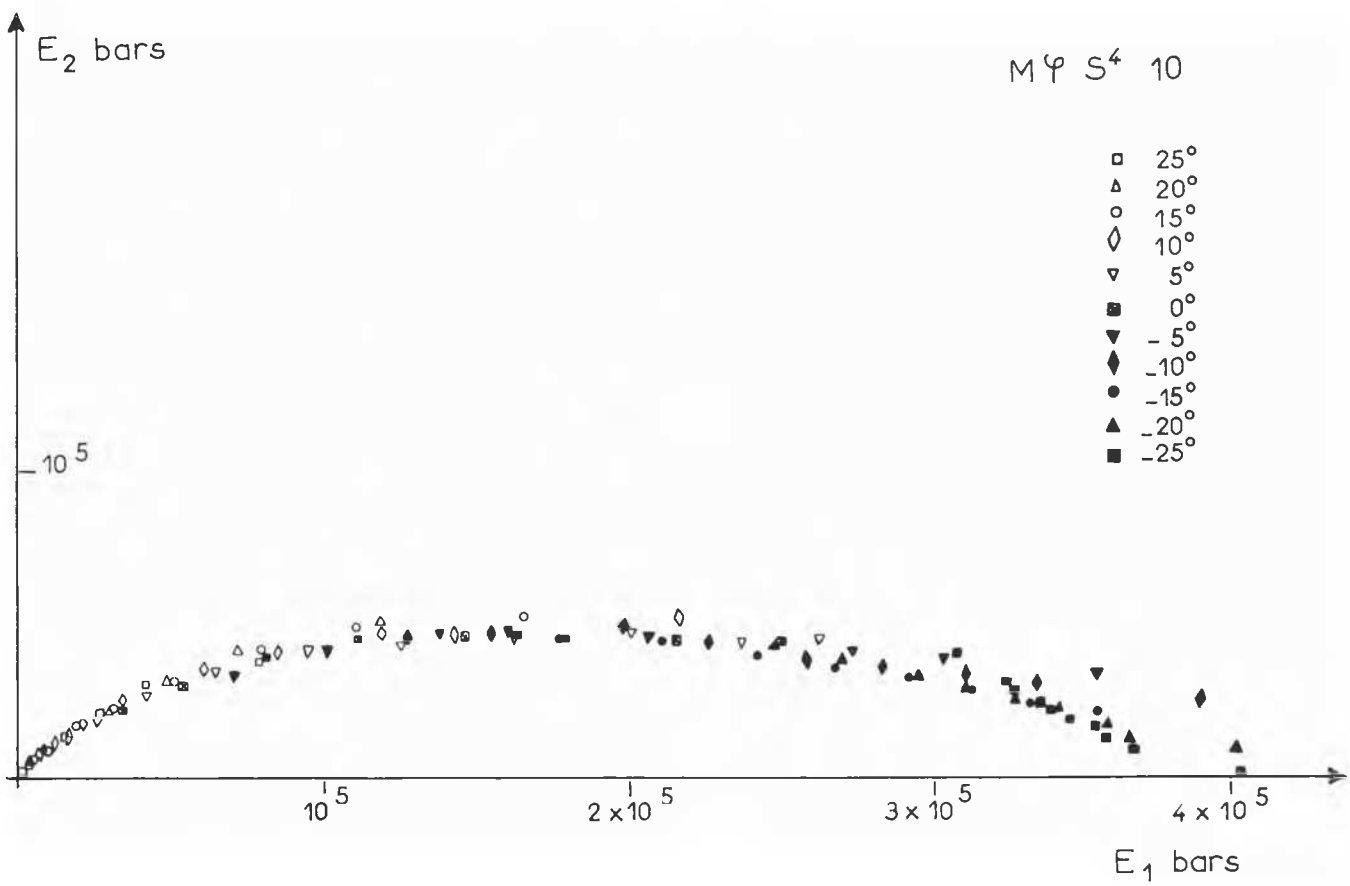


FIG. 2. Modèle d'Young complexe d'un béton bitumineux.

flexion et de torsion alternées s'apparentant à des vibrations, soit par des essais de fluage. Les premières concernent le comportement dynamique des chaussées, c'est-à-dire leur comportement sous l'action des véhicules en marche; les secondes concernent le comportement statique des chaussées, c'est-à-dire leur comportement sous l'action des véhicules arrêtés (en particulier parking, feux de croisements, etc.).

