

CONTRÔLE DU COMPACTAGE DES FOUILLES EN TRANCHÉE PAR PÉNÉTRMÈTRE DYNAMIQUE LÉGER

**Verdichtungskontrolle von Grabenauffüllungen mit einem leichten
dynamischen Penetrometer**

Rapport final

M. Dysli
Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL

Ph. Bombeli
Amsler & Bombeli S.A.
Bureau d'ingénieurs civils et de géotechnique
Chêne-Bougeries GE

**Mandat de recherche 30/96 sur la proposition de
l'Union des professionnels suisses de la route (VSS)**

Mai 2001

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ZUSAMMENFASSUNG	iv
SUMMARY	v
1. Mandat et objectifs	1
1.1 Mandat	3
1.2 Objectifs de la recherche	3
1.3 Phases de la recherche	4
2. Problématique	5
2.1 Introduction	7
2.2 Critères actuels de contrôle	7
2.2.1 Masse volumique	8
2.2.2 Module M_E ou E_V	8
2.2.3 Coefficient CBR	8
2.2.4 Inconvénients de ces méthodes pour les fouilles en tranchée	9
3. Les pénétromètres dynamiques	11
3.1 Contrôle par pénétromètres dynamiques légers	13
3.2 Pénétromètre dynamique à énergie constante	13
3.3 Pénétromètre dynamique à énergie variable	15
3.4 Différence entre le pénétromètre dynamique à énergie constante et celui à énergie variable	19
4. Enquête	21
4.1 Buts de l'enquête	23
4.2 Organisation de l'enquête	23
4.3 Résultats de l'enquête	24
4.4 Enseignements tirés de l'enquête	24
5. Possibilités des pénétromètres dynamiques légers pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée	29
5.1 Pénétromètre dynamique à énergie variable	31
5.1.2 Examen de 43 essais au PDL	31
5.1.3 Conclusion de l'examen des possibilités des pénétromètres dynamiques à énergie variable	31
5.2 Pénétromètre dynamique à énergie constante	33

6.	Développements internationaux et corrélations correspondantes	35
6.1	Remarques préliminaires sur les corrélations	37
6.2	France.....	37
6.2.1	Historique.....	37
6.2.2	Corrélations.....	37
6.2.3	Normalisation.....	38
6.2.4	Exemple d'un étalonnage.....	40
6.3	Angleterre.....	42
6.4	Etats Unis d'Amérique.....	42
6.5	Développement de l'usage du pénétromètre <i>PANDA</i>	42
7.	Corrélations de la littérature entre les résistances à la pénétration et des paramètres classiques de la mécanique des sols	43
7.1	Introduction.....	45
7.2	Pénétromètre statique.....	45
7.3	Pénétromètre CBR	46
7.4	SPT.....	46
7.5	Cohésion et résistance à la compression simple	46
7.6	Pressiomètre.....	46
8.	Essais réalisés dans le cadre de la recherche.....	47
8.1	Méthode	49
8.2	Masse volumique	54
8.3	Module M_E	56
8.4	Tentative de détermination d'un critère de qualification pour les graves.....	59
8.5	Application du critère provisoire à 3 pénétoigrammes caractéristiques.....	62
9.	Bases pour une normalisation en Suisse.....	65
9.1	Raison d'une normalisation	67
9.2	Normes proposées	67
9.3	Structure de la norme sur les valeurs de référence et l'étalonnage des matériaux	67
10.	Conclusions	69
	Symboles et abréviations	73
	Bibliographie	75
	Annexes A: Fiches d'essais « Possibilité ».....	A-1
	Annexes B :Fiches d'essais « Tentatives de corrélation ».....	B-1

RÉSUMÉ

Le contrôle du compactage des fouilles en tranchée a toujours été, pour les directions des travaux comme pour les entrepreneurs, un problème difficile. Le volume des matériaux mis en oeuvre est, en effet et en général, relativement faible et cette opération est ainsi très rapide. Des contrôles systématiques avec les moyens habituels (masse volumique, portance) sont ainsi difficiles à réaliser, coûteux et gênants pour l'entrepreneur.

Il existe nonobstant un autre moyen beaucoup plus intéressant. C'est le pénétromètre dynamique et notamment, depuis quelques années, un pénétromètre dynamique léger (PDL) facilement transportable et mis en oeuvre dans une fouille en tranchée. Ce pénétromètre permet un contrôle des remblais constitués de sols graveleux normalement compactés sur une épaisseur pouvant atteindre 4 m.

Le but de la recherche est de tenter de corréliser la résistance de pointe dynamique obtenue au moyen d'un pénétromètre dynamique avec les paramètres standards du contrôle du compactage des fouilles en tranchée fixés dans les cahiers des charges, à savoir : la masse volumique et la portance. La résistance de pointe pourra ainsi être proposée comme nouveau paramètre du contrôle du compactage et faire alors l'objet d'une nouvelle norme ou d'une modification de normes existantes.

