

De la presse « Texas » à la presse à cisaillement giratoire PCG 3 des LPC

Jean-François CORTÉ

Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées
Directeur technique chargé du pôle Chaussées
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

La presse à cisaillement giratoire s'est imposée en France, depuis plus de vingt ans maintenant, comme l'essai de base pour l'étude de formulation des matériaux bitumineux.

Cet article présente l'évolution du matériel d'essai depuis le premier prototype inspiré de la presse du Texas Highway Department jusqu'à la presse à cisaillement giratoire PCG 3, dernier matériel mlpc en date conçu en 1996. Il est rappelé comment, grâce aux recherches menées par les laboratoires des Ponts et Chaussées, l'emploi de la presse à cisaillement giratoire est passé d'un simple mode de compactage d'éprouvettes en laboratoire à un appareil permettant de préciser, selon l'usage, la composition des matériaux bitumineux.

MOTS CLÉS : 31-52 - Compacteur giratoire - Composition du mélange - Enrobé - Matériel - Essai - Évolution - Compactage - Éprouvette - France.

La presse à cisaillement giratoire (PCG), dont le principe fut imaginé il y a une cinquantaine d'années au Texas, s'est imposée en France depuis plus de vingt ans maintenant, comme l'essai de base pour l'étude de formulation des matériaux bitumineux, grâce aux recherches faites par les laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) et aux matériels construits par le Centre d'étude et de construction de prototypes (CECP) d'Angers. Par un retournement de l'histoire, cet essai gagne maintenant la faveur des États-Unis suite au programme de recherche SHRP, l'essai à la presse à cisaillement giratoire étant au centre de l'étude de définition de la composition volumétrique des mélanges bitumineux dans l'approche Superpave [1] en substitution de la méthode Marshall.

Cet article présente l'évolution qui s'est produite en France depuis l'invention de la presse du Texas Highway Department jusqu'à la presse à cisaillement giratoire PCG 3 des LPC, dernier matériel mlpc en date qui tire parti de l'expérience acquise et des derniers développements technologiques. Il rappelle à cette occasion quelles furent les principales étapes de la recherche sur la compacité des enrobés et les changements de technologie qui marquèrent les versions successives des presses.

La presse du Texas Highway Department

Dans les années 1940, L. Ortolani et H.A. Sandberg du Texas Highway Department menèrent une étude systématique des divers procédés de compactage en laboratoire et de leur relation avec le compactage sur chantier. Cette étude les amena à la conception d'une machine originale de compactage par cisaillement giratoire sous faible pression. Les résultats de ces travaux furent publiés en 1952 dans les comptes rendus de l'Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT) [2].

La machine construite était une presse manuelle (fig. 1). Pendant l'essai, l'axe du moule décrivait un cône ayant un demi-angle au sommet de 7 degrés. La

pression verticale, obtenue par une presse hydraulique, était de 1 MPa pendant la rotation, puis de 11 MPa après redressement de l'axe de l'éprouvette.

Les conclusions d'Ortolani et Sandberg étaient que, de cette manière, il était possible d'obtenir une compacité élevée avec une faible évolution de la granularité, sous une faible pression, par le réarrangement des granulats dû au cisaillement imposé à l'éprouvette.

Si le procédé suscita alors de l'intérêt dans plusieurs pays, c'est la méthode Marshall, inventée aussi pendant la guerre par Bruce Marshall pour définir la formule des enrobés pour la construction des pistes aéronautiques, qui s'imposera aux États-Unis, puis largement dans le monde.

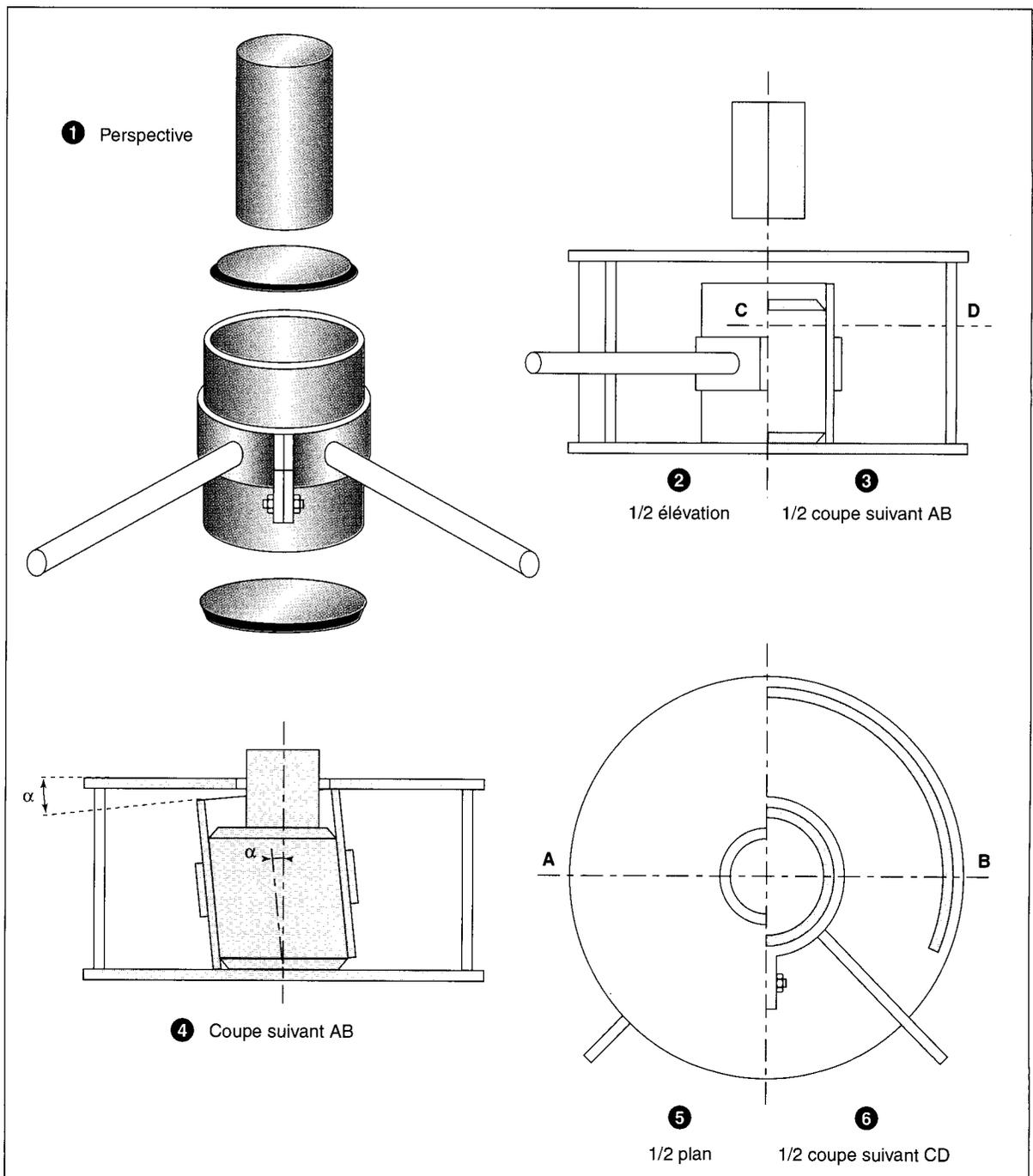


Fig. 1 -
La presse
manuelle
du Texas
Highway
Department.

Fig. 2 - Première version mécanisée de presse à cisaillement giratoire réalisée par les laboratoires des Ponts et Chaussées [4].