Les premières études ont déjà abouti à des résultats d'un grand intérêt qui ont été publiés dans la thèse de doctorat de M. Huet (1963). Il en résulte que pour des contraintes ou plutôt des déformations ne dépassant pas un certain seuil, le comportement des enrobés bitumineux est bien boltzmannien, et que le matériau pouvait être représenté par un modèle rhéologique comportant en série deux éléments à fluage parabolique. De plus, le module complexe qui représente aussi le comportement du matériau comporte une courbe unique, bien que l'on fasse varier à la fois la fréquence de vibration et la température (fig. 2). Les essais statiques sont moins avancés, mais semblent devoir aboutir à des résultats analogues en ce qui concerne le comportement boltzmannien, au fluage des enrobés bitumineux, tout au moins dans un domaine assez limité de déformations.

3. En ce qui concerne les autres couches de chaussée et le sol de fondation, l'expérience a montré que l'hypothèse d'élasticité linéaire admise pour le calcul n'est qu'une approximation et ne correspond qu'imparfaitement au fonctionnement réel. (On ne peut pas parler à vrai dire de module élastique des différents matériaux constitutifs de chaussée, mais de module de déformation en un point pour un tenseur de contrainte donné; à titre d'exemple, un essai à la plaque donnera pour module à un limon 600 kg/cm.ca. alors que des mesures de propagation d'ondes donneront des modules compris entre 2,000 et 3,000 kg/cm.ca.)

De telles expérimentations ont été faites tout d'abord en laboratoire, notamment dans des appareils triaxiaux spéciaux. Elles ont surtout été faites dans des fosses d'essais du Centre d'Expérimentation routière de Rouen. Ces fosses sont longues de 20 mètres, larges de 8 mètres et profondes de 2,50 mètres. Elles sont placées dans des hangars qui les protègent ainsi des variations climatiques extérieures; mais ces hangars sont équipés de telle sorte que l'on puisse y reproduire à volonté certaines variations climatiques: pluie, soleil, nappe phréatique. Les sols choisis qui sont placés dans ces fosses, après une homogénéisation et un mouillage approprié, y sont compactés avec les engins classiques des chantiers (c'est-à-dire avec toute la gamme existante des compacteurs). La densité des sols compactés est contrôlée, soit au densitomètre à membrane (grand ou petit modèle), soit à l'aide de sondes nucléaires. La rigidité des sols est mesurée à l'aide de plaques chargées, à l'aide d'un portique mobile perfectionné. En faisant varier la charge, le diamètre de la plaque et la nature de la plaque (rigide ou à pression constante) on peut alors apprécier le comportement du sol.

Une grande masse de résultats a pu être ainsi obtenue, parmi lesquels sont données seulement ici deux courbes caractéristiques. L'une (fig. 3) est relative à un limon. Après un bon compactage et un certain nombre de chargements, le module sécant varie assez peu avec la charge. On sait en fait que le module sécant à la plaque (contraintes et déformations importantes) est d'environ 3 à 4 fois inférieur au module obtenu par mesure de vitesse de propagation d'ondes (contraintes et déformations infinitésimales).

La fig. 4 est relative à une grave à forte teneur en gravillons roulés. On remarquera qu'après un fort compactage et un certain nombre de cycles de chargement, le comportement du sol est réversible. Il n'est toutefois pas élastique

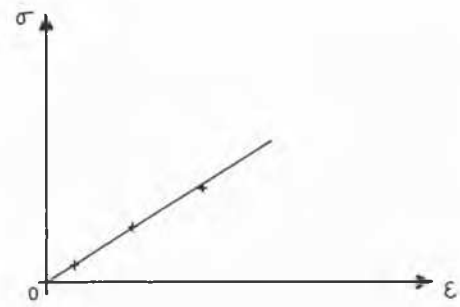


FIG. 3. Courbe contrainte déformation d'un limon.

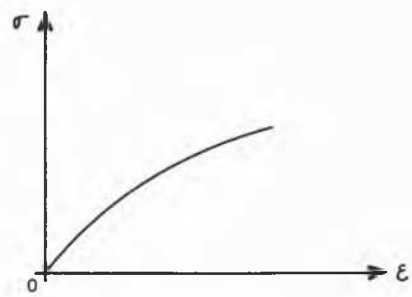


FIG. 4. Courbe contrainte déformation d'une grave.

au sens de la loi de Hooke, c'est-à-dire qu'il n'y a pas proportionnalité entre contraintes et déformations; cette loi non linéaire s'explique par la déformation au contact des gros grains arrondis du sol, car selon le problème de Hertz, la déformation devrait être proportionnelle à la contrainte élevée à la puissance deux tiers.