Ce rapport :

- discute de la problématique du contrôle du compactage des remblais de fouilles en tranchée ;
- décrit les différents pénétromètres dynamiques pouvant être utilisés pour le contrôle du compactage ;
- présente les résultats d'une enquête menée en Suisse sur les moyens actuels utilisés pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée ;
- montre, par de nombreux résultats d'essais au PDL, que des profondeurs de plus de 3 mètres peuvent être atteintes avec le PDL dans des matériaux graveleux avec un diamètre maximal des grains de quelque 100 mm ;
- donne quelques corrélations, tirées de la littérature, entre la résistance dynamique de pointe et d'autres paramètres de la géotechnique ;
- décrit et analyse les résultats des essais systématiques réalisés dans des fouilles de la région genevoise, et propose un critère provisoire basé sur la résistance à la pénétration dynamique pour le contrôle du compactage de remblais constitués de graves I et II ;
- montre que la résistance dynamique de pointe ne peut être corrélée qu'avec la masse volumique ;
- donne les bases pour la rédaction d'une norme sur le contrôle du compactage réalisé avec un pénétromètre dynamique.

Ce nouveau moyen de contrôle permettra un contrôle systématique et rigoureux du compactage des fouilles en tranchée et évitera ainsi tous les défauts actuels de ce compactage, cause notamment de la destruction progressive des chaussées construites au-dessus des fouilles pour canalisations.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Verdichtungskontrolle von Grabenauffüllungen war und bleibt eine schwierige Aufgabe für Bauleitungen und Unternehmer, da das Schüttvolumen meistens klein und die Schüttkampagne kurz sind. Die systematischen Kontrollen nach den üblichen Methoden (Dichte, Tragfähigkeit) sind nur schwer durchführbar und kostspielig und behindern oft den Unternehmer.

Seit einigen Jahren bietet der Markt eine viel interessantere Einrichtung um die Qualität der Schüttung zu prüfen. Es handelt um eine besonders leichte Rammsonde, die leicht transportiert und in den engen Leitungsgräben eingesetzt werden kann. Diese Sonde erlaubt, Auffüllungen mit normal verdichteten, kiesigen Materialien bis zu 4 Meter Schütthöhe zu prüfen.

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war es, den Zusammenhang zwischen dem mit der leichten Rammsonde ermittelten Spitzenwiderstand mit den vertraglichen, im Pflichtenheft festgelegten Qualitätswerten wie Dichte und Tragfähigkeit, zu ermitteln. Der Spitzenwiderstand kann somit als neuer Wert für die Verdichtungskontrolle festgelegt werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, eine neue Norm einzuführen oder die bestehenden Normen zu revidieren.

Dieser Bericht :

- Untersucht die Problematik der Qualitätsprüfung von Grabenauffüllungen.
- Beschreibt die verschiedenen Rammsonden, die für die Qualitätskontrollen eingesetzt werden können.
- Gibt die Resultate einer Umfrage über die in der Schweiz für Grabenauffüllungskontrollen gebrauchten Methoden.
- Zeigt an Hand vieler Versuchsergebnisse, dass die leichte, tragbare Rammsonde in Kiesmaterial bis zu einem Korndurchmesser von 100 mm mit Erfolg eingesetzt werden kann.
- Gibt einige Zusammenhänge zwischen dem Spitzenwiderstand und den anderen Kennwerten der Geotechnik aus der Literatur an.
- Beschreibt und analysiert die Resultate der in der Region von Genf durchgeführten systematischen Versuchen und schlägt ein provisorisches, auf dem Spitzenwiderstand basierendes Kriterium für die Einbaukontrollen von Grabenauffüllungen mit Kiessand I und II vor.
- Zeigt, dass der Spitzenwiderstand nur mit der Dichte korreliert werden kann.
- Liefert die Grundzüge für die Redaktion einer neuen Norm über die Einbaukontrollen mit einer Rammsonde.

Die neue Methode wird erlauben, eine systematische und strenge Verdichtungskontrolle von Grabenauffüllungen durchzuführen. Weiterhin wird die Methode erlauben, alle progressiven Strassenschäden zu vermeiden, die von einer mangelnden Verdichtung von Grabenauffüllungen herrühren.

SUMMARY

Compaction control for trenchworks has always been a difficult problem for those in charge of construction supervision, as well as for contractors. The volume of material placed is generally relatively limited and, so, this operation is very quick. Systematic checks using standard methods (density, bearing capacity) are, therefore, difficult to carry out, costly and annoying for the contractor.

Nevertheless, another, much more interesting, method exists. This is the dynamic penetrometer and notably, over the last several years, an ultralight dynamic penetrometer (DPL), which is easily transported and used in trenchworks. This penetrometer permits the control of fills made up of normally compacted gravely soils up to depths of 4 m.

The aim of this research is to try to correlate the dynamic penetration resistance of the cone obtained using a dynamic penetrometer with standard trenchwork compaction control parameters given in work specifications, i.e.: density and the bearing capacity. The cone resistance can, therefore, be proposed as a new compaction control parameter and, thus, be the subject of a new standard or of a modification of existing standards.

This report :

- discusses the problems of compaction control for trenchwork fills ;
- describes the different dynamic penetrometers, which may be used for compaction control ;
- presents the results of a survey carried out in Switzerland of the methods currently used for compaction control of trenchworks ;
- shows, using numerous DPL test results, that depths greater than 3m may be reached with DPL's in gravely soils with a maximum grain diameter of several hundred millimetres ;
- gives correlations, taken from the literature, between the dynamic penetration resistance of the cone and other geotechnical parameters ;
- describes and analyses the results of systematic tests carried out in trenchworks in the region around Geneva and proposes a provisional criterion based on the dynamic penetration resistance for the compaction control of fills made up of gravel-sand I and II ;
- shows that the dynamic penetration resistance of the cone can only be correlated with density ;
- gives the bases for the preparation of a standard for compaction control using a dynamic penetrometer.