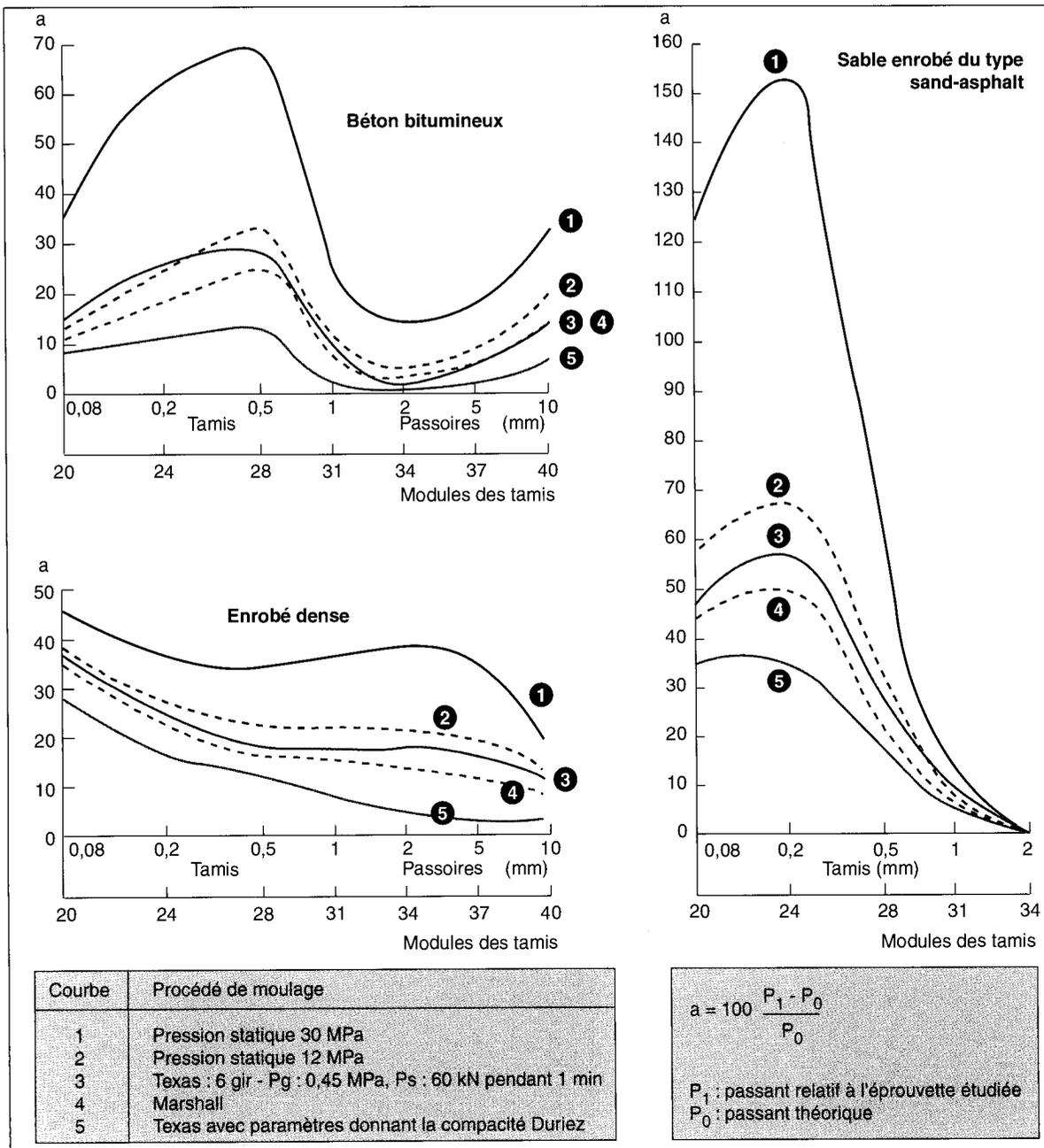
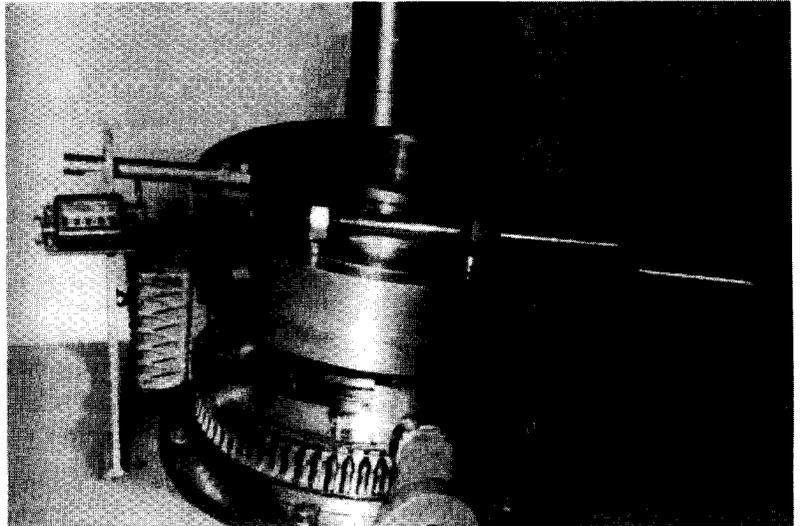
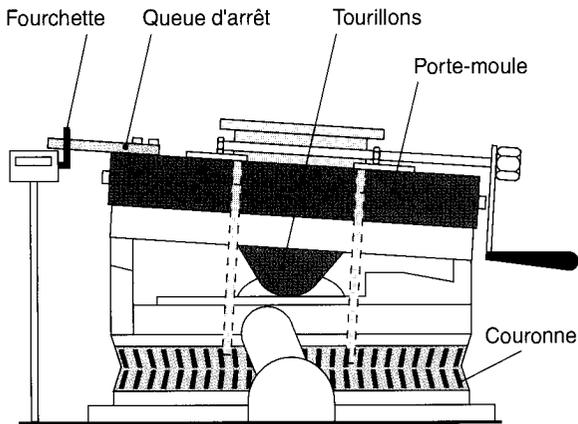


Fig. 3 - Influence du mode de compactage des éprouvettes sur l'évolution de leur granulométrie [4].

Le prototype de presse « Texas » construit en France

Ainsi que l'indiquait R. Sauterey en 1964 [3], l'intérêt pour le principe de la presse « Texas » s'exprima en France à la fin des années 1950, dans le but de disposer d'un système de compactage des éprouvettes plus réaliste que le compactage par chocs de l'essai Marshall ou que le compactage statique sous 12 MPa de l'essai Duriez. Ceci amena le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) avec le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Angers à concevoir une première version mécanisée de cet appareil construit en deux exemplaires.

Avec cette première version de la presse à cisaillement giratoire (fig. 2), l'essai était effectué sur

