

50. SOUS-FONDATIIONS

- 50.01. DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE M_1 ET M_2 . - EN REVISION**
- 50.02. REGULARITE DE SURFACE RELEVÉE A LA REGLE DE TROIS METRES OU A L'AIDE D'UN GABARIT APPROPRIÉ.**
- 50.03. ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE D'UN SOL A L'AIDE DE LA SONDE DE BARRAGE TYPE C.R.R.**
- 50.04. ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE D'UN SOL DE BATTAGE TYPE VAN VUUREN.**
- 50.06. MASSE VOLUMIQUE IN SITU PAR ANNEAU VOLUMETRIQUE**
- 50.07. TAUX DE COMPACTAGE**
- 50.08. MODULE DE DEFORMATION A LA PLAQUE DE DIAMETRE 60 CM.**
- 50.09. DENSITOMETRE - NOUVEAU**
- 50.10. MODULE D'ELASTICITE - NOUVEAU**

50.01. DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE COMPRESSIBILITE M_1 et M_2 - EN REVISION

Référence de base: Mode opératoire MF 40/78: Essai de chargement à la plaque pour le contrôle du compactage – Centre de Recherches routières, Bruxelles.

1. BUT DE L'ESSAI

Acquérir l'ensemble des données nécessaires au contrôle de la portance des couches d'une chaussée.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

On mesure le tassement vertical sous une plaque d'acier de forme circulaire exerçant sur la surface examinée une pression verticale augmentant par paliers. Le résultat est représenté par une courbe de charge réunissant les points expérimentaux (pression appliquée en abscisse, tassement associé en ordonnée). A partir des données expérimentales, on peut calculer les coefficients de compressibilité M_i suivant la formule générale:

$$M_i = D \frac{\Delta p}{\Delta s} \text{ (en MN / m}^2\text{)}$$

où:

D = diamètre de la plaque, en mm;

Δp = différence des pressions entre deux paliers de chargement (MN/m²);

Δs = différence des tassements, correspondant à Δp en mm

Note: L'essai est effectué soit avec un chargement, soit avec deux chargements.

3. APPAREILLAGE

L'appareillage est constitué de :

- a) une plaque de chargement de 200 cm² de surface (figure 50.01/1);
- b) une plaque de chargement de 750 cm² de surface (figure 50.01/1);
- c) un appareil de chargement composé d'un vérin hydraulique (capacité minimum: 50 kN), d'une colonne de charge, d'une rallonge et d'une rotule entre la plaque et la colonne;
- d) un anneau dynamométrique de capacité 15 kN précision à 0,01 (150 N) (plaque de 200 cm²) ou tout autre matériel équivalent en précision;
- e) un anneau dynamométrique de capacité 50 kN précision à 0,01 (500 N) (plaque de 750 cm²) ou tout autre matériel équivalent en précision;
- f) trois comparateurs (précision: 1/100 mm; course minimum: 10 mm);
- g) un bâti de référence supportant les comparateurs;
- h) un dispositif de lestage;
- i) un chronomètre;
- j) un niveau d'eau;
- k) une équerre.

4. MODE OPERATOIRE

4.1. Préparation d'un essai.

4.1.1. Choix de l'emplacement de l'essai

La surface examinée doit être plane, homogène et libre de toute surcharge dans un rayon minimum égal à 4 fois le diamètre de la plaque. Les endroits desséchés par l'action du soleil, durcis par l'action prolongée du gel ou présentant une accumulation d'eau sont à éviter.

4.1.2. Choix de la plaque de chargement

La plaque de 200 cm² de surface est destinée aux essais sur argile, limon, grave (calibre maximum ≤ 40 mm), empièvements (calibre maximum ≤ 40 mm).

La plaque de 750 cm² de surface est destinée aux essais sur sable, grave (calibre maximum ≤ 75 mm), empièvements (calibre maximum ≤ 75 mm), matériau comportant de gros éléments (calibre maximum ≤ 75 mm).

L'épaisseur de la couche à examiner (à part les massifs des sols) doit être comprise:

- entre 8 et 48 cm dans le cas d'une plaque de 200 cm²;
- entre 10 et 90 cm dans le cas d'une plaque de 750 cm².

4.1.3. Installation de l'appareillage

Amener la plaque de chargement en contact avec la surface à examiner, éventuellement à l'aide d'un mince lit de sable fin ou de plâtre ne dépassant pas le périmètre de la plaque. Les comparateurs disposés à 120° prennent appui directement sur la plaque, à 6 mm de son bord. La rotule et la colonne de charge sont placées dans l'axe vertical de la plaque. Les appuis du bâti de référence ainsi que ceux du dispositif de lestage sont éloignés du centre de cette dernière d'au moins 4 fois le diamètre de la plaque (figure 50.01/2). Le bâti de référence doit être stable et protégé contre l'action directe du soleil.

Contrôler, avant le début de chaque essai :

- la position horizontale de la plaque de chargement;
- la position verticale de la colonne de charge;
- la libre course des comparateurs.

Pendant l'essai, toute circulation à proximité de l'emplacement d'essai doit être évitée.

4.2. Réalisation de l'essai.

4.2.1. Précharge

Appliquer une précharge de 0,02 MN/m². Effectuer la lecture des comparateurs, chaque minute, jusqu'à stabilisation du tassement de la plaque (critère: accroissement des lectures effectuées sur chacun des comparateurs inférieur à 0,02 mm par minute). La moyenne des dernières lectures est le zéro relatif du tassement vertical de la plaque.

4.2.2. Mise en charge

4.2.2.1. Premier cycle de chargement

Elever la pression à 0,05 MN/m². Effectuer la lecture des comparateurs chaque minute jusqu'à stabilisation (accroissements < 0,02 mm par minute sur chacun des comparateurs).

Appliquer les paliers suivants, à savoir:

- a) pour un sol d'assiette et un remblai: paliers de 0,05 MN/m² jusqu'à la pression maximum de 0,35 MN/m²;

- b) pour une sous-fondation: paliers de 0,10 MN/m² jusqu'à la pression maximum de 0,55 MN/m²;
- c) pour une fondation: paliers de 0,10 MN/m² jusqu'à la pression maximale de 0,55 MN/m².

Effectuer la lecture des trois comparateurs chaque minute, jusqu'à stabilisation (accroissements < 0,02 mm par minute). A chaque palier de pression, contrôler et maintenir la pression avec une tolérance de ± 1 % de la capacité de l'anneau dynamométrique.

4.2.2.2. Deuxième cycle de chargement

Au cas où un second cycle de chargement est demandé, notamment dans le but d'évaluer le degré de compacité des matériaux ainsi que la qualité de la mise en oeuvre, on procède comme suit :

- Décharger pendant 60 secondes, au moins jusqu'à une pression de 0,02 MN/m². Après la stabilisation des comparateurs (accroissements < 0,02 mm par minute), effectuer la lecture; la moyenne de ces lectures est le zéro relatif au deuxième cycle de chargement.
- Effectuer le deuxième cycle de chargement de la même façon que le premier cycle.

4.2.3. Validité de la mise en charge

L'essai est annulé et l'appareillage réinstallé à un autre endroit satisfaisant aux prescriptions du § 4.1.1. lorsqu'un des comparateurs s'écarte de plus de 0,5 mm (plaque de 200 cm²) ou de 0,9 mm (plaque de 750 cm²) de la moyenne des lectures faites, au même palier de pression, aux trois comparateurs.

5. INTERPRETATION DES RESULTATS

5.1. Coefficients de compressibilité M_1 (1er cycle de chargement).

Associer à chacune des pressions appliquées p (MN/m²) le tassement vertical s (= moyenne des 3 lectures relevées aux trois comparateurs après stabilisation, exprimée en mm, à la deuxième décimale près). Porter l'ensemble des couples de valeurs ainsi obtenus sur un graphique figure 50.01/3 - 50.01/ 4a ou 4b):

- pression p en abscisse (échelle: 0,1 MN/m² de pression est représenté par 2 cm sur le graphique);
- tassements en ordonnée (échelle: 1 mm de tassement est représenté par 2 cm sur le graphique).

Réunir les points expérimentaux afin d'obtenir la courbe de charge relative au 1er cycle de chargement.

Calculer le coefficient de compressibilité M_1 relatif au premier cycle de chargement, en appliquant les formules suivantes:

$$M_1 = \frac{159,6 \cdot \Delta p}{\Delta s} \quad (\text{plaque de } 200 \text{ cm}^2)$$

ou encore:

$$M_1 = \frac{3091 \cdot \Delta p}{\Delta s} \quad (\text{plaque de } 750 \text{ cm}^2)$$

où:

Δs est la différence des tassements verticaux (s = moyenne des 3 lectures relevées aux trois comparateurs après stabilisation, exprimée en mm, à la deuxième décimale près) relevée au premier cycle de chargement et relative aux paliers de pression:

- a) 0,15 MN/m² et 0,05 MN/m² pour un sol et pour un remblai
- b) 0,25 MN/m² et 0,15 MN/m² pour une sous-fondation
- c) 0,35 MN/m² et 0,25 MN/m² pour une fondation

Le coefficient de compressibilité M_1 s'exprime en MN/m² à 0,01 MN/m² près.

5.2. Coefficient de compressibilité M_2 (2ème cycle de chargement).

Le coefficient de compressibilité M_2 relatif à l'éventuel deuxième cycle de chargement se calcule suivant les formules et avec les paliers donnés ci-dessus (§ 5.1), Δs relatifs au deuxième cycle de chargement.