This new control method permits a systematic and rigorous control of the compaction of trenchworks and thus avoids all of the current faults of this compaction which causes, notably, the progressive destruction of pavements constructed above trenches for canalisations.

1. Mandat et objectifs

1.1 Mandat

Par sa lettre du 13 novembre 1996, et après examen de la requête de la Commission 272 de la VSS (aujourd'hui remplacée par la Commission technique 5), l'Office fédéral des routes (OFROU) a décidé que :

1. Amsler et Bombeli S.A., Bureau d'ingénieurs civils et de géotechnique, rue de Chêne-Bougeries 31, le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPF Lausanne et le Département des travaux publics et de l'énergie de la République et Canton de Genève se proposent de corrélérer les résultats obtenus au moyen des nouveaux pénétromètres légers, utilisant une mesure de la vitesse (ou de l'accélération) de la pénétration, avec les paramètres standards du contrôle du compactage, à savoir et surtout : le module M_E et la masse volumique, ceci essentiellement dans le cas du contrôle du compactage de fouilles en tranchée.
2. Ces travaux de recherche sont évalués à 90'000 francs, montant pour lequel une subvention de 100 % est assurée. Une première tranche de crédit de 30'000 francs au maximum a été accordée lors de l'attribution du mandat.
2 % de cette somme sont réservés à la VSS (administration du mandat).
3. Un rapport intermédiaire doit être livré pour obtenir une tranche de crédit supplémentaire.
4. La Commission technique 5 de la VSS est chargée de la surveillance de ce mandat.

Une demande expresse de la Commission fédérale de recherche en matière de routes n'a pas été formulée dans la lettre de l'OFROU. Elle est la raison de la demande de rédaction d'un rapport intermédiaire. Dans ce rapport, les mandants doivent prouver qu'un pénétromètre dynamique léger (PDL) peut être enfoncé de plusieurs mètres dans les matériaux traditionnels de remblayage des fouilles en tranchée (grave II, $\varnothing_{\max} = \text{env. } 100 \text{ mm}$ par exemple). La recherche devait être interrompue si ce n'était pas le cas.

Enfin, le Département des travaux publics et de l'énergie de la République et Canton de Genève n'étant pas intervenu durant la recherche, son nom a été supprimé de la page de titre du présent rapport.

1.2 Objectifs de la recherche

Le but de la recherche est de tenter de corrélérer les résistances de pointe obtenues avec un pénétromètre dynamique léger, à énergie constante ou variable, décrit au chapitre 3, avec les paramètres standards du contrôle du compactage des fouilles en tranchée fixés dans les cahiers des charges, à savoir : la masse volumique et la portance (M_E ou coefficient CBR). En outre, comme les corrélations ne peuvent être qu'approximatives, une méthode pour la détermination d'un critère précis sera proposée en vue de sa normalisation.

En première phase, la possibilité d'enfoncer le PDL sur plusieurs mètres de profondeur dans les matériaux de remblayage des fouilles en tranchée doit être démontrée, et une enquête sur les

moyens utilisés en Suisse pour le contrôle du compactage de ces remblayages doit être entreprise.

La résistance de pointe dynamique sera proposée comme nouveau paramètre du contrôle du compactage et fera alors l'objet d'une nouvelle norme et/ou d'une modification des normes existantes, en particulier les normes SN 670 585a « Compactage, exigences » et SN 670 586 « Compactage, méthodes de contrôle ».

1.3 Phases de la recherche

La recherche sera menée selon la démarche suivante :

- A Démonstration des possibilités du PDL par exploitation de la banque de données de Amsler & Bombeli S.A.
- B Enquête sur les moyens utilisés en Suisse pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée.
- C Etude bibliographique des PDL existants et des relations connues, pour ces derniers, entre la résistance de pointe dynamique et d'autres paramètres géotechniques.
Les nombreuses corrélations existant entre certaines caractéristiques des sols et les résultats obtenus avec les pénétromètres dynamiques et statiques classiques seront prises en compte.
- D Exploitation de la banque de données de Amsler & Bombeli S.A. pour établir les premières corrélations entre les paramètres standards du contrôle du compactage (voire d'autres paramètres classiques de la mécanique des sols) et les résistances de pointe.
- E En collaboration avec le Département des travaux publics et de l'énergie de la République et Canton de Genève ou d'autres maîtres d'ouvrages, essais in situ dans des fouilles en tranchée avec, si possible, différents types de matériaux de remblayage. Ces essais comprendront :
 - au fur et à mesure du remblayage et du compactage, des essais de plaque M_E , des mesures de la masse volumique au moyen d'un nucléomètre et des prélèvements d'échantillons pour des essais en laboratoire ;
 - puis, le remblayage terminé, des contrôles au moyen du PDL.
- F Exploitation des résultats des essais in situ pour établir des corrélations entre les paramètres standards du contrôle du compactage (voire d'autres paramètres classiques de la mécanique des sols) et les résistances de pointe.
- G Etude :
 - d'une méthode permettant de déterminer un critère précis pour l'usage du PDL comme moyen de contrôle contractuel ;
 - des moyens d'intégration dans les normes existantes ou dans une nouvelle norme du contrôle de compactage des fouilles en tranchée au moyen de PDL.
- H Rédaction du rapport final.