En fait, la courbe de cet exemple est assez exceptionnelle. Les courbes réelles sont généralement assez voisines de droites; tout au moins à partir d'une certaine pression de chargement.

4. Les observations faites sur chaussées ont confirmé, avec une bonne approximation, le comportement à peu près élastique des chaussées réelles (à condition de ne pas faire varier les charges dans un domaine trop important). Notamment les très nombreux essais par plaques diversement chargées ont vérifié ce fait.

Toutefois, il convient de remarquer que des chaussées très jeunes peuvent ne pas avoir un comportement élastique, si leur compactage initial a été insuffisant. Le calcul rationnel des chaussées ne pourra donc pas s'appliquer à de telles chaussées; et il est indispensable que pendant cette phase transitoire et généralement courte, la structure de la chaussée puisse s'adapter sans dommages à des déformations permanentes, qui peuvent, dans certains cas, être importantes. Ce n'est qu'après cette phase initiale d'adaptation que ces chaussées pourront alors faire l'objet d'un calcul.

Il faut noter que les sols de fondation ont un comportement qui n'est jamais entièrement réversible et qu'en outre ils sont susceptibles de rupture plastique. Mais c'est justement le rôle de la chaussée de faire en sorte que les contraintes exercées par les véhicules sur le sol de fondation à travers la chaussée soient suffisamment faibles pour que le comportement du sol soit suffisamment réversible, eu égard au nombre de charges que l'on veut faire circuler (ceci implique une notion de fatigue dont on reparlera au paragraphe suivant et qu'il ne se produise pas de ruptures plastiques qui provoqueraient la ruine de la chaussée à plus ou moins brève échéance). La déformation rémanente et

la limite de rupture plastique peuvent être mesurées scientifiquement en laboratoire, ou repérées techniquement à l'aide des essais empiriques classiques: C.B.R., stabilomètre, essais à la plaque.

A remarquer enfin que ce qui importe en fait à l'ingénieur ce n'est pas la déformation d'une chaussée au passage d'une seule charge, mais son comportement sous des charges répétées correspondant au trafic réel. Ceci fait intervenir des phénomènes de fatigue dans les sols de fondation (tassement, déformation), dans les couches de base et de fondation (attrition et production de fines plus ou moins plastiques) et dans les couches de surface (fissuration). Mais ces phénomènes de fatigue sont encore mal connus, d'autant plus qu'ils varient avec certains facteurs extérieurs: température, humidité, etc. Aussi dans l'état actuel de nos connaissances ne peut-on en tenir compte que d'une façon empirique, par exemple en comparant les résultats des calculs rationnels ci-après et les résultats des routes expérimentales, comme celles de l'A.A.S.H.O.

Il n'en sera pas question ici bien qu'il soit vraisemblable que l'étude de ces phénomènes doive apporter dans le futur des renseignements très fructueux pour le dimensionnement des chaussées.

SOLUTION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME STATIQUE

1) Nous avions fondé de grands espoirs sur une nouvelle méthode de calcul élastique des chaussées, dite méthode de Galerkin, qui semblait permettre de résoudre le problème mathématique des chaussées dans sa plus grande généralité: nombre quelconque de couches; matériaux des couches élastiques ou viscoélastiques linéaires; charges statiques ou dynamiques de forme quelconque (notamment les charges dynamiques soit des vibrations sinusoïdales sur place, soit des mouvements uniformes des charges à la surface de la chaussée); intervention des effets de bords, c'est-à-dire cas où la charge est placée sur le bord de la chaussée. Malheureusement, l'application pratique de cette méthode s'est heurtée à des difficultés, sinon insurmontables, tout au moins insurmontées à l'heure actuelle, malgré le secours des plus grands mathématiciens français. En attendant cette solution plus ou moins problématique, nous avons dû nous rabattre sur les solutions suivantes, partielles, mais complémentaires du problème.