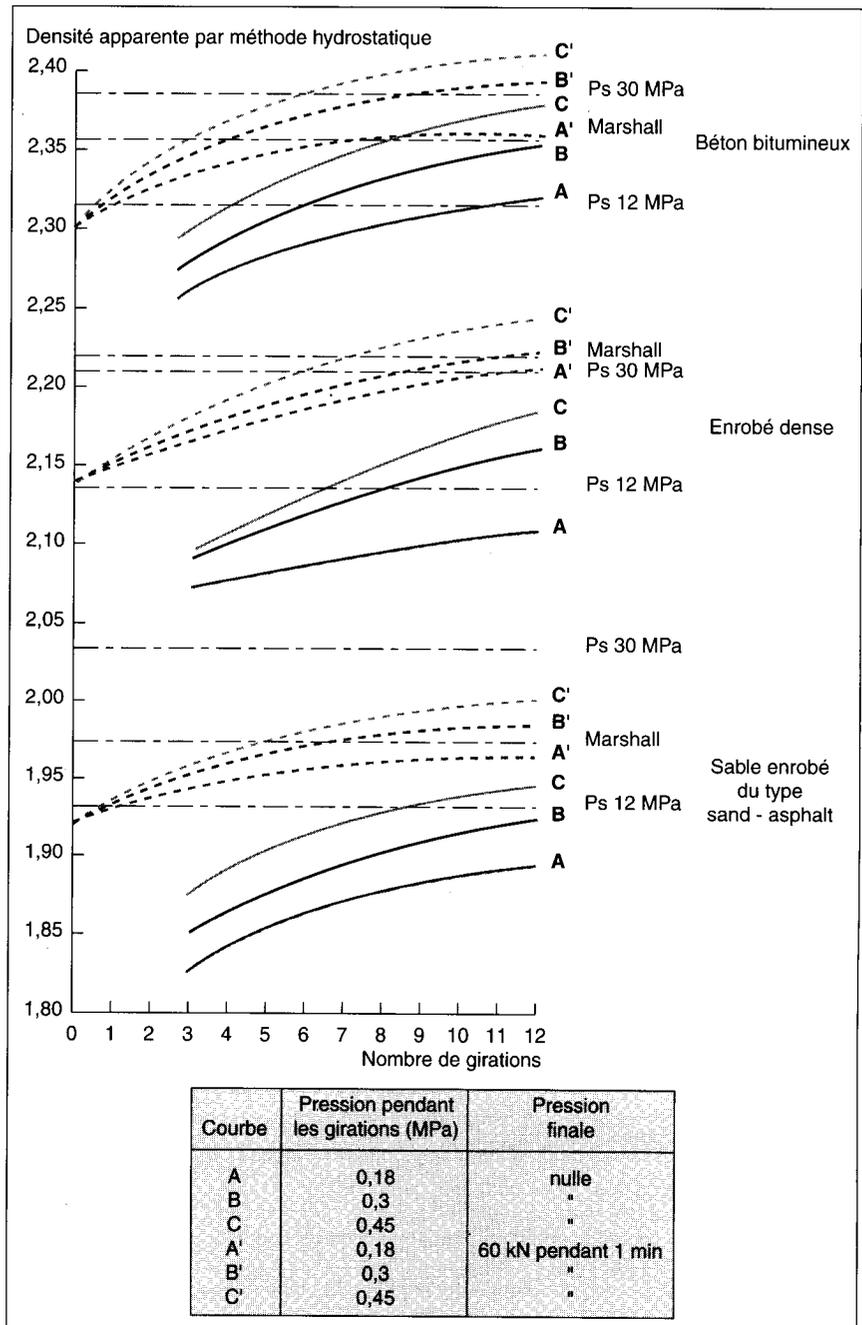
des éprouvettes de 80 mm de diamètre, de 80 à 105 mm de hauteur, le demi-angle du cône pouvant être fixé à 3,5 ou 7 ou 10 degrés.

L'objectif principal poursuivi alors était la réalisation d'éprouvettes dans des conditions réalistes de compactage pour en déterminer ensuite la « stabilité » par les essais mécaniques classiques d'écrasement en compression simple.

Les études faites à l'époque [4] et [5] ont montré que :

- les modifications granulométriques étaient effectivement beaucoup plus faibles (fig. 3),
- les compacités correspondant aux autres modes de compactage peuvent être obtenues par cisaillement sous faible pression (fig. 4),

Fig. 4 - Influence du procédé de compactage sur la densité apparente du matériau compacté [4].



- pour une même densité apparente, la stabilité dépend du mode de compactage (fig. 5),
- l'homogénéité de la densité est au moins aussi bonne qu'avec les autres modes de compactage.

Parallèlement aux LPC, un peu plus tard, les ingénieurs du centre de recherche de Shell se sont aussi intéressés à la presse à cisaillement giratoire à partir d'un modèle conçu par le Corps of Engineers (études faites par J.L. Mc Rae et C.R. Foster publiées en 1958 à l'AAPT [6] et [7]).

Cet appareil permettait deux modes de fonctionnement (fig. 6) :

- l'un à angle fixe (en fait rotation possible autour de l'axe R_1R_2) assimilé aux conditions de sollicitation pendant le compactage,
- l'autre à effort de pétrissage fixe, mais cette fois à angle variable, associé dans ce cas à l'effet de post-compactage par le trafic.

Le prototype de presse à cisaillement giratoire des LPC

L'invention des graves-bitume, mises en place en couche épaisse, donna un regain d'intérêt à la prévision en laboratoire de la compactibilité des matériaux bitumineux. Partant de l'expérience acquise avec la presse Texas, un nouveau prototype fut construit par le CECP d'Angers à la fin des années 1960.

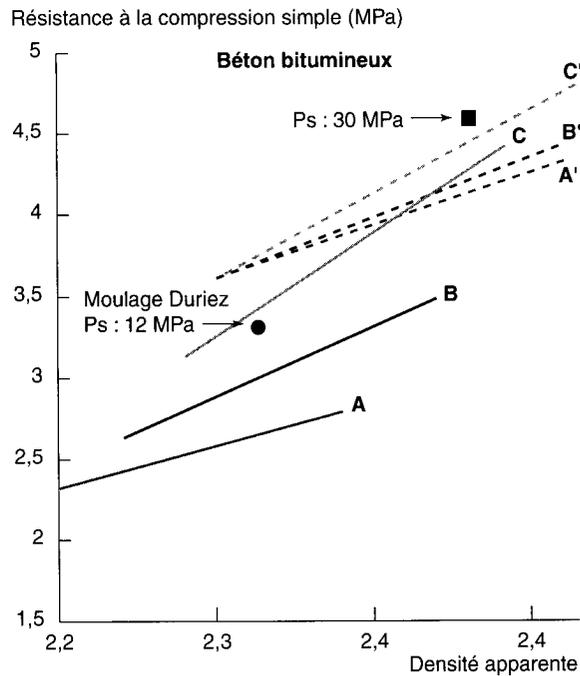


Fig. 5 - Variation de la stabilité en fonction du mode de compactage [4].

Courbe	Pression pendant les girations (MPa)	Pression finale
A	0,18	nulle
B	0,3	"
C	0,45	"
A'	0,18	60 kN pendant 1 min
B'	0,3	"
C'	0,45	"

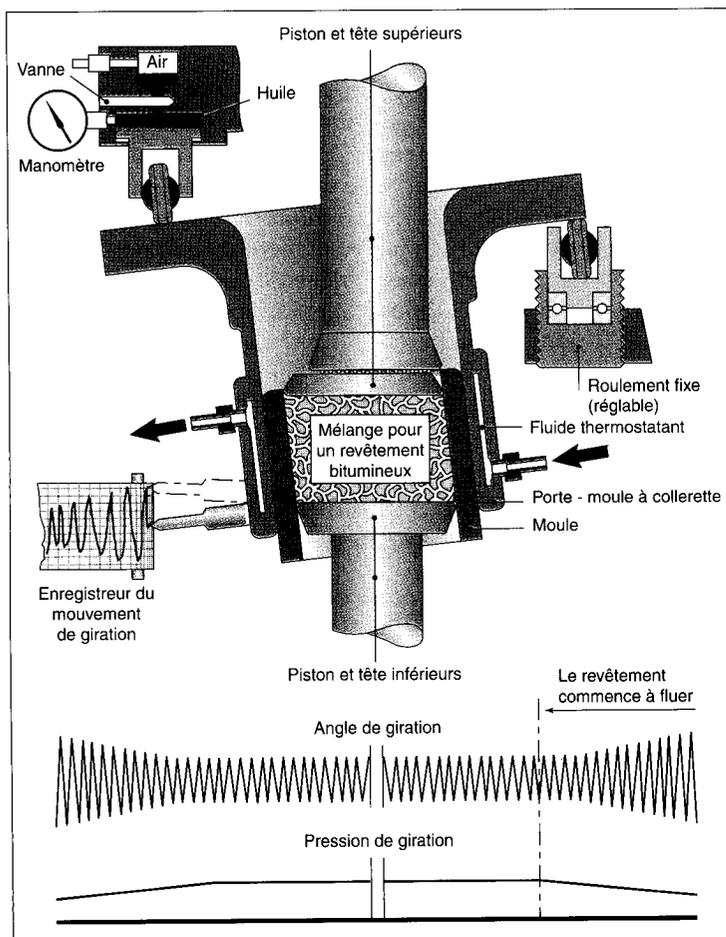


Fig. 6 - Schéma de la presse à cisaillement giratoire du Corps of Engineers (Etats-Unis) [3].