2. Problématique

2.1 Introduction

Le contrôle du compactage des fouilles en tranchée a toujours été, pour les directions des travaux comme pour les entrepreneurs, un problème difficile. Le volume des matériaux mis en œuvre est, en effet et en général, relativement faible et cette opération est ainsi très rapide. Des contrôles systématiques du compactage avec les moyens habituels sont ainsi difficiles à réaliser, coûteux et gênants pour l'entrepreneur. Ils sont cependant très importants car un mauvais compactage des matériaux de remblai des fouilles en tranchée peut avoir des conséquences fâcheuses, notamment sur le plan économique, pour les structures fondées au-dessus d'une fouille. C'est surtout le cas des superstructures routières, pour lesquelles les exemples d'effets défavorables d'un mauvais compactage de fouilles sont innombrables.

La figure 2.1 schématise l'effet d'un mauvais compactage de fouille en tranchée sur une superstructure routière.

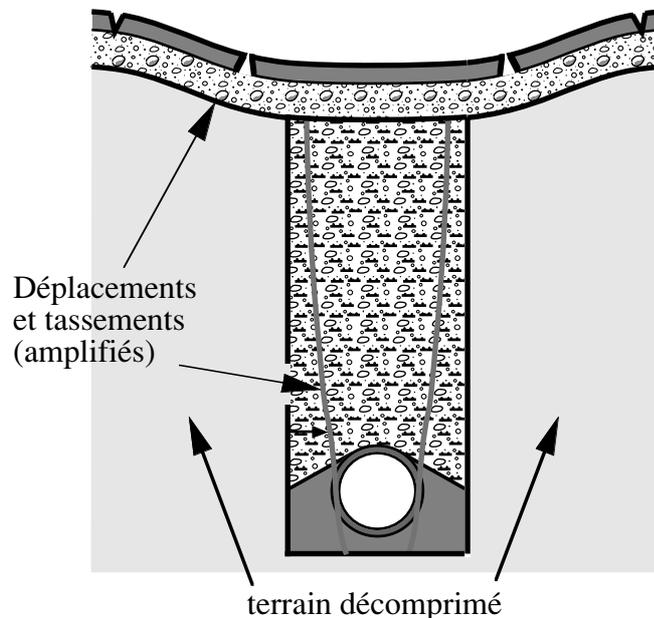


Fig. 2.1 Effet d'un mauvais compactage d'une fouille en tranchée

2.2 Critères actuels de contrôle

En Suisse, en matière de contrôle du compactage des fouilles en tranchée, la norme SN 670 535b « Fouilles en tranchée, prescriptions d'exécution » renvoie le lecteur aux normes SN 670 585a « Compactage, exigences » et SN 670 586 « Compactage, méthodes de contrôle ». Ces deux dernières normes prescrivent comme paramètres de contrôle la masse volumique du sol, le module M_E (ou le module E_v) et le coefficient CBR .

2.2.1 Masse volumique

La masse volumique du sol (ρ ou ρ_d , voire γ ou γ_d), mesurée in situ par une méthode ou une autre, est comparée avec celle correspondant à l'optimum Proctor. On demande par exemple, dans le cahier des charges, que les valeurs mesurées in situ soient égales ou supérieures au 95% de l'optimum Proctor. Un ou des essais de compaction Proctor doivent ainsi être réalisés avant les contrôles sur les matériaux à utiliser comme remblais.

Comme méthodes de mesure, on peut utiliser :

- la méthode du sable ou du ballon,
- le prélèvement d'échantillons non remaniés et la mesure de la masse volumique en laboratoire,
- l'appareil à isotopes.

La méthode du sable ou du ballon est aujourd'hui un peu obsolète et n'est utilisée que dans des cas particuliers. Le prélèvement d'échantillons non remaniés et la mesure en laboratoire de la masse volumique ne conviennent que pour des sols fins pourvus d'une certaine cohésion.

La méthode aujourd'hui la plus utilisée pour le contrôle du compactage de remblais est la mesure de la masse volumique au moyen d'un appareil à isotopes. Avec les appareils du commerce actuels, la teneur en eau est mesurée en même temps que la masse volumique.

2.2.2 Module M_E ou E_v

Le module M_E et le module E_v , sont des modules de déformation obtenus par un essai de plaque exécuté, en Suisse, selon les normes SN 670 312 et SN 670 317. Les valeurs minimales du module M_E à obtenir sur le chantier sont fixées dans les normes en fonction de la couche sur laquelle est exécuté l'essai (terrain et infrastructure, couche de fondation et couche de base). Le module E_v , est, quant à lui, valable pour toutes les couches.

Il n'y a donc pas d'essais préalables à réaliser avant l'exécution de l'ouvrage.

2.2.3 Coefficient CBR

Le coefficient CBR est avant tout utilisé pour évaluer la portance d'une couche de fondation.

In situ, le pénétromètre utilisé en Suisse pour la détermination de la portance d'une couche de sols, voire de son compactage, est le pénétromètre statique CBR (fig. 2.2). Il ne peut être employé que dans des sols fins ($CBR \leq 15\%$). Il est décrit par la norme SN 670 316.