2) Dans le cas statique, et sans qu'il y ait effet de bords (c'est-à-dire lorsque la charge est loin du bord), la S.E.M.A. (Société d'Economie et de Mathématiques Appliquées) a été chargée de l'élaboration d'un programme suivant la méthode de Burmister pour le multicouche à n couches adapté aux calculatrices existant actuellement en France. Malgré l'utilisation de nouveaux programmes de calcul des intégrales oscillantes, les valeurs des contraintes restent d'ailleurs assez imprécises au voisinage de la surface. Il peut être intéressant de signaler que le temps de calcul nécessaire pour obtenir l'ensemble des contraintes et des déplacements en un point est de l'ordre de 1 seconde.

Bien que peu de résultats aient encore été obtenus à ce jour, il semble que dans le domaine pratique qui intéresse les chaussées, on puisse en déduire l'importante règle pratique suivante: les pressions provoquées par les charges sur des plans horizontaux de la chaussée et du sol de fondation situés à diverses profondeurs sont approximativement les mêmes que celles qui se produiraient dans un massif homogène (problème de Boussinesq), à condition d'y remplacer les épaisseurs des diverses couches par des épaisseurs fictives proportionnelles à la racine cubique du module d'élasticité de la couche.

En d'autres termes, considérons la chaussée quadricouche de la fig. 1 chargée à sa surface par un poids P uniformément réparti dans un cercle de rayon R. La formule de Boussinesq permet de calculer la contrainte normale σ qui en résulte, sur un élément plan, placé à la profondeur z et à la distance r de l'axe vertical de symétrie de l'ensemble, soit:

$$\sigma = P/\pi R^2 \cdot f(r/R \cdot z/R).$$

Dans le cas d'une chaussée à trois couches, la pression sur le sol de fondation à la distance r de l'axe est alors donnée par la formule précédente dans laquelle on a donné a z la valeur suivante:

$$z = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_0}} + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_0}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_0}}.$$

Cette formule n'est qu'approximative, mais vu l'incertitude qui règne en général sur la valeur exacte des modules E_i elle suffit pour les applications pratiques.

On peut aussi en déduire les déflexions en surface; en effet cette valeur de la pression sur le sol de fondation permet de calculer par la formule de Boussinesq la déflexion au niveau du sol de fondation. Il suffit d'y ajouter les diminutions d'épaisseur des diverses couches, calculées d'après la valeur des contraintes sur les éléments horizontaux, pour obtenir la valeur de la déflexion en surface.

3) La solution ci-dessus ne permet pas de résoudre les problèmes "aux bords" qui ont cependant dans de nombreux cas une importance prépondérante, car c'est lorsque la charge est située sur les bords de la chaussée, ou tout au moins de sa couche de surface, que les contraintes sont maximales, aussi bien dans les couches de chaussée que sur le sol de fondation.

Une nouvelle solution du problème est en cours d'élaboration utilisant une méthode aux différences finies, dite méthode "des directions alternées." L'avantage de cette méthode est qu'elle se prête aisément aux calculs par ordinateurs électroniques.

SOLUTION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME DYNAMIQUE

La question doit être ici séparée en deux problèmes nettement différents: (*a*) *Problème direct*: détermination des contraintes et déformations sous une charge donnée dans un milieu élastique supposé connu; (*b*) *Problème d'inversion*: détermination des caractéristiques d'une structure en fonction des réponses à diverses sollicitations dynamiques simples.

En ce qui concerne le problème (*a*), il convient de signaler que le problème de Boussinesq dynamique, c'est-à-dire celui d'un massif homogène et semi-infini, chargé sur sa surface plane par une charge P se déplaçant à une vitesse constante V, a été résolu par Mandel et Avramesco (1963). Cette solution est tout d'abord donnée pour la charge concentrée, puis en annexe est indiquée la solution dans le cas d'une charge répartie uniformément dans un cercle.

Dans le cas d'une charge concentrée, la déflexion d'un point W de la surface, placé à la distance r du point d'application de la charge P, dans une direction PM faisant l'angle α avec celle de la vitesse V est donnée par la formule:

$$W = \frac{P}{2\pi\mu r} \cdot \frac{X^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{X^2}{V_1^2}}}{V_2^2 \cdot f(X^2)}$$

dans laquelle V_1 et V_2 sont les vitesses des ondes planes de compression et de cisaillement du matériau constituant le massif homogène.

$$V_1 = \sqrt{[(\lambda + 2\mu)/d)]}; \quad V_2 = \sqrt{(\mu/d)};$$

λ et μ sont les coefficients d'élasticité de Lamé, d la masse spécifique du matériau.

$$X = V, \sin\alpha$$

et

$$f(X^2) = 4\sqrt{1 - \frac{X^2}{V_1^2}} - \sqrt{1 - \frac{X^2}{V_2^2}} - \left(2 - \frac{X^2}{V_2^2}\right)^2.$$

On reconnait dans cette fonction f l'expression dont l'annulation donne la vitesse des ondes de Rayleigh.