Fig. 7 - Schéma du prototype de presse à cisaillement giratoire réalisé par les LPC [8].

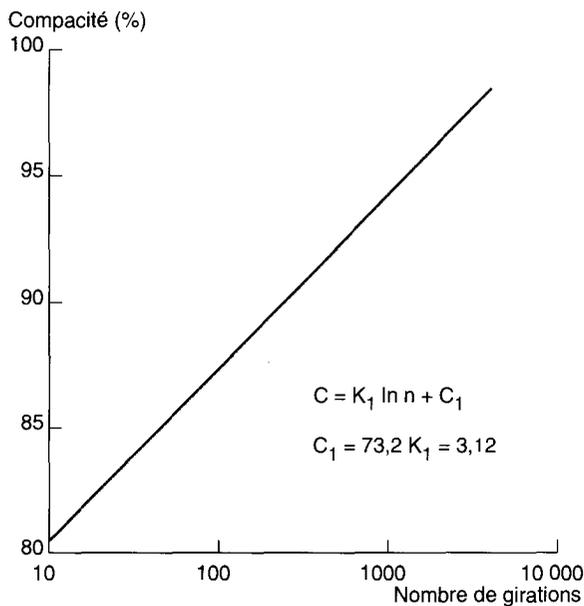
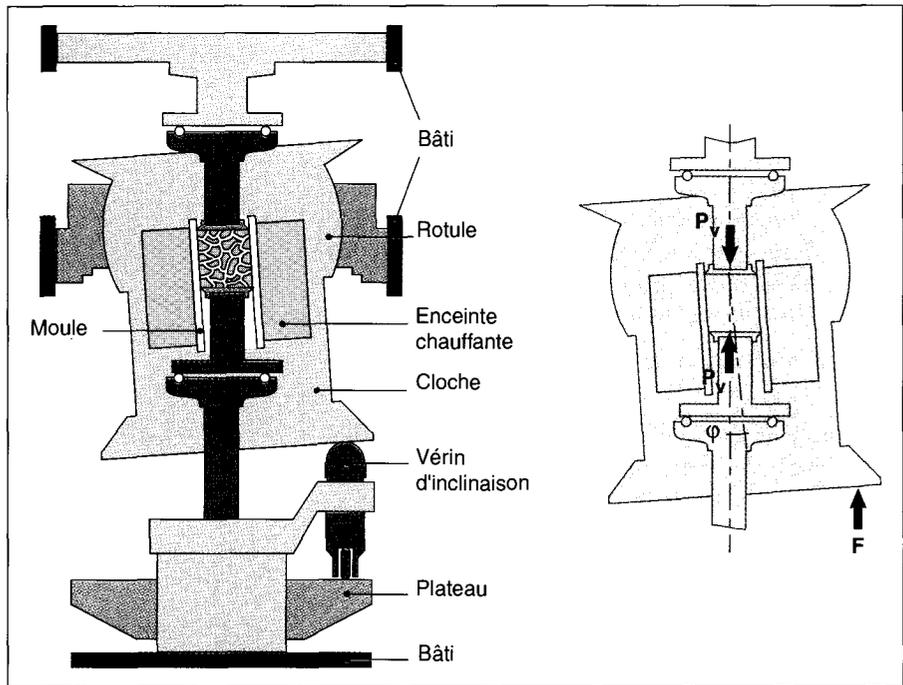


Fig. 8 - Relation entre l'évolution de la compacité et le nombre de girations à l'essai à la presse à cisaillement giratoire [8].

La figure 7 montre le schéma du prototype de PCG des LPC qui se différencie nettement des appareils précédents. Comme la presse du Corps of Engineers, celle-ci peut fonctionner à angle affiché constant ou à pression d'inclinaison constante.

Les recherches menées alors par F. Moutier [8] portèrent cette fois sur les possibilités de discrimination entre les comportements des différentes formules d'enrobés bitumineux. C'est de cette époque que date la mise en évidence de la relation quasi linéaire entre l'évolution de la compacité et le logarithme du nombre de girations pour représenter la courbe de maniabilité de l'enrobé :

$$C = K_1 \lg N + C_1 \quad (1)$$

avec l'identification des deux paramètres caractéristiques K_1 et C_1 (fig. 8).

- C_1 se rattache à la mise en place du mélange bitumineux. Plus cette valeur est grande, plus la compacité après deux ou trois passes du compacteur sera élevée.
- K_1 représente l'évolution possible pendant la phase de compactage. Plus K_1 est faible, plus le matériau sera difficile à compacter.

L'étude de l'influence des paramètres d'essai a conduit à reconsidérer l'angle de giration pour ramener celui-ci de 7 degrés aux environs de 1 à 2 degrés afin de pouvoir mieux discriminer entre le comportement des différentes formulations. Les études faites à cette époque montrèrent ainsi, par exemple, que l'essai interprété selon la courbe de maniabilité indiquée précédemment permettait de mettre en évidence l'influence de discontinuités granulométriques et de l'angularité du granulat (fig. 9). De la recherche d'un mode de compactage d'éprouvettes d'essais, la PCG devenait un moyen d'étude de la formulation des enrobés bitumineux.

La presse à cisaillement giratoire LPC de première génération

La reconnaissance de l'intérêt de cet outil allait conduire les LPC à concevoir en 1973 un nouveau matériel, destiné à être construit cette fois en série pour équiper les LRPC.

Ce modèle de série différait du prototype par le mode d'application de l'angle de distorsion de l'éprouvette (fig. 10) et comportait un cycle d'opérations entièrement automatisé. La conception retenue pour le modèle de série permettait d'assurer une meilleure constance de l'angle d'inclinaison pendant l'essai.

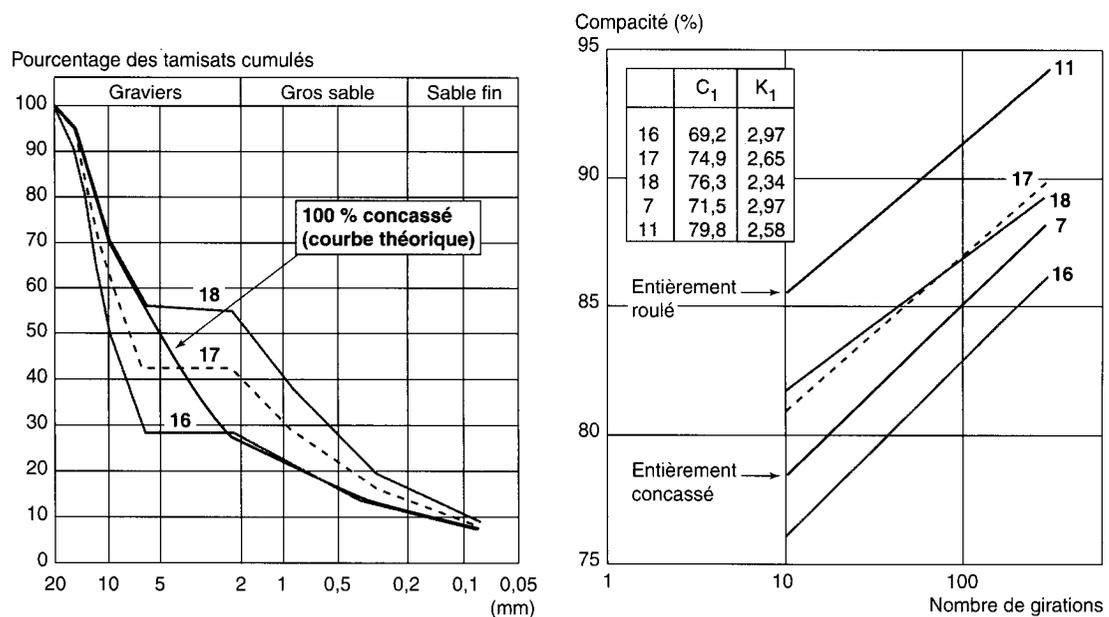


Fig. 9 - Influence des discontinuités granulométriques sur les courbes de compactage d'une grave-bitume [8].