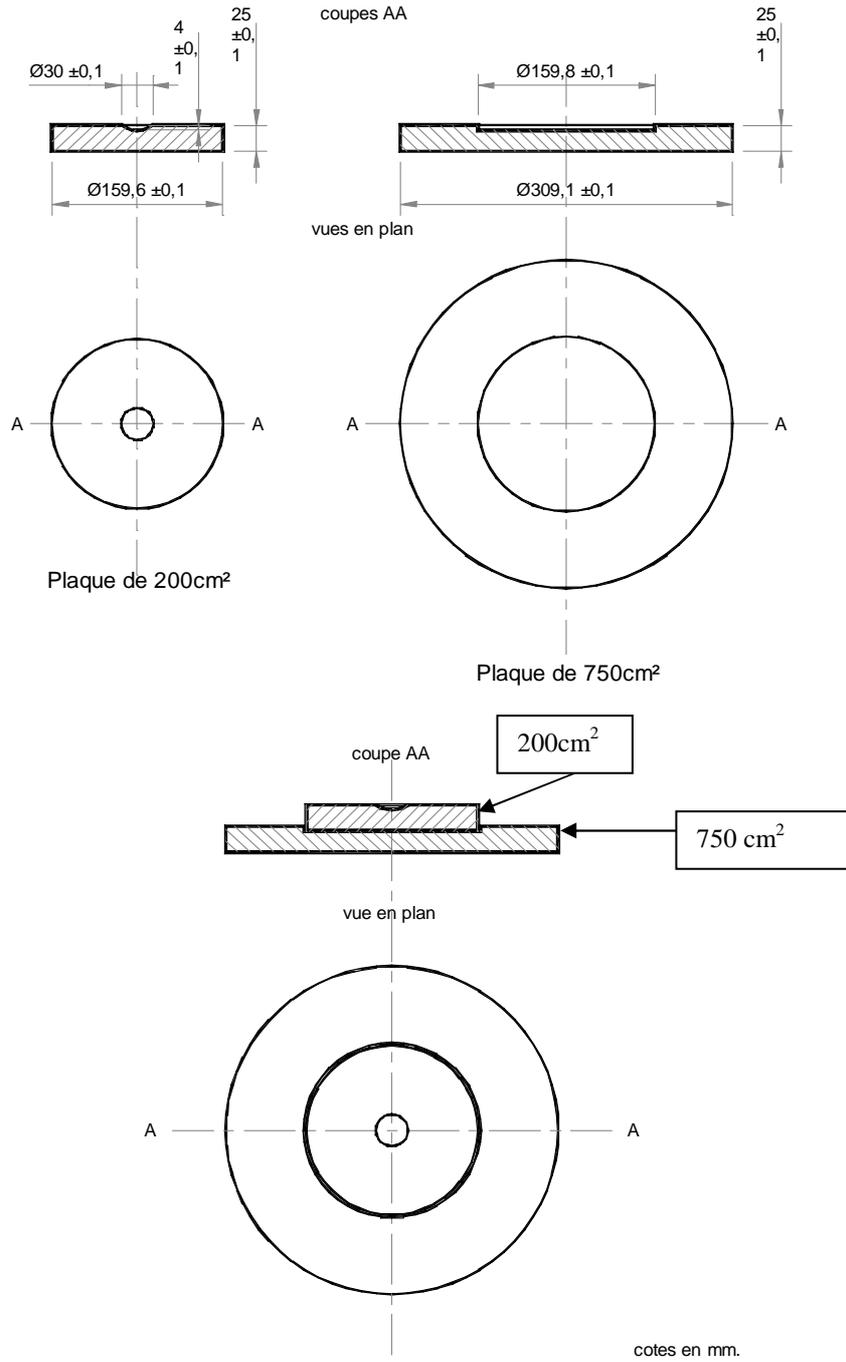
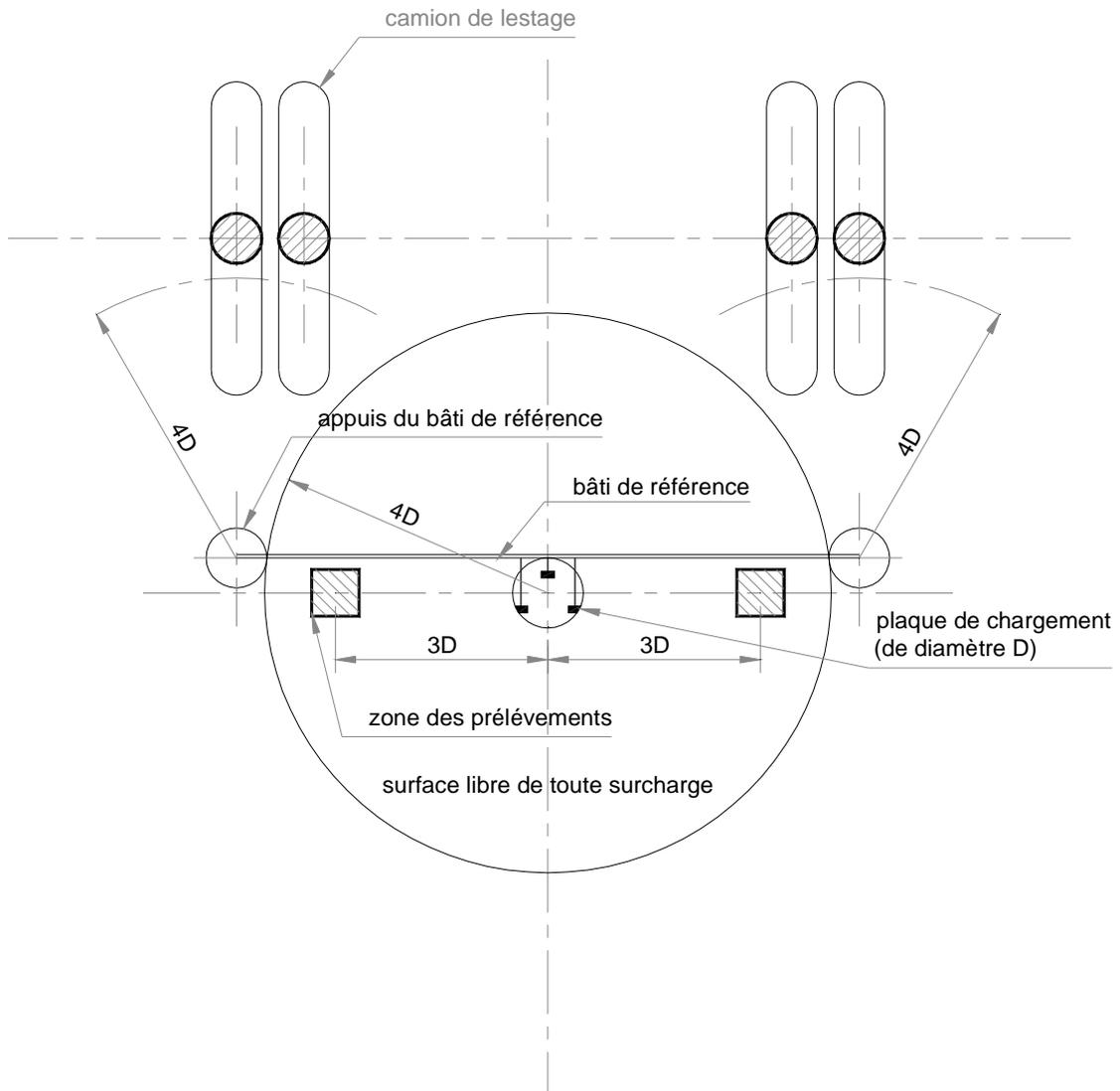