Le remblayage d'une fouille en tranchée par un sol fin, par exemple avec le sol excavé, est possible. Dans ce cas, un critère de compactage basé sur la valeur CBR obtenue avec ce pénétromètre est envisageable.

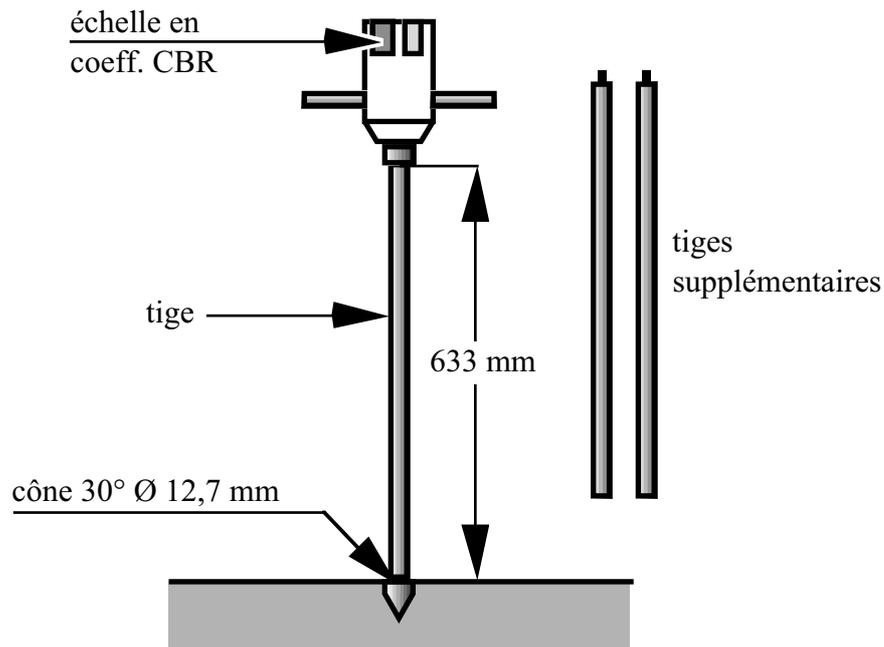


Fig. 2.2 Pénétrmètre CBR

2.2.4 Inconvénients de ces méthodes pour les fouilles en tranchée

Toutes ces méthodes de contrôle ont des inconvénients pour les fouilles en tranchée :

- Les méthodes du sable et du ballon sont aujourd'hui obsolètes, car elles sont trop longues à réaliser et ne permettent un contrôle que sur une épaisseur de quelque 30 cm.
- Les appareils à isotopes (nucléomètres) permettent une mesure plus rapide, mais ils ont aussi l'inconvénient de ne permettre un contrôle que sur une épaisseur restreinte.
- Un essai M_E exécuté dans une fouille est très difficile à réaliser et ne se fait pour ainsi dire jamais. Seul un essai à la surface supérieure du remblayage peut être envisagé mais, comme pour la mesure de la masse ou du poids volumique, son résultat ne concerne qu'une épaisseur de quelque 30 cm.
- Le pénétromètre CBR est, en principe, plus intéressant ; c'est un pénétromètre statique, étalonné en coefficients CBR et enfoncé à la main dans le sol. Il permet un contrôle sur une épaisseur plus importante que celle autorisée par les autres essais déjà énumérés. Il ne convient cependant que pour des sols de faible résistance au poinçonnement, à savoir des sols limono-argileux sans trop de blocs ($CBR_{max} = 15\%$). Dans de tels sols, un contrôle sur une épaisseur jusqu'à un mètre est envisageable.

3. Les pénétromètres dynamiques

3.1 Contrôle par pénétromètres dynamiques légers

Comme démontré sous 2.2, un contrôle efficace et peu coûteux du compactage des fouilles en tranchée n'est pas chose facile. Il existe nonobstant un moyen beaucoup plus intéressant que les contrôles par essais de plaque ou par densimètre. C'est le pénétromètre dynamique léger.

Dans ce rapport de recherche, on entend par pénétromètre dynamique léger (PDL) un pénétromètre dynamique facilement transportable et mis en place dans une fouille en remblayage pour le contrôle de son compactage. Ce type de pénétromètre peut aussi, bien entendu, être utilisé pour d'autres contrôles ou reconnaissances, mais ces derniers ne sont pas traités par cette recherche.

On distingue deux types de ces pénétromètres, types définis par le moyen de produire l'énergie nécessaire à l'enfoncement de la tige dans le sol :

- les pénétromètres dynamiques à énergie constante et
- les pénétromètres dynamiques à énergie variable.

3.2 Pénétromètre dynamique à énergie constante

L'essai a pour principe d'enfoncer dans le sol, par battage au moyen d'un mouton d'une masse donnée tombant d'une hauteur constante, un train de tiges pourvu d'une pointe à son extrémité. C'est le pénétromètre dynamique classique, dont il existe de nombreuses variantes (fig. 3.1).

Pour chaque coup donné par la masse tombante d'une hauteur constante, on mesure la pénétration de la tige dans le sol, ce qui permet de calculer la résistance de pointe dynamique par une formule comme celle des Hollandais :

$$q_d = \frac{M \cdot g \cdot h}{A \cdot e} \cdot \frac{M}{M + P} \quad (3.1)$$

avec (les dimensions sont données comme exemple ; d'autres sont possibles) :

q_d = résistance de pointe dynamique [Pa]

M = masse frappante (mouton) [kg]

P = masse morte entraînée (enclume, tiges, pointe, capteur, etc.) [kg]

g = accélération de la pesanteur [$m \cdot s^{-2}$]

h = hauteur de chute [m]

A = section de la pointe [m^2]

e = pénétration moyenne pour un coup de la masse frappante [m].