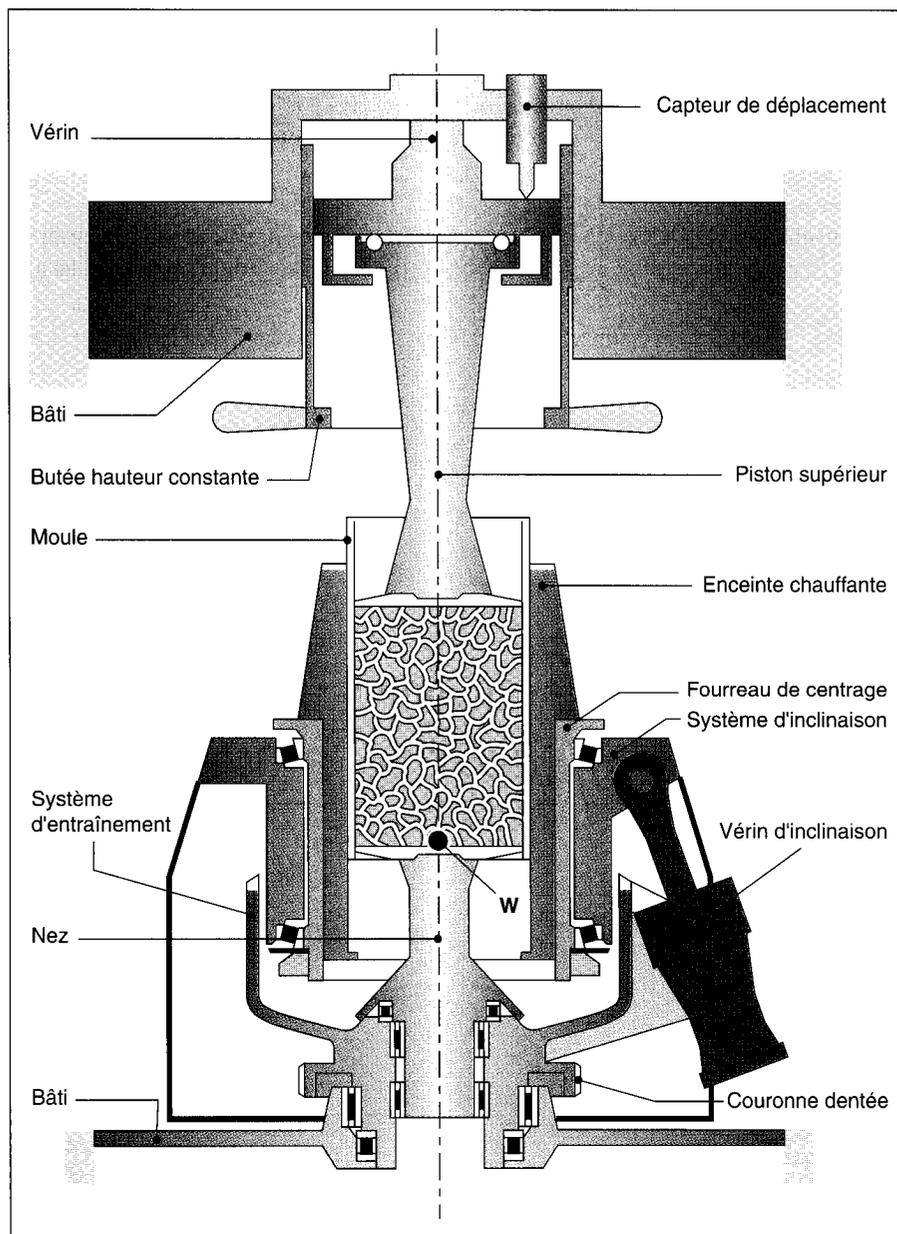


Fig. 10 - Schéma du modèle de série de la presse à cisaillement giratoire LPC de première génération [9].

Deux modes de fonctionnement restaient possibles :

- à angle fixe, celui-ci pouvant être choisi de 0 à 4 °C,
 - à pression d'inclinaison constante ($p_{\max} = 6,3 \text{ MPa}$),
- avec une vitesse de rotation de 6 ou 12 tr/min et une température de l'éprouvette régulée jusqu'à 250 °C.

L'idée de mesurer l'effort de réaction sur le vérin d'application de l'inclinaison de l'éprouvette (fig. 11), interprétée en terme de pseudo-résistance au cisaillement [10], a fourni de nouvelles informations sur le comportement de l'enrobé pendant le compactage, l'existence d'un maximum paraissant marquer une certaine limite de stabilité pour les très fortes compacités.

Recherches dans les années 1980 et PCG de seconde génération

Dans les années 1980, en raison de l'expérience acquise par la généralisation des études de formulation avec la PCG, les recherches se sont portées sur la relation pouvant exister entre la compacité obtenue sur chantier avec des compacteurs à pneus lourds et celle obtenue en laboratoire avec la PCG. Compte tenu des difficultés qu'il y a pour multi-

plier dans de bonnes conditions les expérimentations sur chantier, il fut construit un banc de compactage (fig. 13). Cette installation, comportant un essieu mobile à deux roues équipées de pneus gonflés de 0,3 à 0,9 MPa et chargées jusqu'à 50 kN/roue, permettait le compactage dans des conditions analogues à celles du chantier de couches d'enrobés de 4 m par 2 m en épaisseur variant de 4 à 12 centimètres.

Les études faites avec ce banc [11] permirent de montrer :