Schéma des plaques de chargement

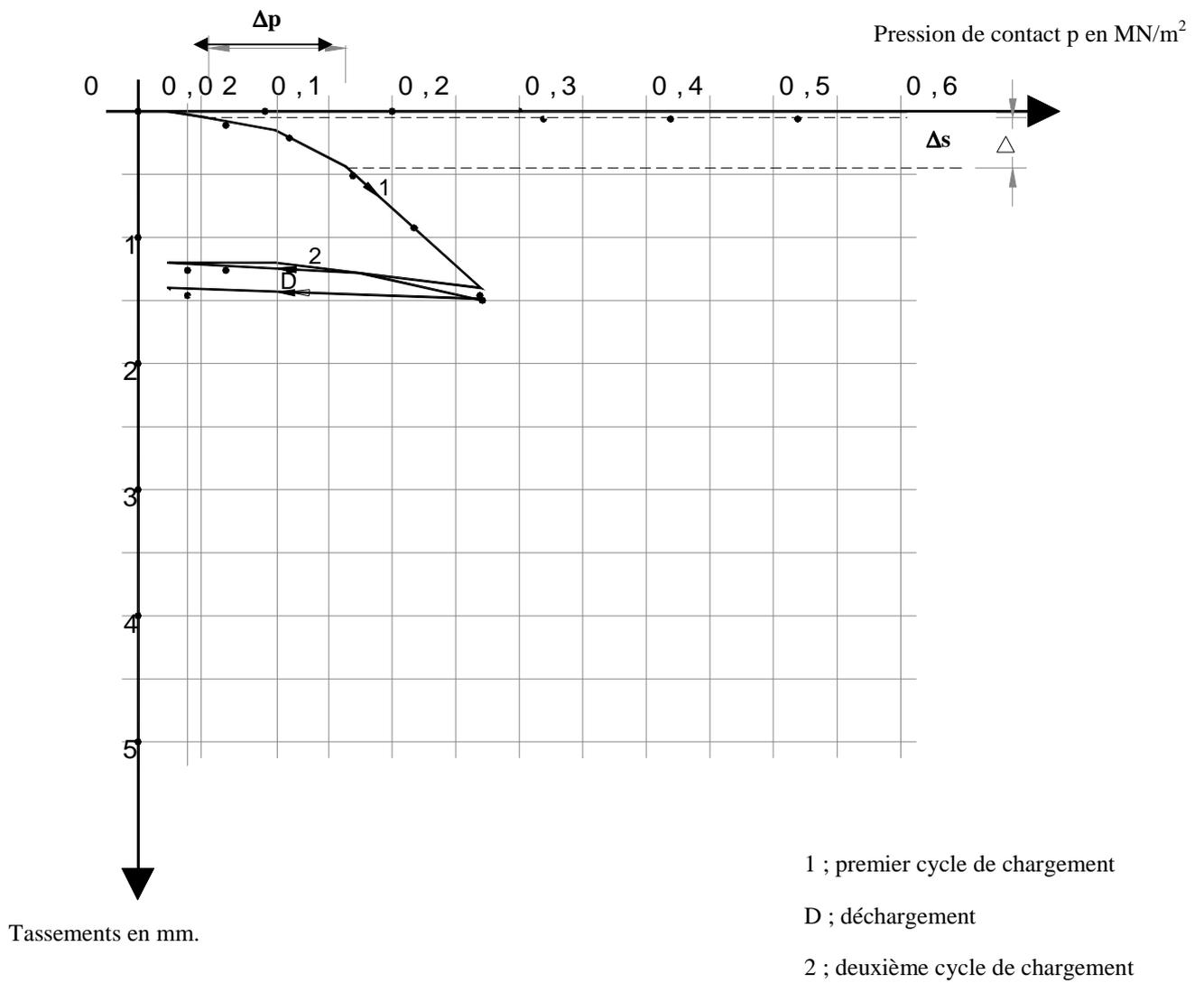
Fig. 50.01/1

Vue en plan



Situation d'un essai de chargement à la plaque

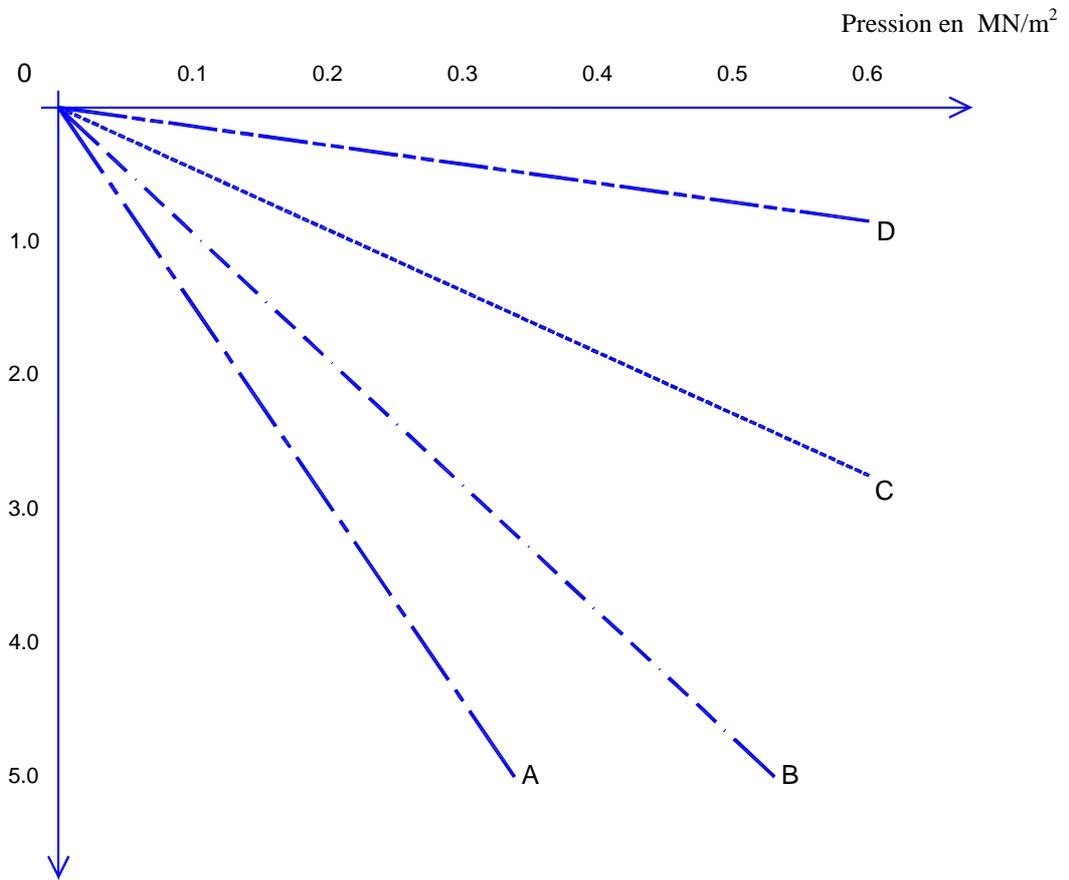
Fig. 50.01/2



**DIAGRAMME DE CHARGEMENT -
 CAS D'UN REMBLAI**

Fig. 50.01/3

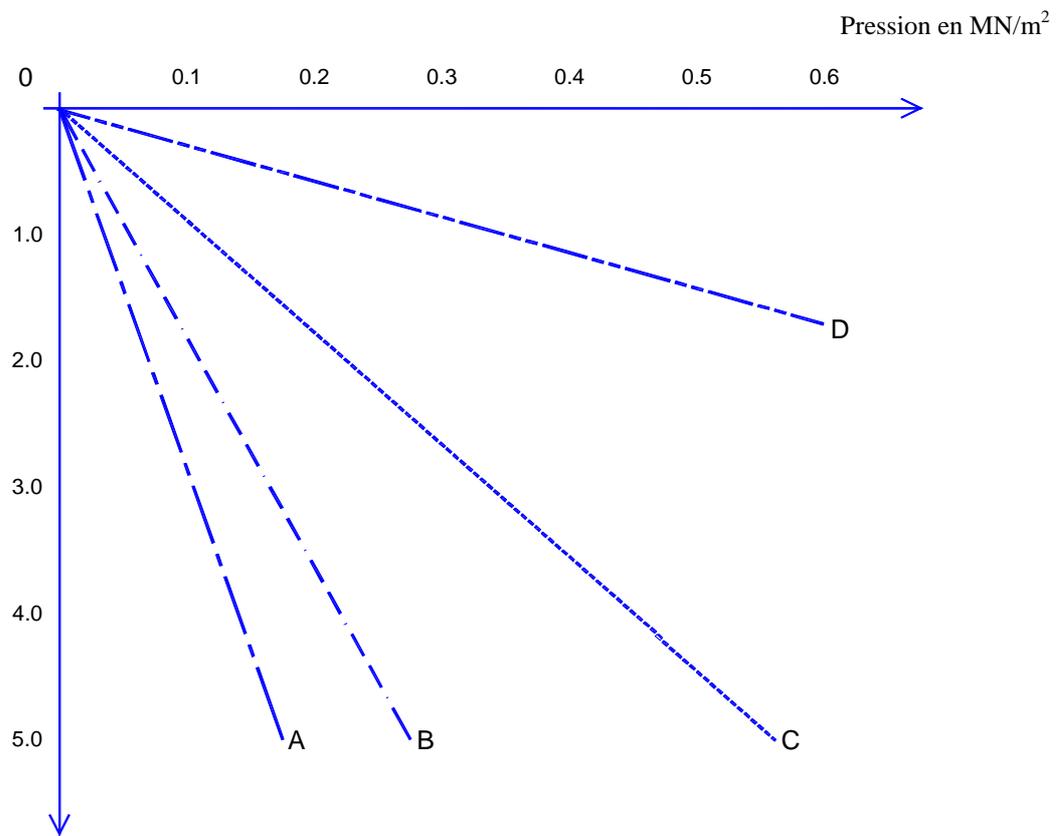
ESSAI A LA PLAQUE - 200cm²



	Droites	MN/m ² / mm	M1
0A		0,069	11
0B		0,107	17
0C		0,219	35
0D		0,689	110

Fig. 50.01/4a

ESSAI A LA PLAQUE - 750cm²



	Droites		MN/m ² /mm	M1
0A			0,036	11
0B			0,055	17
0C			0,113	35
0D			0,356	110

Fig. 50.01.4b

50.02. REGULARITE DE SURFACE RELEVÉE A LA REGLE DE TROIS METRES OU A L'AIDE D'UN GABARIT APPROPRIÉ

Référence: prEN 13036-7 «Caractéristique de surface - méthode d'essai - partie 7- Mesurage des déformations localisées dans les couches de roulement des chaussées : Essai à la règle» - 1997)

1. BUT DE L'ESSAI

Déterminer la régularité de surface d'une couche de revêtement aussi vite que possible, pendant ou après l'exécution.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

Comparer le profil réalisé à une règle de 3 mètres ou à un gabarit approprié au moyen de calibres ou de coins métalliques.

3. APPAREILLAGE

Remarque: la détermination du profil peut être déterminée à l'aide de la règle de trois mètres décrite dans le projet de norme européen ;

L'exécution de cet essai nécessite:

- une règle rigoureusement rectiligne et rigide de 3 m de longueur et de 5 cm de largeur, surmontée d'une poignée sur toute sa longueur;
- ou:

- des gabarits appropriés au profil théorique à réaliser;
- un jeu de calibres de 5 cm sur 5 cm ayant les hauteurs suivantes :

(4 + 0,20) mm
(6 + 0,20) mm
(7 + 0,20) mm
(10 + 0,20) mm
(15 + 0,20) mm
(20 + 0,20) mm

ou:

- des coins métalliques de maximum 10 cm de longueur et 2 cm de largeur, gradués en mm et permettant une lecture à 0,5 mm près.

4. MODE OPERATOIRE

La règle ou le gabarit peuvent être posés sur la surface à vérifier en tout endroit et en tout sens.

4.1. Mesure au moyen des calibres.

La mesure des dénivellations sous la règle ou le gabarit se fait au moyen des calibres métalliques.

4.2. Mesure au moyen des coins.

La mesure des dénivellations se fait au moyen d'un des coins métalliques introduit perpendiculairement sous la règle ou le gabarit et, ce, entre les deux points d'appuis.

5. INTERPRETATION DES RESULTATS

5.1. Mesure au moyen des calibres.

On vérifie que le calibre correspondant à la dénivellation maximale autorisée ne peut être introduit sous la règle ou le gabarit entre les deux points d'appuis.

5.2. Mesure au moyen des coins.

La mesure de la dénivellation est arrondie, par défaut, à 0,5 mm près.

50.03. ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE D'UN SOL A L'AIDE DE LA SONDE DE BATTAGE - TYPE CRR.

Référence: «Estimation rapide de la portance des sols à l'aide d'une sonde de battage légère type CRR», CRR, Bruxelles, 1978.

1. BUT DE L'ESSAI

La sonde de battage légère permet une estimation qualitative de la portance ou de la compacité de sols fins ne contenant pas de pierres (allant de l'argile maigre au sol sableux fin).

2. PRINCIPE DE LA METHODE

On compte le nombre de coups N , d'un mouton de masse M tombant en chute libre d'une hauteur précise H , nécessaire pour obtenir un enfoncement E , mesuré au mm près, d'une tige pourvue d'une pointe cylindro-conique.

On caractérise la couche traversée par un enfoncement moyen par coup X :

$$X = \frac{E}{N} \text{ en mm / coup}$$

Le niveau de la couche est repéré par rapport à un niveau d'origine qui doit lui-même être repéré dans un système fixe de coordonnées topographiques.

3. APPAREILLAGE

Sonde de battage légère, type C.R.R. (voir figure 50.03/1) comprenant:

- une tige de battage, avec enclume et repères permettant de fixer, de manière précise, la hauteur de chute $H = 50$ cm;
- un mouton de masse $M = 10$ kg, marqué d'un trait repère;
- une pointe de pénétration cylindrique-conique (60° d'angle au sommet; cylindre de 5 cm² de section et de $2,52$ cm de hauteur);
- trois tiges-allonges de 1 m de longueur et dont le diamètre est inférieur de 4 mm minimum à celui du manteau cylindrique de la pointe;
- une plaque de base (380×200) mm avec crampons de fixation, dégagement en V pour la sonde et logement pour la pointe de la latte de mesure;
- une latte de mesure graduée de (0 à 1000) mm, pourvue d'un embout conique télescopique.

Matériel accessoire :

- clés plates pour l'assemblage des tiges et de la pointe, brosses métalliques pour l'entretien des filets d'assemblage et marteau pour fixer les crampons de la plaque de base;
- cric pour l'extraction de la sonde du sol lorsque cette opération ne peut pas être effectuée manuellement;
- appareillage nécessaire pour la détermination des coordonnées du niveau d'origine.

4. MODE OPERATOIRE

4.1. Préparation.

Assembler la sonde de battage (assemblage de la pointe conique, de la (ou des) tige(s) - allonge(s) et de la tige de battage. Fixer la plaque de base à l'endroit de mesure choisi. Enfiler le mouton sur la tige de battage jusqu'à ce qu'il repose sur l'enclume. Placer

l'ensemble en position verticale avec la pointe dans le dégagement de la plaque de base. Placer la latte de mesure jusqu'à ce que le zéro coïncide avec le trait de repère du mouton posé sur l'enclume.

4.2. Exécution du sondage.

Maintenir la sonde verticalement et soulever en même temps le mouton jusqu'à la hauteur précise de 50 cm et le laisser tomber en chute libre sur l'enclume.

Lire au mm près sur la latte de mesure, en face du trait de repère gravé sur le mouton posé sur l'enclume, l'enfoncement de la sonde provoqué par la chute du mouton.

Répéter cette opération et compter le nombre de coups N nécessaire pour provoquer un accroissement E de l'enfoncement h de 100 mm environ.

Noter N et h sur le formulaire de sondage (voir tableau: figure 50.03/3). Continuer l'essai jusqu'à la profondeur prévue éventuellement en ajoutant des tiges-allonges. A chaque adjonction d'une tige-allonge, le zéro de la latte de mesure est réajusté.

5. RESULTATS

Les résultats sont exploités de la façon suivante:

On calcule sur le formulaire de sondage l'enfoncement E (en mm), entre deux lectures successives; après N coups :

- le rapport $X = E \text{ (mm)} / N \text{ (coups)}$ donne l'enfoncement moyen par coup X dans la couche traversée;
- la profondeur de cette couche par rapport au niveau d'origine est donnée par la lecture de h (en tenant compte de la correction nécessaire pour toutes les tiges-allonges utilisées).

Etablir un diagramme de X en fonction de la profondeur h (figure 50.03/2).

6. RAPPORT D'ESSAI

Le rapport donne, soit le formulaire de sondage dûment complété, soit les diagrammes "X/ profondeur (figure 50.03/2) avec les coordonnées du niveau d'origine et toutes les observations et remarques faites pendant les essais.