La résistance de pointe q_d doit, en principe, être corrigée par la déduction du frottement latéral du cône. Cela se fait en mesurant la résistance au rebattage. Cependant, pour un contrôle du compactage réalisé par battage sur seulement quelques mètres, cette correction n'est pas nécessaire.

En Suisse, le pénétromètre dynamique à énergie constante le plus utilisé est le pénétromètre von Moos. Il fait l'objet de la norme SN 670 417. Il peut très bien être utilisé sans chèvre et ainsi

être employé avantageusement pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée (fig. 3.2). Un mouton automatique à air comprimé est alors conseillé.

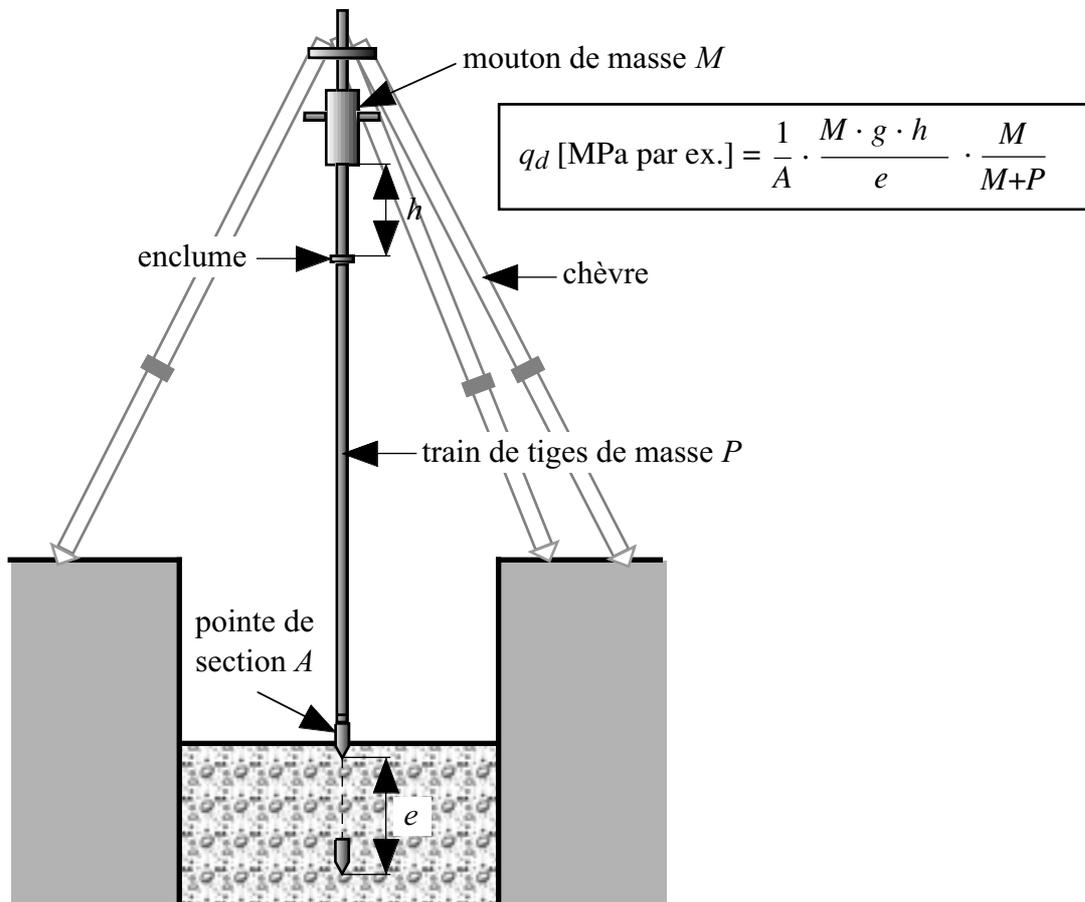


Fig. 3.1 Principe du pénétromètre dynamique à énergie constante (von Moos)

Fig. 3.2 Pénétromètre von Moos utilisé sans chèvre avec un mouton à air comprimé.

Masse mouton = 30 kg

Hauteur chute = 20 cm.



3.3 Pénétrmètre dynamique à énergie variable

L'essai a pour principe d'enfoncer dans le sol, par battage manuel à l'aide d'un marteau normalisé, un train de tiges pourvu d'une pointe à son extrémité. Pour chaque coup donné, un capteur mesure la vitesse du marteau de masse connue au moment de l'impact, ce qui permet de calculer la résistance de pointe dynamique par une formule du même type que celle des Hollandais (3.1).

Avec le pénétromètre à énergie variable, l'énergie d'enfoncement (Mgh) est variable et la mesure de la hauteur de chute du mouton est remplacée par celle de la vitesse de la masse frappante. Le terme Mgh de la formule (3.1) devient alors $1/2 \cdot Mv^2$ avec v = vitesse de la masse frappante [$m \cdot s^{-1}$]. v est mesurée par un capteur solidaire des tiges.