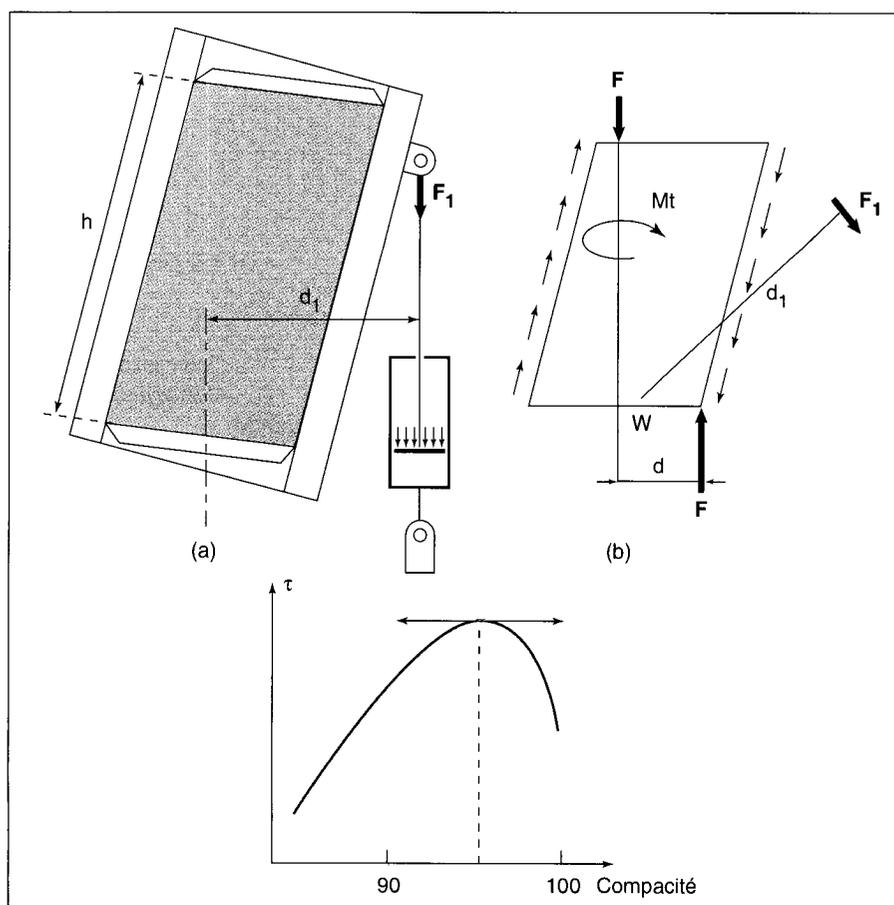
- le parallélisme de l'évolution des compacités de l'enrobé bitumineux lors du compactage et pendant l'essai à la presse à cisaillement giratoire (fig. 12),
- l'influence de l'épaisseur de la couche mise en œuvre sur l'évolution de la compacité.

Les résultats obtenus sur des enrobés en 4 et 8 cm indiquaient l'existence d'un facteur de proportionnalité entre le nombre de passes de compacteur et le nombre de girations de la PCG. Pour seize passes de compacteur, la compacité atteinte était égale à celle obtenue à la PCG pour un nombre de girations égal à 10.e, e étant l'épaisseur de la couche exprimée en centimètres :

$$C_{\text{chantier}} = C_{\text{PCG}} (10.e) \quad (2)$$

Les études faites ultérieurement ont permis de généraliser le résultat précédent, par la relation

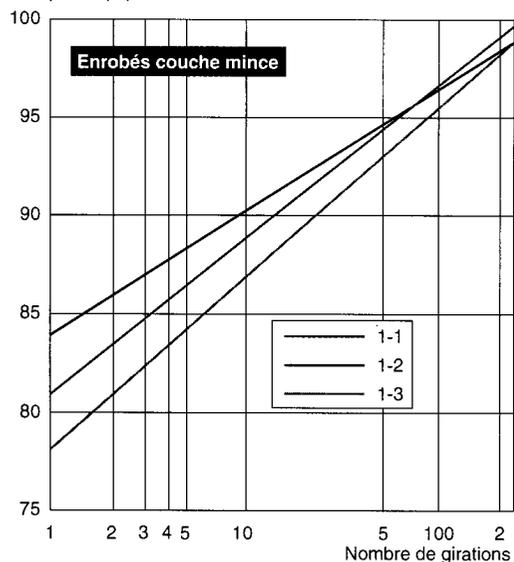
Fig. 11 - Mesure de l'effort de réaction au cours d'essai et interprétation en termes de pseudo-résistance au cisaillement [9].



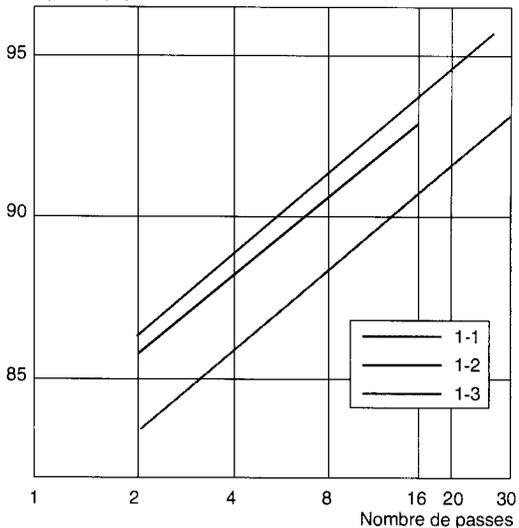
Presse à cisaillement giratoire

Banc de compactage

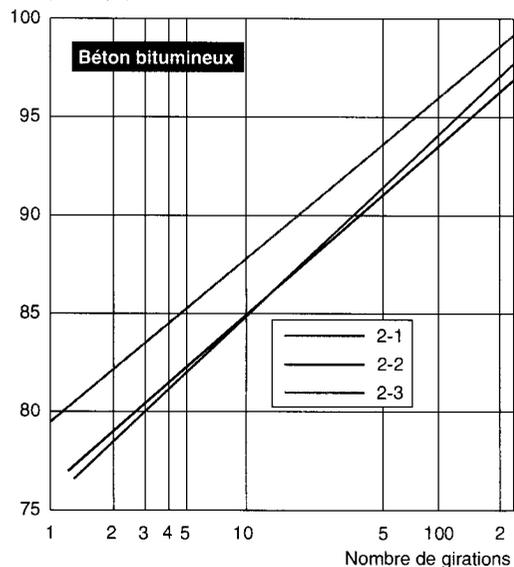
Compacité (%)



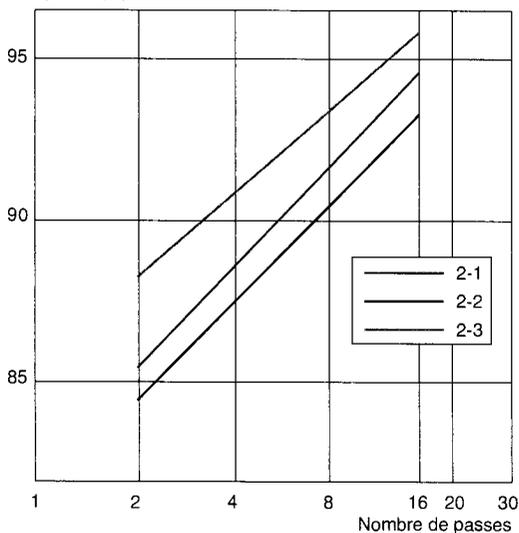
Compacité (%)



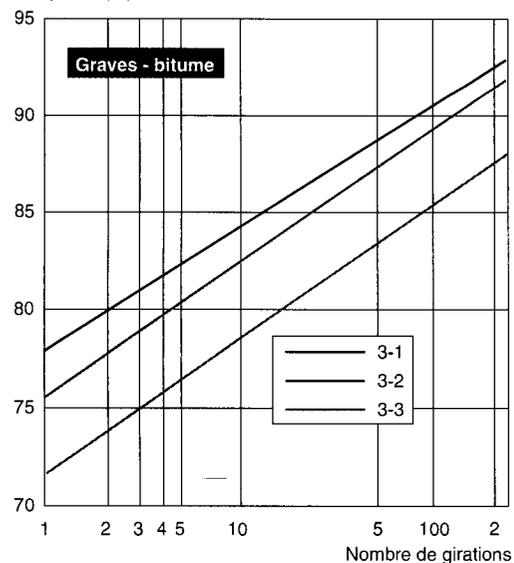
Compacité (%)



Compacité (%)



Compacité (%)



Compacité (%)

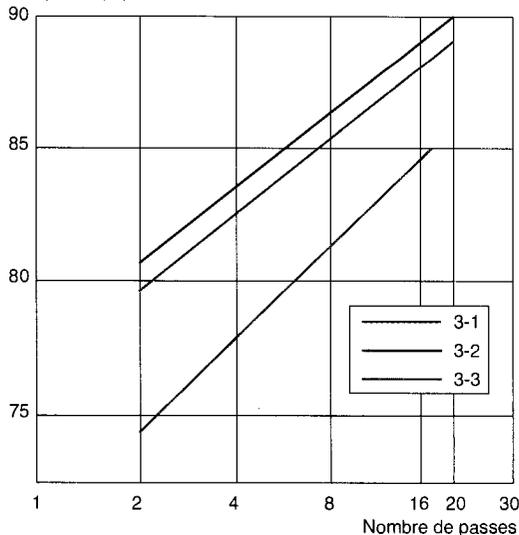


Fig. 12 - Comparaison entre résultats à la presse à cisaillement giratoire et au banc de compactage.