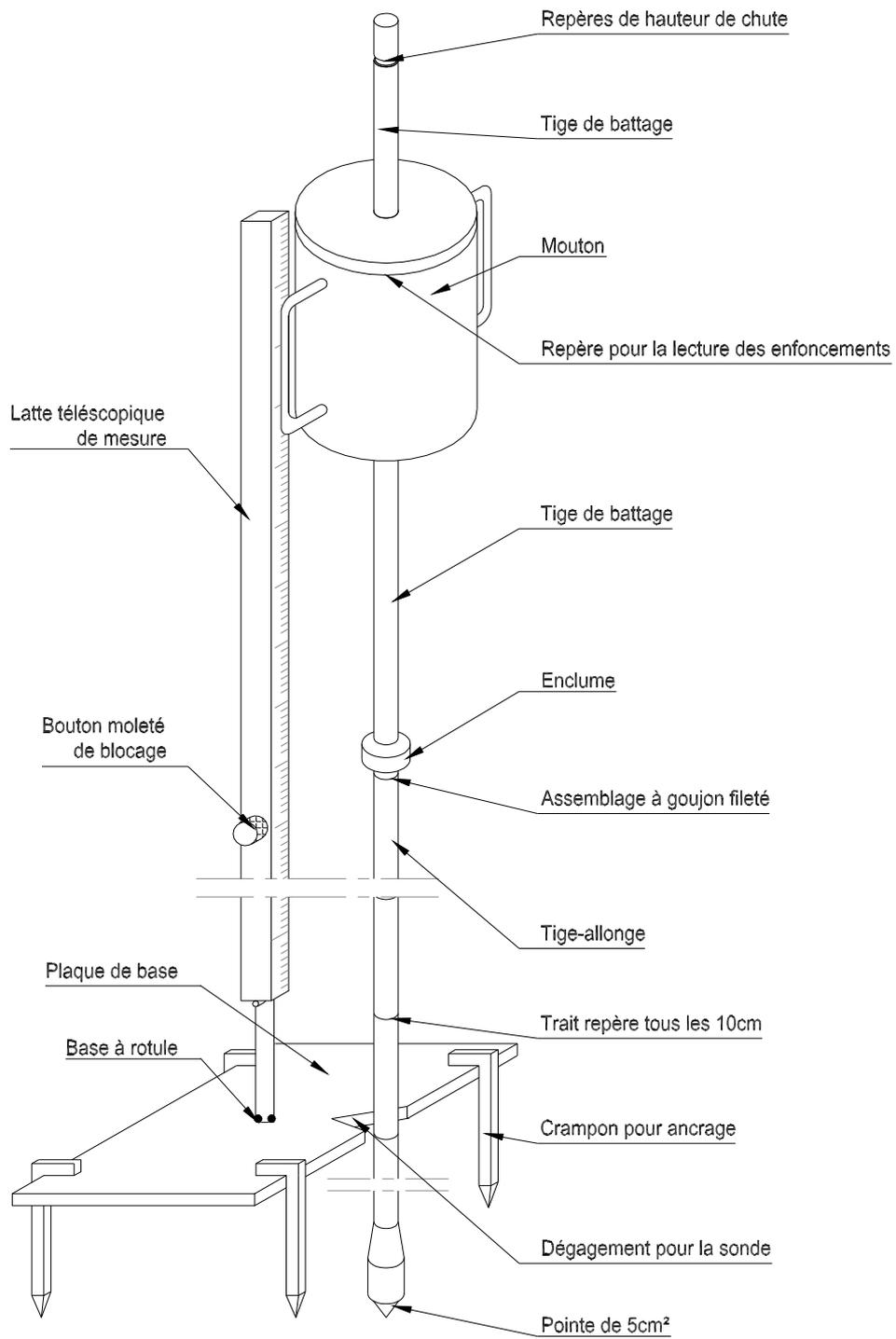


Fig. 50.03/1

SONDAGE PAR BATTAGE

Sonde type C.R.R.

Feuille d'essai

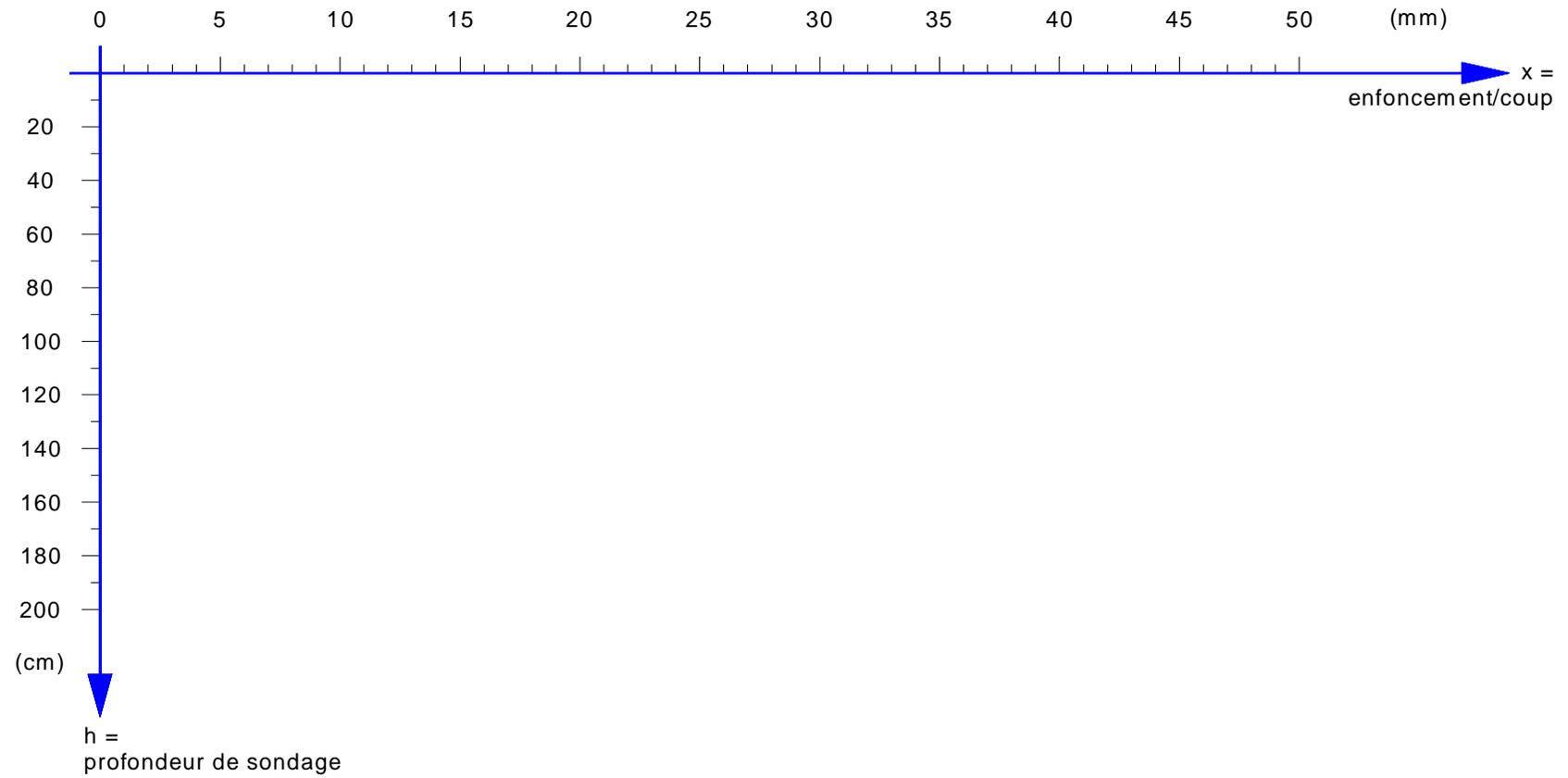


Fig. 50.03/02

SONDAGE PAR BATTAGE - SONDE TYPE C.R.R. -			DOSSIER N° LIEU DATE OPERATEUR	
Lecture h (mm) (1)	Différence E (mm) (2)	Nombre de coup N par env. 10 cm (3)	Enfoncement par coup X (mm) (4)	REMARQUES (5)

Fig. 50.03/03

50.04. ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE D'UN SOL A L'AIDE DE LA SONDE DE BATTAGE TYPE VAN VUUREN

1. BUT DE L'ESSAI

La sonde de battage légère permet une estimation qualitative de la portance ou de la compacité de sols fins ne contenant pas de pierres (allant de l'argile maigre au sol sableux fin).

2. PRINCIPE DE LA METHODE

Un mouton de masse M coulissant le long d'une tige de masse P tombe d'une hauteur H sur une enclume solidaire de la tige.

Cette tige se termine par une pointe cylindro-conique de section A.

On calcule l'enfoncement X de la pointe par coup.

3. APPAREILLAGE

Une sonde de battage légère type Van Vuuren (voir figure 50.04/1) comprenant :

- une tige de battage (diamètre 16 mm);
- un mouton d'une masse de 10 kg;
- deux tiges-allonges de 1 m (diamètre 16 mm);
- une pointe de pénétration cylindro-conique (angle à la pointe: 60; section du cylindre: 314 mm²; hauteur du manteau: 13 mm);
- une enclume;
- une plaque de base (300 mm x 300 mm) et quatre crampons de fixation;
- tiges calibrées de 46 et 52 cm;
- un mètre ruban muni d'un niveau.

4. MODE OPERATOIRE

4.1. Assemblage.

- Assembler, pour débiter, la tige de battage, une tige allonge et la pointe de pénétration (les filets d'assemblage des tiges ont été préalablement nettoyés à la brosse métallique);
- Placer l'enclume à son repère;
- Enfiler le mouton sur la tige de battage.

4.2. Installation.

Fixer la plaque de base, à l'aide des quatre crampons, à l'endroit choisi pour le sondage.

Pendant toute la durée de l'essai, la plaque de base ne peut se déplacer, sous peine de compromettre les lectures des différents enfoncements.

Redresser la sonde et la maintenir verticalement dans l'ouverture prévue au centre de la plaque de base. La pointe repose sur le sol sans s'y enfoncer.

La hauteur de chute du mouton se règle au moyen d'une des tiges calibrées.

Accrocher alors le mètre ruban dans l'encoche prévue à cet effet sur la plaque de base. Poser ensuite le mouton sur l'enclume. La surface supérieure du mouton fixe le point zéro de l'échelle de pénétration.

Remarque:

Si par sa propre masse, la sonde munie de son mouton s'enfonce dans le sol sans battage, l'ajustement du zéro au mètre ruban se fait en retenant la sonde pour empêcher que la pointe ne disparaisse soit partiellement, soit complètement. Ensuite, la sonde est libérée pour lui permettre d'atteindre la première couche résistante.

On note l'enfoncement, le nombre de coups correspondant est dans ce cas «0».

4.3. Exécution du sondage.

L'opérateur maintient les tiges verticalement :

- L'aide-opérateur soulève le mouton jusqu'au repère de la hauteur de chute adéquate et le laisse tomber en chute libre sur l'enclume;
- Renouveler la même opération, jusqu'à l'obtention d'un enfoncement d'environ 100 mm; l'opérateur note alors, sur la fiche de travail, l'enfoncement (E) au mm près et le nombre de coups donnés (N) - (voir tableau: figure 50.04/3);
- Reprendre ensuite les mêmes opérations et noter pour chacun des enfoncements d'environ 100 mm les nombres de coups correspondants;
- Suivant la profondeur du sondage à effectuer, on adoptera la hauteur de chute du mouton, à savoir:
 - tige de battage + 1 tige-allonge: 46 cm;
 - tige de battage + 2 tiges-allonges: 52 cm.