Un autre capteur mesure, dans le même temps, l'enfoncement de la pointe. Ces deux informations sont traitées et enregistrées par un petit ordinateur portable (Fig. 3.3).

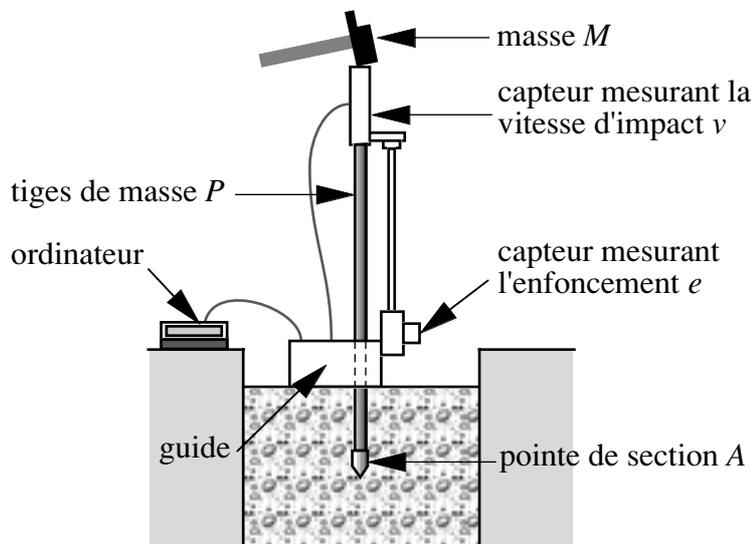


Fig. 3.3 Principe du pénétromètre dynamique à énergie variable

La résistance dynamique au battage de ce pénétromètre s'établit avec la relation suivante :

$$q_d = \frac{1/2(M \cdot v^2)}{A \cdot e} \cdot \frac{M}{M + P} \quad (3.2)$$

Les symboles de cette formule sont définis sur la figure 3.3.

Le pénétromètre dynamique à énergie variable utilisé dans cette recherche est le pénétromètre français *PANDA*. C'est un pénétromètre dynamique peu coûteux, très facile à mettre en œuvre dans une fouille en tranchée et dont l'électronique associée délivre instantanément un résultat. Il permet *un contrôle dans des sols graveleux normalement compactés sur une épaisseur pouvant atteindre 4 m.*

Il ne peut être utilisé que dans des sols sans trop de cohésion, car, notamment, ni le frottement latéral du train de tiges, ni le rebond élastique ne sont mesurés.

La figure 3.4 montre un exemple de résultats obtenus avec un de ces pénétromètres. Elle suggère aussi la problématique de cette méthode de contrôle. Le paramètre qu'elle délivre est une résistance de pointe dynamique qui n'est pas utilisée jusqu'à présent en Suisse comme paramètre standard du contrôle du compactage. Il est donc difficile aujourd'hui d'utiliser pleinement ce nouveau moyen très prometteur. Certains organismes publics suisses commencent cependant à l'utiliser pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée.

Signalons à son propos qu'il peut être utilisé avec un mouton automatique à air comprimé. Il devient alors quasiment un pénétromètre à énergie constante !

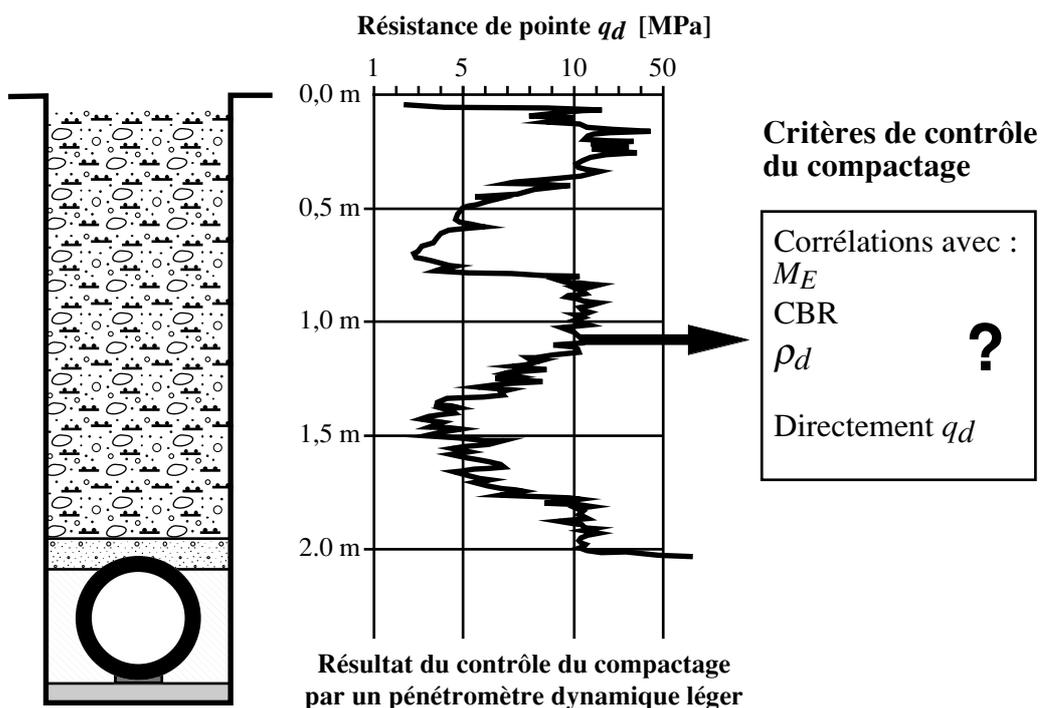


Fig. 3.4 Résultats et problématique du contrôle du compactage d'une fouille en tranchée par un PDL