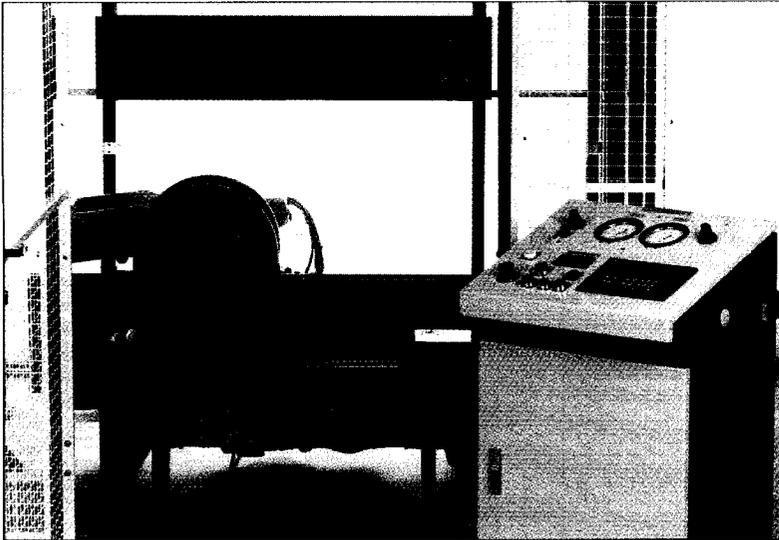


Fig. 13 - Le banc de compactage.

suivante entre nombre de passes de compacteur, n_p , et nombre de girations à la PCG, n_g , pour une même compacité :

$$n_g = \kappa e n_p \quad (3)$$

κ coefficient dépendant du type de compacteur (0,625 pour un compacteur à pneus gonflés à 0,6 MPa appliquant une charge de 30 kN/roue, κ pouvant atteindre 2,5 avec certains compacteurs vibrants). L'usage de ce genre de relations a été précisé par Moutier dans [12].

Une seconde génération de presses à cisaillement giratoire (fig. 14) sera construite à partir de 1985. Il s'agissait essentiellement de rendre le matériel d'essai plus compact, le châssis et la tête mécanique restant les mêmes.

Ainsi, entre 1974 (date de la diffusion des premiers matériels de série) et 1996, ce sont plus de soixante exemplaires de PCG qui seront construits dont une dizaine diffusés à l'étranger.

Un modèle particulier, embarqué sur un véhicule, fut également construit pour le LCPC (fig. 15) afin de pouvoir faire des essais et expertises sur chantier avec le matériau livré par la centrale d'enrobage.

Les années 1990 et la conception de la PCG 3

Un premier mode opératoire d'essai à la presse à cisaillement giratoire avait été publié dès 1978, puis actualisé en 1981 ; c'est en 1993, que sera publiée par l'AFNOR une norme d'essai homologuée (NF P 98-252). Les paramètres d'essai sont fixés à 1 degré pour le demi-angle au sommet et à 0,6 MPa pour la pression statique.

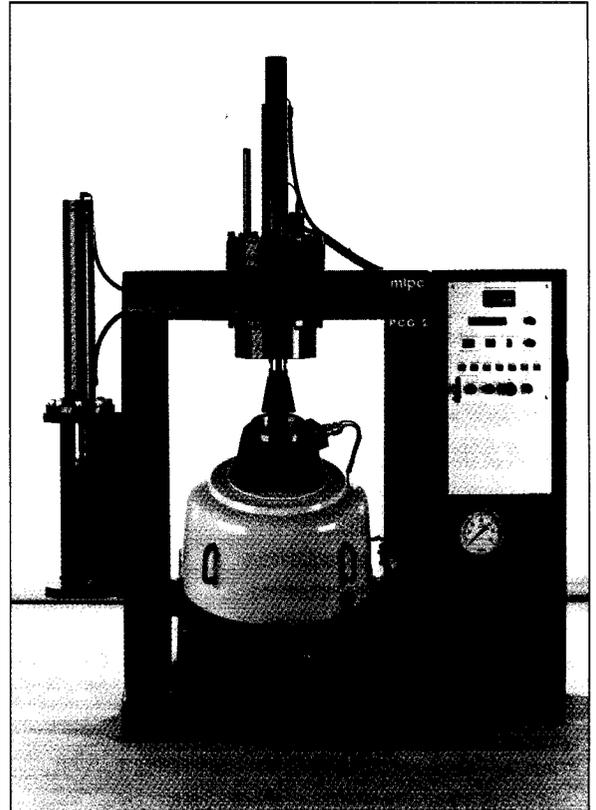


Fig. 14 - Presse à cisaillement giratoire LPC de seconde génération.

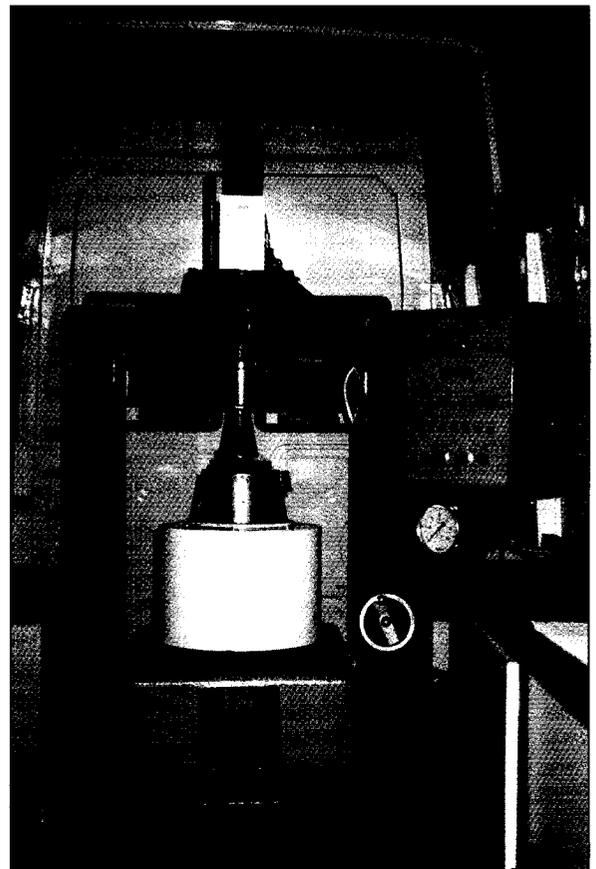


Fig. 15 - Modèle de presse à cisaillement giratoire embarqué dans un véhicule pour des essais sur site (centrale ou chantier).

L'étude d'exactitude, conduite selon les exigences de la norme NF-ISO 5725-2 et dont les résultats sont présentés en détail par Delorme [13], a donné les résultats suivants :

- répétabilité $r = 0,95$
- reproductibilité $R = 1,38$

valeurs exprimées en pourcentage de vides et obtenues pour soixante girations.

Ces valeurs confirment les qualités du matériel et de la méthode d'essai.

Les recherches ont par ailleurs été poursuivies sur la représentation de l'évolution de la compacité lors de l'essai PCG, afin de décrire correctement le comportement des mélanges très compacts au voisinage du refus [14]. La proposition de modèle sigmoïdal est présentée en détail par Moutier dans un autre article du Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées [15].