5. CALCULS

Pour chaque enfoncement «E» d'environ 100 mm, on calcule, l'enfoncement moyen par coups X:

$$x = \frac{E}{N} \text{ en mm / coup}$$

Cette valeur est alors portée, en fonction de la profondeur de sondage, sur la feuille d'essai (figure 50.04/3).

Etablir un diagramme de x en fonction de la profondeur h (figure 50.04/2).

SONDE DE BATTAGE LEGERE Type Van Vuuren

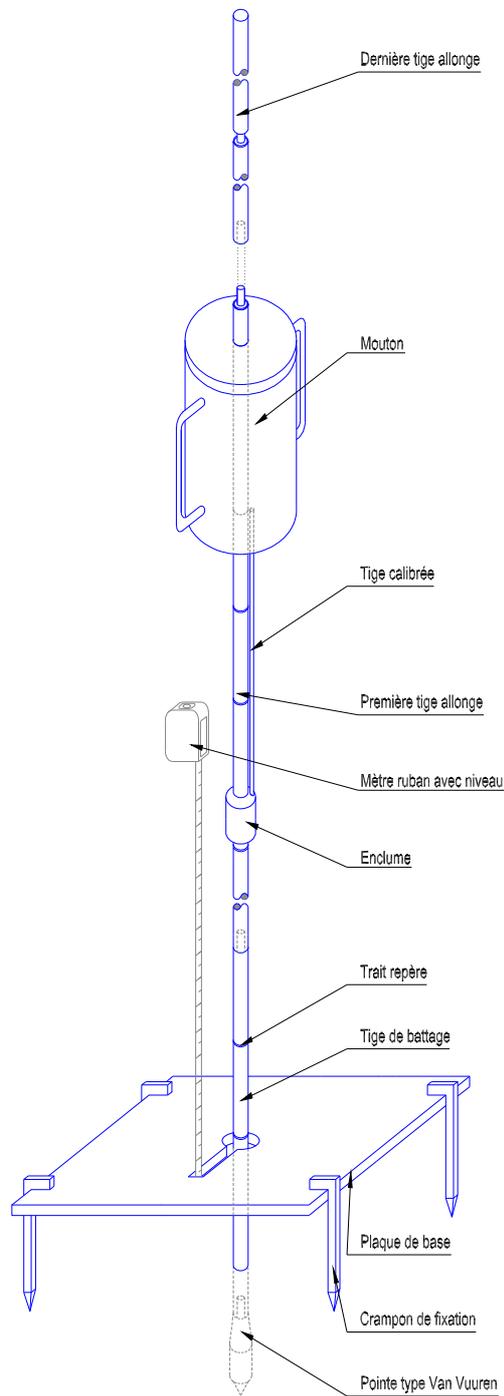


Fig. 50.04/1

SONDAGE PAR BATTAGE

Sonde type Van Vuuren

Feuille d'essai

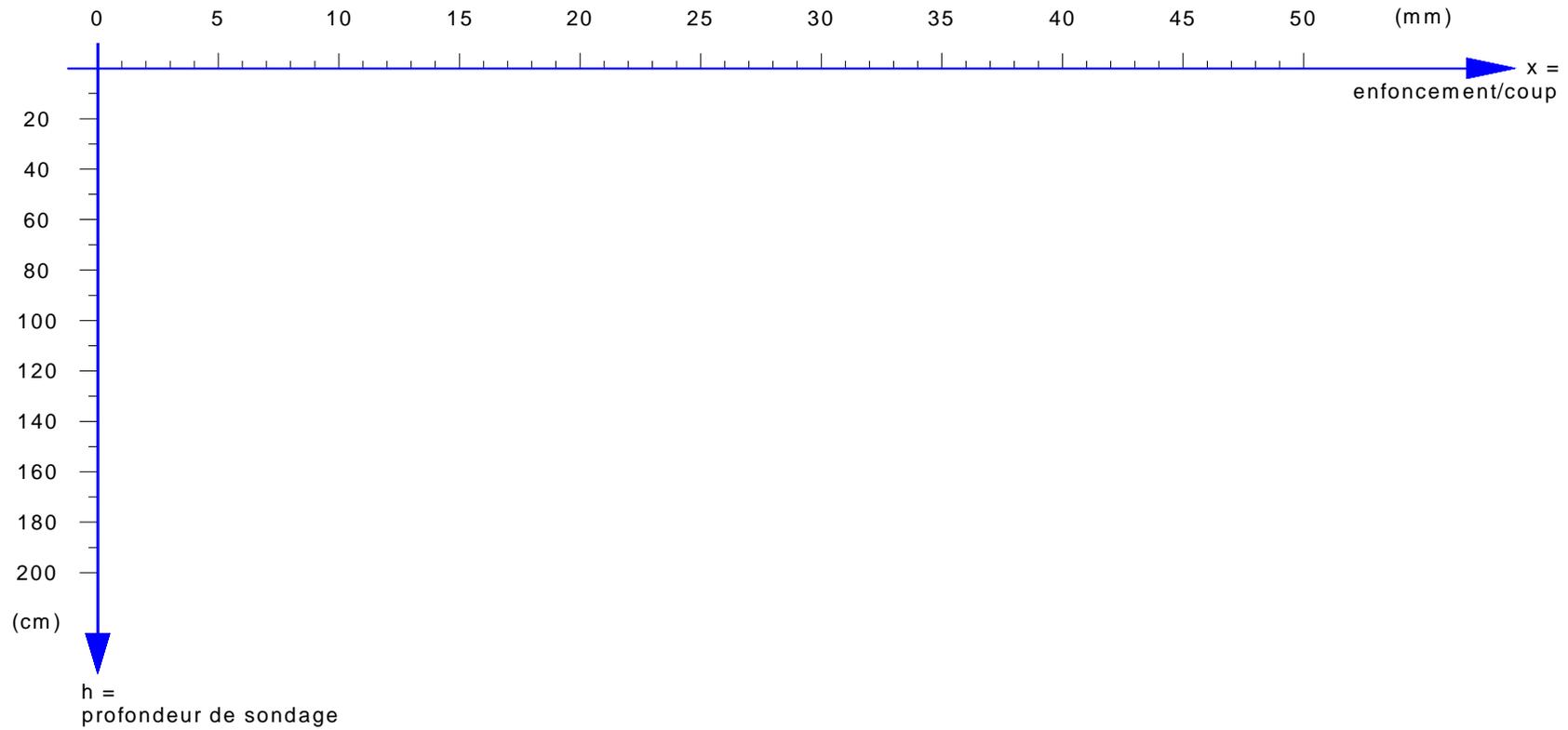


Fig. 50.04/2

SONDAGE PAR BATTAGE - SONDE TYPE VAN VUUREN-		DOSSIER N°		
		LIEU		
		DATE		
		OPERATEUR		
Lecture h (mm) (1)	Différence E (mm) (2)	Nombre de coup N par env. 10 cm (3)	Enfoncement par coup X (mm) (4)	REMARQUES (5)

Fig. 50.04/3

50.06. MASSE VOLUMIQUE IN SITU PAR ANNEAU VOLUMETRIQUE

1. BUT DE L'ESSAI

Evaluer de manière simple et rapide la masse volumique apparente sèche d'un échantillon de sol en place ou compacté ou d'un sol-ciment fraîchement compacté.

REMARQUE:

La méthode peut servir pour le prélèvement d'échantillons «non remaniés» dont on veut connaître d'autres caractéristiques que la masse volumique.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

La masse volumique apparente d'un sol est déterminée par pesée d'un échantillon de volume connu prélevé au moyen d'anneau volumétrique. La teneur en eau du sol est déterminée sur l'échantillon prélevé si aucun autre essai à la teneur en eau en place n'est demandé; elle est déterminée sur un échantillon auxiliaire prélevé dans l'environnement immédiat de l'anneau si d'autres essais à la teneur en eau en place sont requis.

La masse volumique apparente sèche est calculée à partir de la masse volumique apparente et de la teneur en eau.

Limites de la méthode:

- Cette méthode ne convient pas pour des sols graveleux ou pierreux ou des empierrements, ni pour des sols stabilisés au ciment ou à la chaux ayant fait prise.
- Cette méthode ne convient pas pour les sols à leur compacité critique.

3. APPAREILLAGE ET PRODUITS

- anneau volumétrique en acier dur (\varnothing intérieur: 5,08 cm, hauteur: 10,16 cm, épaisseur: 0,3 cm) dont une extrémité est usinée en forme de trousse coupante;
- hausse (manchon cylindrique) (\varnothing intérieur: 5,2 cm, \varnothing extérieur: 5,35 cm, hauteur: 6 cm).

Note: Si on désire utiliser l'échantillon pour des essais complémentaires (essai oedométrique, cisaillement direct ...), il peut être souhaitable d'utiliser des anneaux de diamètre conforme par exemple à l'objectif visé.

Dans ce cas, on prend par exemple: \varnothing 10 cm, hauteur: 10,16 cm, épaisseur: 0,3 cm; la hausse du manchon cylindrique a un $\varnothing_{\text{intérieur}}$ de 10,2 cm, un $\varnothing_{\text{extérieur}}$ de 10,5 cm et une hauteur de 6 cm; ces anneaux conviennent pour des sols comportant des éléments correspondant à un $D_{\text{nominal}} \leq 4$ mm.

- tube guide avec plaque de base de 30 x 30 cm pour le battage des anneaux;
- piston de battage;
- piston permettant d'expulser le sol de l'anneau;
- plane à araser en acier dur trempé;
- étuve réglée à $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$;
- balance permettant de peser 1 kg à 0,1 g près;
- alcool à brûler;
- pelle, marteau, truelle, platine ou poêle;
- sac en plastique ou récipient étanche;
- réchaud et paraffine.

4. MODE OPERATOIRE

Le tube guide est placé à l'endroit du prélèvement. On assure sa stabilité en enfonçant complètement au marteau dans le sol les pointes d'ancrage situées aux quatre coins de la plaque de base.

L'anneau est légèrement huilé intérieurement et extérieurement et enfilé dans le tube guide, trousse coupante vers le bas. On y introduit de plus, successivement, une hausse et le piston de battage. L'ensemble anneau, hausse et piston est enfoncé au marteau jusqu'à un niveau tel que la partie supérieure de l'anneau soit au moins 1 cm plus bas que la surface de l'aire arasée.

On enlève le tube guide et on creuse à la pelle autour de l'anneau de manière à dégager un pilier contenant l'anneau sans toucher celui-ci avec la pelle.

Puis, on le sépare à la pelle du sol sous-jacent. Le sol dépassant les deux sections terminales de l'anneau volumétrique est enlevé prudemment et les deux extrémités sont arasées à la plane.

L'échantillon est poussé hors de l'anneau à l'aide du piston d'expulsion et pesé immédiatement à 0,5 g près (masse M_1). Il est aussi permis d'effectuer la pesée en un lieu différent de celui du prélèvement; dans ce cas, on introduit l'échantillon de l'anneau dans un sac plastique ou un récipient soigneusement fermé pour éviter toute évaporation de l'eau contenue dans l'échantillon.

Si l'échantillon doit être ramené intact, on introduit l'anneau et son contenu préalablement paraffiné sur les deux bases, dans un sac plastique.

5. DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU

5.1 Détermination de la teneur en eau en laboratoire.

5.1.1 L'échantillon prélevé n'est destiné qu'à la mesure de la teneur en eau.

L'échantillon est placé sur une platine préalablement tarée (M_0) et puis est pesé (M_2) à 0,1 g près. L'échantillon est séché jusqu'à masse constante dans une étuve à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$. Après séchage, l'échantillon et sa platine sont pesés (M_3).