Lorsque la vitesse V est faible, la déflexion diffère peu de la déflexion statique. On peut d'ailleurs développer en série la formule ci-dessus. On obtient ainsi:

$$w = \frac{P}{4\pi\mu r} \cdot \frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu}\left[1 + \frac{X^2}{V_2^2}\left(1 - 3x + \frac{2}{1 - x}\right) + \ \ldots\right]$$

avec

$$x = \mu/(\lambda + 2\mu) = (V_2/V_1)^2.$$

Comme il n'a jamais été mesuré sur des matériaux de chaussée en place des vitesses des ondes de cisaillement inférieures à 400 km/h (110 m/sec) on voit qu'en pratique et pour les poids lourds notamment, le terme correctif dû à la vitesse est négligeable.

Par contre, si la vitesse V atteignait et dépassait celle de l'onde de Rayleigh, la déflexion w deviendrait théoriquement infinie sur certaines lignes; en d'autres termes, il se produirait des ondes de choc. M. Habib a pu vérifier expérimentalement l'existence et la forme de ces ondes de choc.

La solution ci-dessus n'est valable que dans le cas d'un massif homogène. Il convenait d'examiner aussi le comportement des systèmes multicouches. Une première étude a été faite à ce sujet par M. Davin, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, en admettant pour un revêtement le schéma de Westergaard; c'est-à-dire en assimilant la chaussée à une plaque mince de grande rigidité et de masse appréciable, posée sur des ressorts. Mais ce schéma de Westergaard dynamique s'est montré incapable de représenter correctement la réalité.

En particulier la courbe de dispersion des ondes propres est très différente de la courbe obtenue théoriquement et confirmée expérimentalement pour les bicouches élastiques. Le schéma de Westergaard dynamique doit donc être rejeté. Il en est de même du schéma de Hogg dynamique (chaussée assimilée à une plaque mince, rigide et pesante, posée sur un massif élastique indéfini au sens de Boussinesq).

Une nouvelle étude est alors en cours d'élaboration sur le schéma de Burmister dynamique à deux couches. Plus exactement, la chaussée est assimilée à une couche élastique et pesante, d'une certaine épaisseur, posée et collée sur un massif indéfini pesant et élastique au sens de Boussinesq. Une charge P concentrée se déplace à vitesse constante à la surface de la chaussée.

M. Avramesco, Ingénieur au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, pense avoir mis en forme ce problème et pouvoir le résoudre sous forme de développements en série. Il semblerait qu'avec les vitesses pratiques des poids lourds sur les chaussées et les caractéristiques usuelles de celles-ci et de leurs sols de fondation, les termes dus aux effets dynamiques dans ce développement soient petits devant le terme dû aux effets statiques, ce qui conduirait à conclure que le calcul pourrait être ramené, tout au moins en première approximation, à celui relativement simple, exposé au § 2° ci dessus.

En ce qui concerne le problème (b), sa résolution dans le cas d'une charge sinusoïdale est déjà fortement avancée (dispersion des ondes propres), et peut servir dès maintenant à des auscultations non destructives de chaussées; le problème de l'impulsion est également résolu dans le cas du massif semi-indéfini homogène.

Reste le cas où le schéma de la chaussée comporte une ou plusieurs couches viscoélastiques. Le comportement de ces couches dépend alors de la vitesse V du véhicule, de la température par l'intermédiaire du temps de relaxation τ, et en première approximation seulement du produit $V\tau$ et des caractéristiques du matériau. Ce sont les lois de ce comportement et les approximations qu'il est licite de faire que les Ingénieurs du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées s'efforcent de dégager à l'heure actuelle, d'abord dans le cas d'un massif indéfini, puis d'un schéma de Burmister dynamique bicouche.

RÉFÉRENCES

HUET, CH. (1963). Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Thèse de Doctorat.

MANDEL, J. et A. AVRAMESCO (1963). Déplacements produits sur un semi-espace élastique par une charge en mouvement rectiligne uniforme. *Annales des Ponts et Chaussées*, mars–avril, p. 147.

MANDEL, J. et PERSOZ (1960). *Introduction à la rhéologie*. Editeur Dunod.