L'intérêt retrouvé aux États-Unis pour l'essai PCG à l'issue du programme SHRP, les résultats de certaines des études faites à cette occasion et l'énoncé de spécifications d'essai rejoignant celles établies en France, ainsi que l'apparition sur le marché de différentes PCG stimulèrent la conception, par les LPC, d'un matériel de troisième génération.

Ce nouveau modèle (fig. 16), conçu avec le CECP d'Angers, est décrit dans l'article de Vialletel et Moutier [16]. Ce matériel tire parti de plus de trente années d'expérience acquise par les LPC. La conception mécanique a été entièrement reconsidérée pour assurer une plus grande constance de l'angle imposé à l'éprouvette pendant l'essai. Le système de régulation en température a été supprimé, l'essai pouvant être pratiqué à une vitesse de 30 tr/min au lieu des 6 tr/min retenus précédemment, sans que ceci ait une incidence sur le résultat de l'essai. La PCG 3 bénéficie encore des progrès en matière d'électronique et d'informatique pour le système de contrôle commande et le traitement des résultats d'essais.

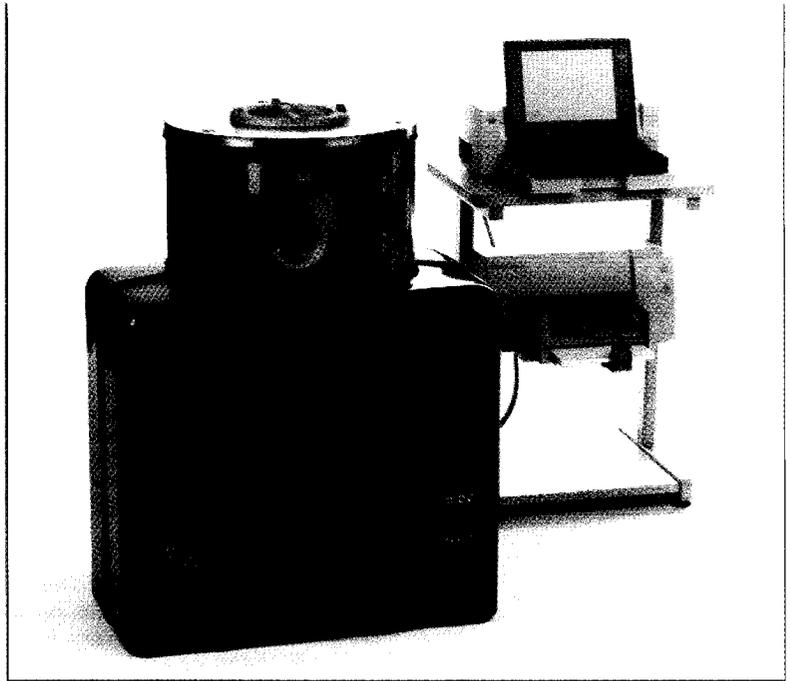


Fig. 16 - La PCG 3, dernière génération de presse à cisaillement giratoire mlpc.

Conclusions

L'intérêt de l'essai à la presse à cisaillement giratoire pour les études de formulation des matériaux bitumineux gagne un large terrain maintenant du fait, en particulier, de l'adoption de cet essai par le programme américain SHRP. À l'heure actuelle outre le LCPC, on compte au moins cinq autres constructeurs de ces matériels d'essai. Un projet de norme européenne d'essai est en préparation dans le groupe CEN.TC227/WG1. Un programme d'étude européen, conduit par le LCPC, est en cours pour établir si les différents matériels d'essais sont susceptibles de conduire aux mêmes résultats (mêmes courbes d'évolution de la compacité avec le nombre de girations) moyennant un ajustement de la valeur de l'angle d'inclinaison compte tenu des différences de technologie des divers matériels, ce, en retenant la presse à cisaillement giratoire LPC comme référence.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] COMINSKI R. J. (1994), *The Superpave mix design manual for new construction and overlays*, rapport SHRP-A-407, National Research Council, Washington, (États-Unis).
- [2] ORTOLANI L., SANDBERG H.A. (1952), La méthode de moulage par cisaillement giratoire d'éprouvettes de bétons bitumineux. Son développement et sa corrélation avec les méthodes de compactage sur chantier, *Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists*, vol. 21.
- [3] SAUTEREY R. (1964) Confection d'éprouvettes de matériaux enrobés. Le compactage par pression et cisaillement giratoire, *Bulletin de liaison des Laboratoires routiers des Ponts et Chaussées*, 5, janvier-février, pp. 3-1, 3-6.
- [4] PASSEBON J., PEIGNAUD M. (1964), Moulage d'éprouvettes d'enrobés par la presse dite « Texas » d'Angers. Comparaison avec les procédés classiques, *Bulletin de liaison des Laboratoires routiers des Ponts et Chaussées*, 5, janvier-février, pp. 4-1, 4-18.
- [5] ROLLIN J. (1964), Étude de l'homogénéité de la compacité dans les éprouvettes type « Duriez » et type « Texas », *Bulletin de liaison des*

- Laboratoires routiers des Ponts et Chaussées*, **5**, janvier-février, pp. 5-1, 5-8.
- [6] Mc RAE J.L., FOSTER C.R. (1958), Progress report on the Corps of Engineers kneading compactor for bituminous mixtures, *Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists*, vol. **27**.
- [7] UGÉ P., LEFRANCOIS J.-M. (1976), *Étude de la compaction des enrobés bitumineux*, Revue générale des Routes et Aérodrômes, **516**, p. 41.
- [8] MOUTIER F. (1973), La presse à cisaillement giratoire, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **68**, novembre-décembre, pp. 141-151.
- [9] MOUTIER F. (1974), La presse à cisaillement giratoire, modèle de série, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **74**, novembre-décembre, pp. 137-148.
- [10] MOUTIER F. (1977), Utilisations et possibilités de la presse à cisaillement giratoire, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **Spécial V**, Bitumes et enrobés bitumineux, décembre, pp. 173-180.
- [11] BALLIÉ M., DELORME J.-L., HIERNIAUX R., MOUTIER F. (1990), Formulation des enrobés : bilan des essais à la presse à cisaillement giratoire, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **170**, novembre-décembre, pp. 13-21.
- [12] MOUTIER F. (1991), Réflexion à propos d'un essai de simulation de l'aptitude au compactage d'un enrobé : l'essai à la presse à cisaillement giratoire, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **175**, septembre-octobre, pp. 93-97.
- [13] DELORME J.-L. (1997), Essai à la presse à cisaillement giratoire : expérience d'exactitude, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **211**, septembre-octobre.
- [14] MOUTIER F. (1996), *Modélisation des résultats de la presse à cisaillement giratoire. Réflexions à propos du seuil ultime de compactage*, Congrès Euraspalt & Eurobitume, Strasbourg, E&E.4.057.
- [15] MOUTIER F. (1997), Le modèle sigmoïdal de représentation des résultats PCG, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **211**, septembre-octobre.
- [16] VIALLETTEL H., MOUTIER F. (1997), La PCG 3, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **211**, septembre-octobre.

ABSTRACT

From the « Texas » compactor to the LPC PCG 3 giratory shear compactor

J.-F. CORTÉ

The giratory shear compactor has been largely used in France for over twenty years as the fundamental test in the mix design of bituminous materials.

This paper covers the changes in the test apparatus from the first prototype based on the Texas Highway Department Compactor to the PCG 3 which is the most recent LPC device, designed in 1996. The paper describes how research carried out by the Laboratoires des Ponts et Chaussées has transformed the giratory shear compactor from merely a means of compacting samples in the laboratory into a device which can be used to determine the composition of bituminous materials.