5.1.2 L'échantillon prélevé est destiné à d'autres essais.

Une partie du sol extrait lors du dégagement de l'anneau (voir § 4) est séchée jusqu'à masse constante.

Au cours du creusement du sol, autour de l'anneau volumétrique à dégager (§ 4), une partie du matériau extrait (environ 500 g) est prise comme échantillon auxiliaire pour la détermination de la teneur en eau. Cet échantillon est transporté dans un récipient hermétique et on procède comme au § 5.1.1.

5.2. Détermination in situ de la teneur en eau.

Cette méthode est appliquée pour la détermination de la teneur en eau d'un sol-ciment au cas où on ne peut se permettre une durée de transport favorisant la prise du ciment.

Une partie du sol-ciment ou du sol extrait de l'assise lors du dégagement de l'anneau (voir § 4) est séchée jusqu'à masse constante.

Au cours du creusement de l'assise en sol-ciment ou du sol autour de l'anneau volumétrique à dégager (§ 4), une partie du matériau excavé (environ 500 g) est prise comme échantillon auxiliaire pour la détermination de la teneur en eau.

Cet échantillon auxiliaire, introduit dans une platine ou une poêle tarée (M_0) est pesé à 0,5 g près dès son prélèvement (masse M_2) puis désagrégé.

On arrose l'échantillon avec environ 100 ml d'alcool à brûler que l'on enflamme. Au cours de la combustion, on remue continuellement l'échantillon à l'aide d'une spatule.

On pèse ensuite la platine ou la poêle et son contenu à 0,5 g près.

On recommence les opérations de brûlage et de pesée sur le même échantillon autant de fois que nécessaire pour que les différences entre deux pesées successives n'excèdent pas 0,1 % de la masse initiale de l'échantillon.

Soit alors M_3 (en g à 0,5 g près) la masse de l'échantillon sec.

6. CALCUL

6.1 Masse volumique apparente.

La masse volumique apparente (MVA) du sol ou sol-ciment fraîchement compacté se calcule avec deux décimales par :

$$MVA = \frac{M_1}{V}$$

où:

MVA est la masse volumique apparente en gramme par cm^3

M_1 est la masse de l'échantillon en g;

V est le volume de l'anneau en cm^3 .

6.2 Teneur en eau.

La teneur en eau (w) exprimée en % avec une décimale, se calcule par :

$$w = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_0} \cdot 100$$

6.3 Masse volumique apparente sèche.

La masse volumique apparente sèche (MVS) de l'échantillon prélevé à l'anneau volumétrique se calcule avec 2 décimales:

$$MVS = MVA \cdot \frac{1}{1 + \frac{w}{100}}$$

où:

MVS est la masse volumique apparente sèche en gramme par cm^3

MVA est la masse volumique apparente en gramme par cm^3

50.07. TAUX DE COMPACTAGE

1. BUT DE L'ESSAI

Comparer le résultat d'un compactage in situ au compactage conventionnel réalisé en laboratoire sur le même matériau.

2. PRINCIPE DE LA METHODE

On détermine sur le matériau la valeur maximum de sa masse volumique sèche obtenue par compactage conventionnel en laboratoire à différents teneurs en eau. La procédure de compactage est décrite dans l'ASTM D 698 pour la détermination de l'optimum proctor normal ou dans l'ASTM D 1557 pour la détermination de l'optimum proctor modifié.

On obtient la valeur de la masse volumique sèche du même matériau mis en place in situ par une des méthodes de la détermination de la masse volumique sèche in situ : méthode de l'anneau volumétrique (CME 50.06), méthode de la bouteille à sable (CME 52.03), ou méthode équivalente.

On détermine le rapport de la masse volumique in situ à celle obtenue par le compactage conventionnel en laboratoire.

3. EXPRESSION DU RESULTAT

Soit $MVS_{in\ situ}$ la masse volumique de matériau compacté in situ, exprimée en kg/m^3 . Soit MVS_{OPN} ou MVS_{OPM} la masse volumique correspondant à l'optimum proctor normal ou à l'optimum proctor modifié, obtenue en laboratoire et exprimée en kg/m^3 .

Le taux de compactage est donné par l'expression:

$$\text{Taux compactage (\%)} = \frac{MVS_{in\ situ}}{MVS_{OP(N\ ou\ M)}} \cdot 100$$

4. RAPPORT D'ESSAI

Le rapport d'essai mentionne:

- la méthode de détermination de la masse volumique in situ et la valeur du $MVS_{in\ situ}$ exprimée en kg/m^3 ;
- la méthode de compactage conventionnel et la valeur du MVS_{OPN} ou MVS_{OPM} exprimé en kg/m^3 ;
- le taux de compactage exprimé en %.

50.08. MODULE DE DEFORMATION A LA PLAQUE DE DIAMETRE DE 60 CM

Référence de base : MODE OPERATOIRE DU L.C.P.C. – "ESSAI A LA PLAQUE" - DUNOD PARIS 1973.

1. DEFINITION ET BUT DE L'ESSAI

L'essai consiste à mesurer, à l'aide d'un appareillage défini au point 3, le déplacement vertical du point de la surface du sol situé à l'aplomb du centre de gravité d'une plaque rigide chargée. Ce déplacement est appelé déflexion (W).

Les caractéristiques de la plaque (forme, dimensions, rigidité) ainsi que les valeurs des charges qui lui sont appliquées, sont indiquées aux points 3 et 4.

Cet essai est destiné à la mesure de la déformation des plates-formes de terrassement constituées par des matériaux dont les plus gros éléments ne dépassent pas 200 mm.

2. PRINCIPE DE L'ESSAI

En chaque point choisi de la plate-forme à contrôler :

- on mesure les déflexions du point considéré au cours de deux cycles de chargement et à partir d'une position initiale de référence définie au point 4.
- on calcule, connaissant les charges transmises par la plaque et les déflexions correspondantes, les modules et le coefficient définis au point 5.

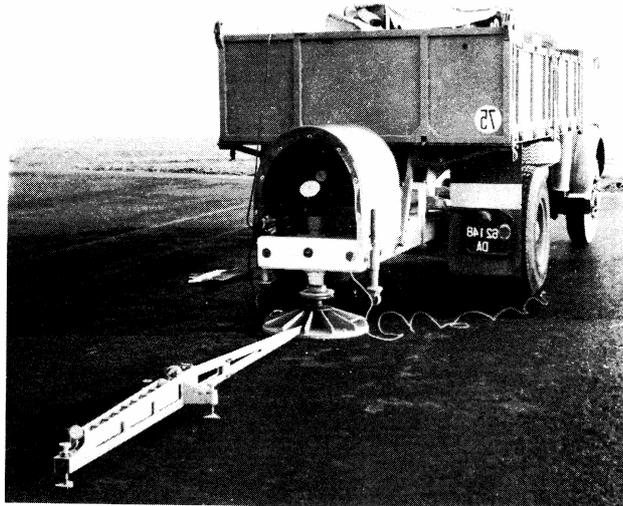
3. APPAREILLAGE

3.1 Appareillage spécifique.

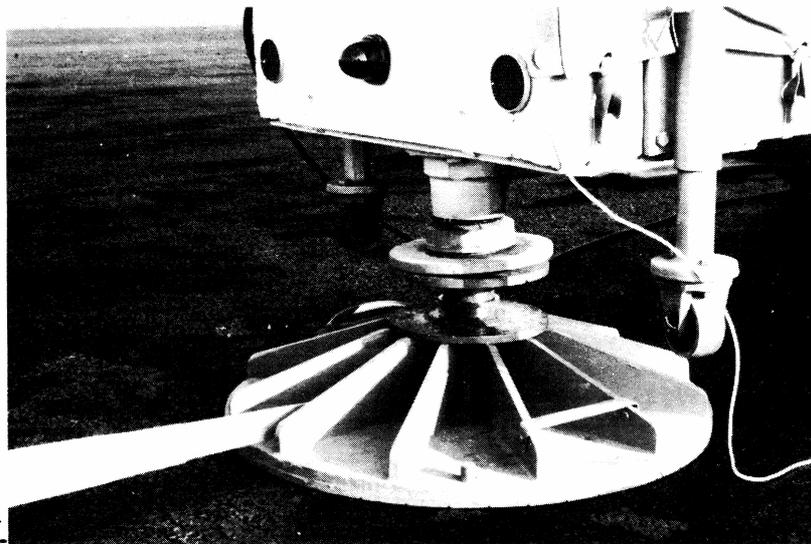
Dispositif de mise en charge de la plaque

Ce dispositif (figure 50.08/1a,b) comprend:

- un massif de réaction, constitué par un véhicule "lestable" permettant un chargement de 7 000 daN (\approx 7 tonnes) sur la plaque. Les points d'appui de ce massif sur le sol doivent se situer à une distance supérieure à 2 mètres du point où se fait la mesure;
- un dispositif de mise en charge hydraulique constitué par un groupe "moto-pompe" actionnant un vérin. Ce dispositif doit permettre de réaliser les cycles de chargement tels qu'ils sont définis au point 4;
- une plaque de 600 mm de diamètre. Les dimensions, forme et matière de cette plaque doivent être conformes à celles indiquées par la figure 50.08/2. Une liaison à rotule doit être prévue entre la plaque et la tige de commande du vérin.



ENSEMBLE DE L'APPAREILLAGE
Fig. 50.08/1a



PLAQUE EN POSITION D'ESSAI
Fig. 50.08/1b

Dispositifs de mesure

La connaissance de la courbe charges-déflexions apportant un complément d'indications souvent indispensable à l'interprétation des résultats numériques, le dispositif de mesure doit permettre l'enregistrement de cette courbe.

Dispositif de mesure des déflexions (figure 50.08/3a)

Il est constitué d'une poutre Benkelman équipée d'un capteur de déplacement (type comparateur potentiométrique) de 10 mm de course. Ce capteur est relié à un enregistreur XY de type courant et commande le déplacement du stylet de l'enregistreur en fonction de la déflexion du sol. Un tel capteur permet également un contrôle visuel de la déflexion en lisant directement sur le cadran gradué en 1/100 mm l'indicateur donnée par l'aiguille.

L'extrémité du fléau de la poutre Benkelman prend appui sur une pige coulissant à l'intérieur de la plaque (figure 50.08/3b). Un guidage précis de la pige dans la plaque doit être assuré.

Dispositif de mesure des charges :

Il comporte, d'une part, un peson à jauges 0 – 10 000 daN relié à l'enregistreur XY qui commande le déplacement du stylet en fonction de la charge appliquée et, d'autre part, un manomètre intercalé dans le circuit hydraulique (ou éventuellement un anneau dynamométrique sur la tige du vérin) qui permet un contrôle visuel de la charge appliquée sur la plaque afin de respecter, en particulier, les vitesses de montée en charge définies au chapitre 4.

3.2. Appareillage d'usage courant.

- Véhicule couvert auto-moteur, charge utile \approx 800 kg;
- Règle en acier, mètre et décamètre à ruban;
- Chronomètre;
- Tunnel en tôle d'aluminium destiné à la protection de la poutre Benkelman (soleil, pluie ou vent);
- Craie, pinceaux et peinture;
- Récipients de sable et de plâtre, bidon d'eau;
- Pelle, pioche, truelle, spatule, brosse poils doux;
- Boîtes hermétiques pour prélèvement d'échantillons.

4. MODE OPERATOIRE

4.1. Préparation de l'essai.

L'emplacement du point de mesure étant choisi, il convient d'opérer comme indiqué ci-après:

- à l'aide d'une règle en acier, débarrasser l'emplacement de la plaque de tout le matériau foisonné ; terminer avec une brosse douce;
- régulariser la surface ainsi apprêtée en y répandant une couche aussi mince que possible d'un sable propre 0/1 mm légèrement humide;
- exécuter au centre de la couche d'interposition, à l'aide d'une spatule, une petite cuvette circulaire de 2 cm de rayon, dont le rôle est de permettre que la pige de mesure repose bien sur le sol et non sur la couche d'interposition.

Si l'on craint que le matériau flue sous la pige lors de l'application de la charge, provoquant ainsi une fausse lecture de la déflexion, on rigidifie la surface de la cuvette

en y déposant, à la spatule, une mince couche de plâtre. On doit attendre la prise de celui-ci avant de poursuivre l'essai (5min). Cette précaution peut être également envisagée pour les matériaux comportant une faible proportion d'éléments 0/5 mm. Dans ce cas, la pige pourrait en effet, durant la charge, glisser de l'élément sur lequel elle repose et tomber dans un vide:

- parfaire ensuite la mise en place de la plaque sur le sol, en lui faisant subir deux ou trois rotations alternatives de 30° environ;
- après la mise en place de la plaque, installer la poutre Benkelman, en s'assurant que ses points d'appui sur le sol sont situés à une distance au moins égale à 2,5 m de ceux du massif de réaction. Installer, si nécessaire, le tunnel de protection de la poutre Benkelman;
- placer ensuite le peson électronique entre la face d'appui du vérin et la plaque;
- réaliser les branchements électriques entre le capteur, le peson électronique et l'enregistreur XY;
- terminer la mise en place de la plaque en lui appliquant, durant une dizaine de secondes, une charge de 850 daN correspondant à une pression moyenne sous la plaque de 0,3 bar. Relâcher cette charge et amener le stylet de l'enregistreur XY au point 0 du système de coordonnées;
- positionner la feuille d'essai sur la table de l'enregistreur.

On se trouve alors dans les conditions de la *position initiale de référence*.

4.2. Exécution de l'essai.

Les dispositions relatives à la position initiale de référence étant établies :

- un premier opérateur met en action le dispositif de chargement de la plaque, de façon à obtenir les cycles de chargement et déchargement définis ci-après;
- un deuxième opérateur s'assure du bon déroulement de l'enregistrement de la courbe charges-déformations.

L'essai est alors conduit de la manière suivante:

Premier cycle de chargement

Charger la plaque à la vitesse de 80 daN/s environ jusqu'à obtenir une pression moyenne sous la plaque de 2,5 bars, ce qui correspond à une charge totale de 7 065 daN. Lorsque cette pression est atteinte, attendre la stabilisation de la déflexion.

On considère que la stabilisation est atteinte lorsque les variations de la déflexion sont inférieures à 0,02 mm/min.

Supprimer alors la charge sous la plaque en (2 à 3) secondes environ.

Second cycle de chargement

De la même manière que pour le premier cycle, charger la plaque à la vitesse de 80 daN/s jusqu'à obtenir une pression moyenne sous la plaque de 2 bars, ce qui correspond à une charge totale de 5 650 daN.

Lorsque la stabilisation de la déflexion est atteinte, l'essai proprement dit est terminé : procéder aux manœuvres de déchargement, relevage de la plaque, rangement du matériel et passer au point de mesure suivant.

Mesurer alors sur la feuille d'essai (exemple: figure 50.08/4) les valeurs des déflexions obtenues après stabilisation, soit:

W_1 mm, déflexion à la suite du premier chargement ;
 W_2 mm, déflexion à la suite du second chargement.

Précautions à prendre

Durant l'attente de la stabilisation, maintenir la charge sous la plaque aussi constante que possible :

- l'opérateur chargé de réaliser les cycles de chargement doit noter à la fin de chaque cycle, les valeurs de la charge appliquée et de la déflexion correspondante indiquées par le manomètre ou l'anneau dynamométrique et le comparateur potentiométrique; cette précaution permet de contrôler le bon fonctionnement de la chaîne de mesure;
- si, par incident de manœuvre, la valeur de la charge appliquée pour l'un ou l'autre des deux cycles de chargement est légèrement supérieure à celle indiquée précédemment, conserver cette valeur mais la valeur du module correspondant doit être recalculée d'après la formule générale indiquée au point 5;
- noter également sur la feuille d'essai tout détail ou incident pouvant influencer les résultats numériques ou graphiques, tels que : averse durant l'essai, passage d'un engin lourd à proximité du point d'essai, vent, soleil, etc. En particulier, noter le temps de la stabilisation de la déflexion si celui-ci est supérieur à deux minutes;
- à la fin de l'essai, il est conseillé dans le cas des sols sensibles à l'eau de prélever environ 1 500 g de matériau au point d'essai, afin de déterminer sa teneur en eau et éventuellement les limites d'Atterberg, en vue de l'interprétation des résultats numériques.

REMARQUE :

Si pour une raison quelconque, on ne dispose pas de l'enregistreur XY, le tracé point par point de la courbe charges-déformations peut quand même être réalisé. Dans ce cas, le premier opérateur indique la charge (tous les 1 000 daN par exemple) et le second lit sur le comparateur potentiométrique la déflexion correspondante.

5. EXPRESSION DES RESULTATS

A partir des résultats mesurés sur la feuille d'essai, on calcule les modules de déformation relatifs à chacun des deux cycles de chargement d'après la formule générale donnant la déflexion totale à la surface d'un massif indéfini, homogène et élastique soumis à une charge sur une plaque circulaire rigide:

$$W = \frac{1,5 Q \cdot a}{E_v} (1 - \sigma^2)$$

où:

W : déflexion du massif au centre de la plaque, en mm,

E_v : module de déformation à la plaque,

Q : pression moyenne sous la plaque, en bars,

a : rayon de la plaque, en mm,

σ : coefficient de Poisson considéré égal à 0,25.

Compte tenu des valeurs de la pression moyenne retenues, du diamètre de la plaque et en assimilant l'expression $(1 - \sigma^2)$ à 1, les modules de déformation au premier et au second chargement se calculent d'après les formules ci-après:

$$E_{v1} = \frac{1125}{W_1} \text{ et } E_{v2} = \frac{900}{W_2}$$

On calcule ensuite le rapport $K = \frac{E_{v2}}{E_{v1}}$ à 0,01 près.

6. RAPPORT D'ESSAI

Le rapport d'essai mentionne entre autres :

- l'emplacement de l'essai;
- la nature de la surface d'essai;
- le remaniement et ou la stabilisation éventuelle de la surface d'essai ou de l'endroit de mesure de la déflexion;
- les courbes de chargement;
- les valeurs de modules de déformation et le rapport de ces modules;
- toute autre disposition prise par rapport au mode opératoire ou à l'équipement.

7. COMMENTAIRES ET ANNEXE

Chaque paragraphe de ce point se réfère au paragraphe portant le même numéro dans les points précédents.

« 50.08 – § 1. Définition et but de l'essai »

La mesure de la déformabilité d'un massif de sol est un élément important pour apprécier les possibilités de mise en œuvre et de compactage des couches supérieures. Cette déformabilité doit être compatible avec les déformations que peut supporter le matériau que l'on désire mettre en œuvre au-dessus sans que celui-ci risque de se décompacter par cisaillement. En conséquence, le contrôle de la déformabilité d'une plate-forme de terrassement est recommandé chaque fois que l'on est amené à mettre en œuvre un matériau peu déformable sur un matériau qui peut l'être beaucoup plus: c'est le cas notamment lors de la réalisation d'une couche de forme ou d'une couche de fondation.

« 50.08 - § 3.1. Appareillage spécifique »

La construction d'un appareillage permettant de satisfaire les conditions requises par l'essai peut être entreprise en s'inspirant des principes ci-après. Pour tous renseignements complémentaires s'adresser au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

Dispositif de mise en charge de la plaque

Le massif de réaction peut être constitué par un camion de chantier (2 essieux moteurs) d'un type courant pouvant supporter une charge totale utile de 15 à 20 tonnes. Ce véhicule doit être lesté de façon à disposer d'une réaction d'au moins 8 tonnes à une distance supérieure à 2 mètres des essieux arrière. Pour ce faire, il peut être nécessaire de prévoir un bridage de la suspension arrière et de soutenir l'avant du véhicule au moyen de crics ou de vérins, par exemple.

Le dispositif de mise en charge de la plaque peut être réalisé en s'inspirant du schéma hydraulique représenté à la figure 50.08/5.

Dispositif de mesure

Le déflectomètre Benkelman est commercialisé ; son adaptation pour les essais à la plaque nécessite toutefois la réalisation d'un bec spécial schématisé à la figure 50.08/3a.

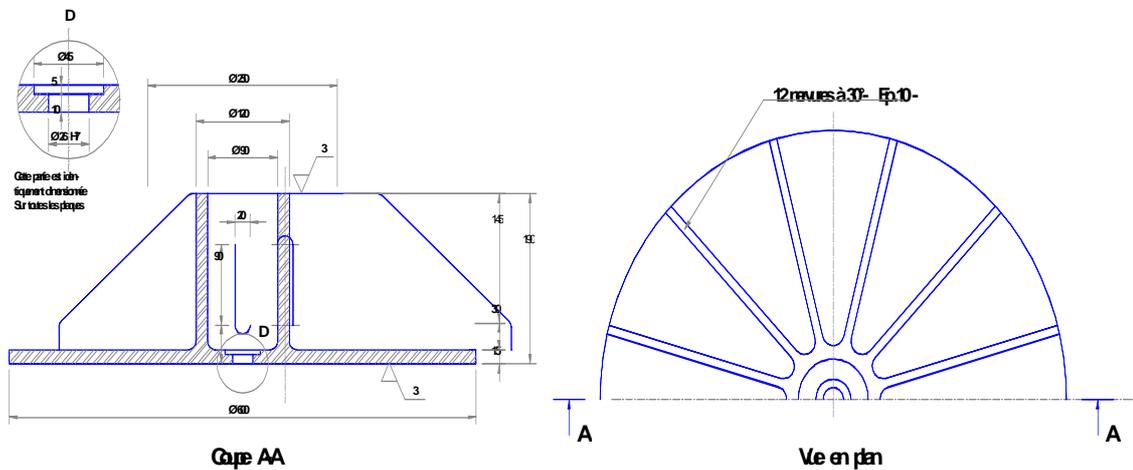
Les éléments de la chaîne électronique de mesure : peson à jauge, comparateur potentiométrique, enregistreur XY sont des instruments largement commercialisés.

La source électrique nécessaire à la mise en œuvre de la chaîne électronique de mesure peut être tout simplement constituée par la batterie du camion ou par un petit groupe électrogène auxiliaire de 0,5 kVA.

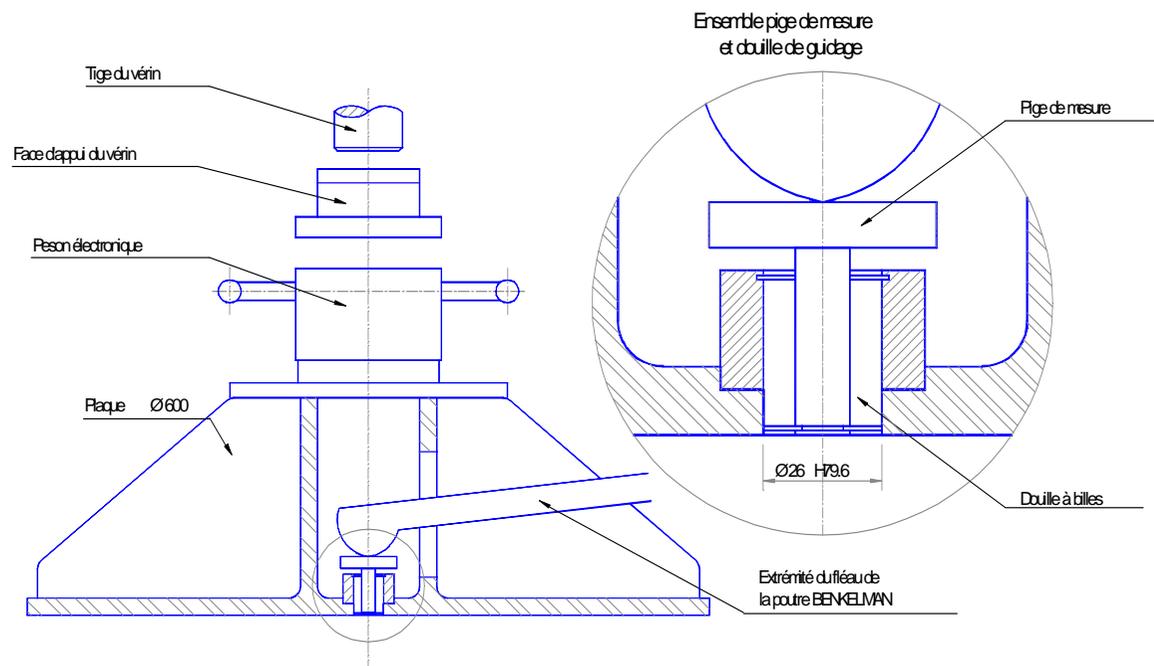
Le cadran du manomètre de contrôle ou du comparateur de l'anneau dynamométrique peut être avantageusement gradué directement en force appliquée sur la plaque et comporter des repères pour contrôler la vitesse de mise en charge de la plaque.

«50.08 - § 4. Exécution de l'essai»

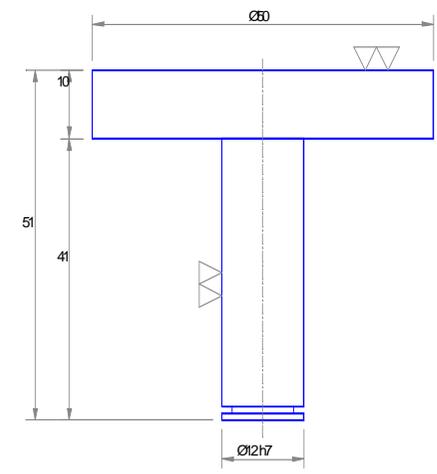
L'essai décrit dans ce mode opératoire permet de réaliser, avec deux agents, de 20 à 30 mesures par jour.



PLAQUE DE 600 mm DE DIAMETRE
Fig. 50.08/2



DISPOSITIF DE MESURE DES DEFLECTIONS
Fig. 50.08/3a



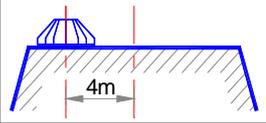
PIGE DE MESURE EN ACIER INOX
Fig. 50.08/3b

«50.08 - § 4.2 Exemple de feuille d'essai type»

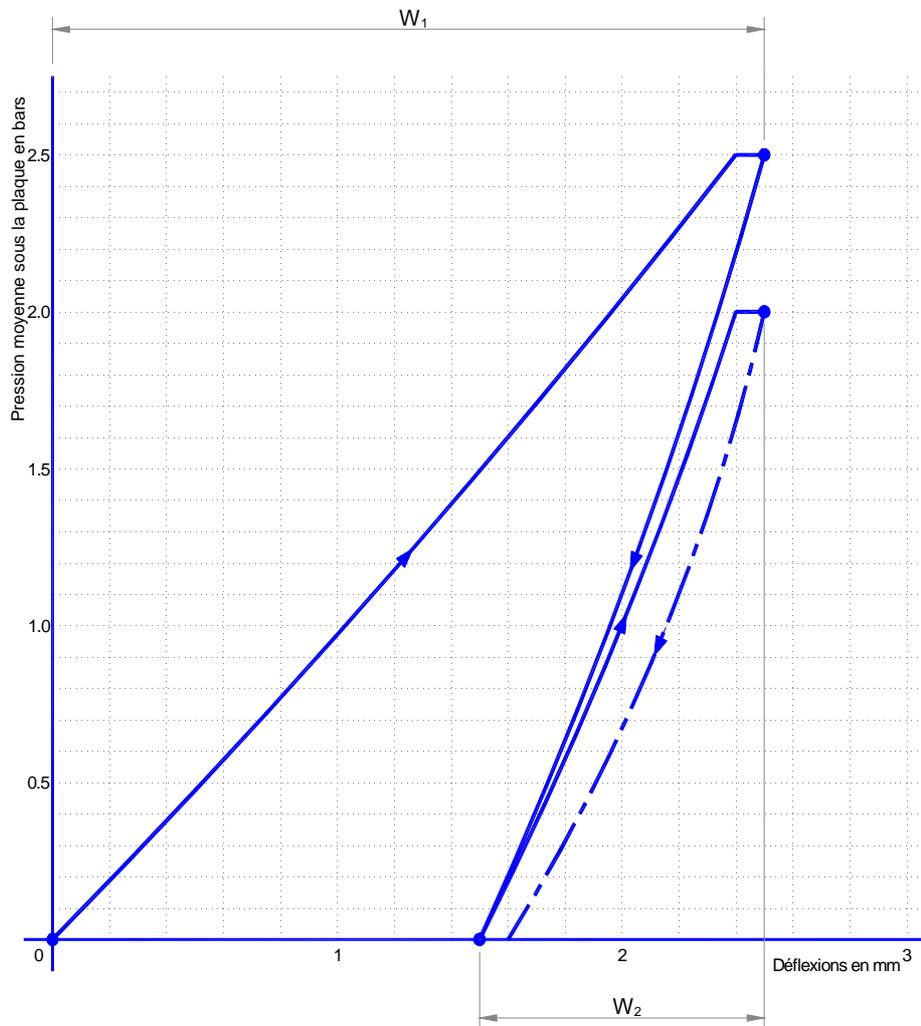
Mesure de la déformabilité d'une plate-forme par essai à la plaque

Laboratoire de :

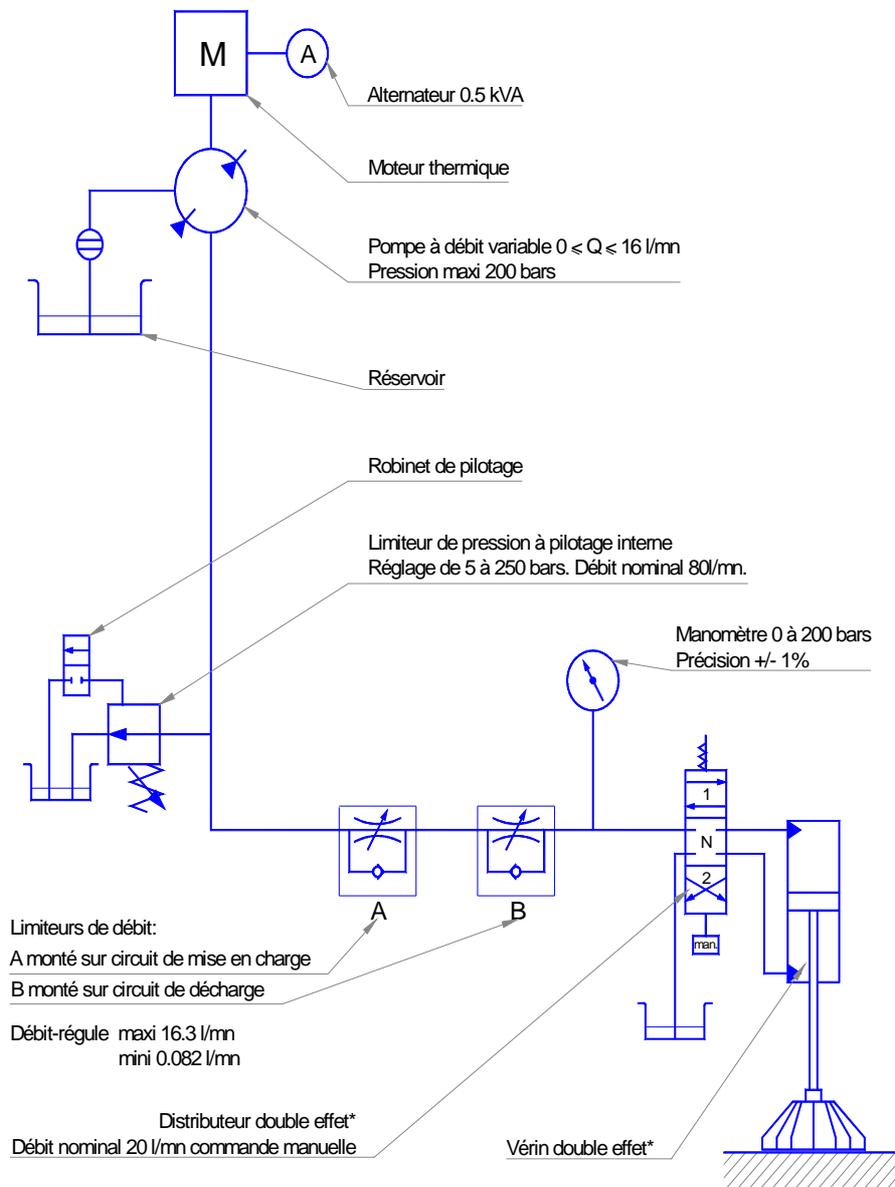
Essai n°:

Dossier :	Nature du matériau:	GL	P.k.n°7 Profil n°112 Essai réalisé à : 10m en aval du profil 112 			
Chantier :	Teneur en eau sous la plaque (1):	10 %				
Date :	Teneur en eau O.P.N. (1):					
Opérateurs :	Limites d'Atterberg (1): $W_L =$	$l_p =$				
Valeurs recommandées:		<table border="1"> <tr> <td>$Ev_1 >$</td> <td rowspan="2">$K <$</td> </tr> <tr> <td>$Ev_2 >$</td> </tr> </table>	$Ev_1 >$	$K <$	$Ev_2 >$	
$Ev_1 >$	$K <$					
$Ev_2 >$						
$W_1 = 2.5$	$Ev_1 = \frac{1125}{W_1} = 450$ bars	$K = \frac{Ev_2}{Ev_1} = 2$	CONCLUSIONS :			
$W_2 = 1.0$	$Ev_2 = \frac{900}{W_2} = 900$ bars					

(1) Eventuellement



Exemple de feuille d'essai



* Le principe "double effet" n'est utilisé que pour la remontée du piston en position "transport".
Pour le déchargement des plaques, c'est le poids du camion qui assure le circuit hydraulique inverse.

SCHEMA DE L'EQUIPEMENT HYDRAULIQUE ASSURANT LA MISE EN CHARGE
Fig. 50.08/5

50.09. DENSITOMETRE - **NOUVEAU**

50.10. MODULE D'ELASTICITE - NOUVEAU