Dans un milieu granulaire *homogène compacté de façon uniforme* (masse volumique et teneur en eau homogènes – compactage par exemple au moyen d'une presse), dans l'espace $\log_{10} q_d$ – profondeur, le diagramme de battage peut être divisé en deux parties (fig. 3.5) :

- La partie supérieure, où la résistance à la pénétration est fonction de la profondeur. Sa profondeur z_c (profondeur critique) peut atteindre 40 cm et est fonction surtout de la granulométrie du remblai et de sa compacité. La résistance au niveau zéro est dénommée q_{d0} . Dans cette zone, le contrôle du compactage par le pénétromètre dynamique est quasiment impossible.
- La partie inférieure, où la résistance à la pénétration est approximativement constante et où sa moyenne est définie par la valeur q_{d1} .

La décomposition du diagramme de battage en deux parties, et notamment la grande profondeur (jusqu'à 0,6 m) de la variation linéaire avec la profondeur de la résistance à la pénétration, est difficilement explicable. En particulier, la partie droite de la figure 3.5 montre que, pour une pointe de 4 cm², la profondeur du bulbe de cisaillement n'est que d'environ 10 cm. Au-delà de cette profondeur et à première vue, rien ne peut expliquer une augmentation de la résistance à la pénétration en fonction de la profondeur. Il faut noter que l'allure du pénétrogramme de la figure 3.5 a été obtenue dans un moule (fig. 6.3) où le compactage avait été réalisé au moyen d'une presse agissant sur un piston.

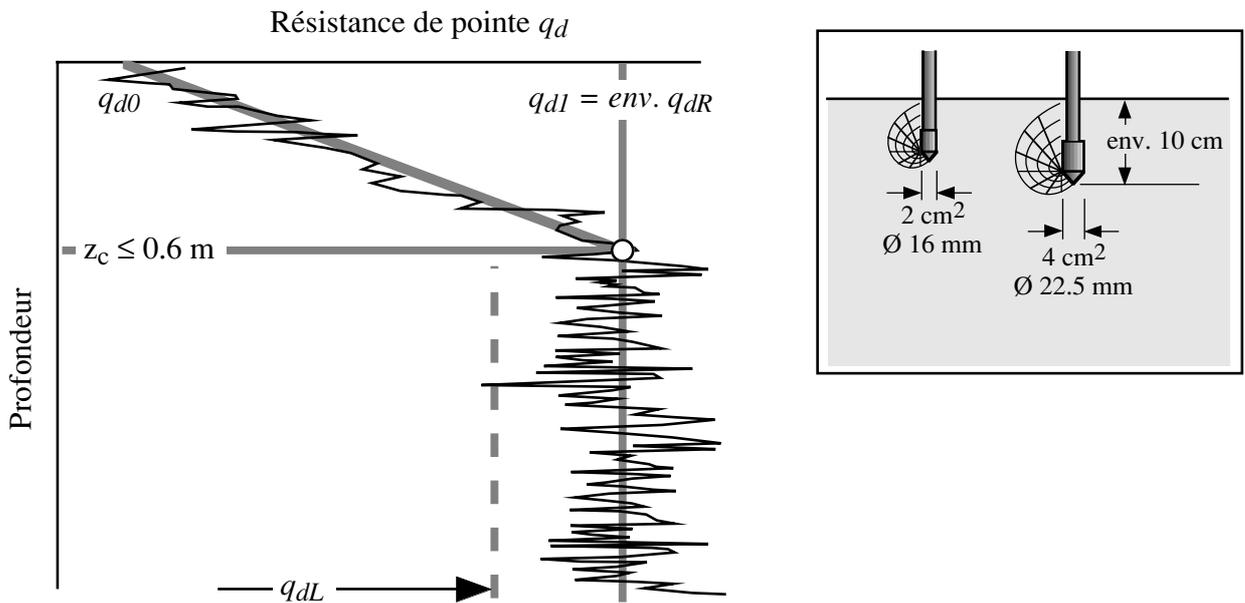


Fig. 3.5 Diagramme de battage du pénétromètre dynamique à énergie variable pour un sol parfaitement homogène (ρ_d et $w = \text{cte}$)

q_{d0} = résistance en surface, q_{d1} = résistance en profondeur, z_c = profondeur critique,
 q_{dR} = valeur de référence de la résistance à la pénétration (= env. q_{d1} mais peut tenir compte d'anomalies),
 q_{dL} = valeur limite (contractuelle) de la résistance

L'allure de la partie supérieure du graphique de la figure 3.5 ne se retrouve pas dans les sols compactés par couches au moyen, par exemple, d'une pilonneuse ou d'un compacteur vibrant agissant à la surface de la couche. Dans ce cas, le pénétrogramme a l'allure de celui de la figure 3.6. C'est le cas général de tous les remblais compactés constitués de sols grossiers comme les graves I et II selon SN 670 120. Comme déjà signalé plus haut, cette différence n'est pas facile à expliquer. L'inventeur du pénétromètre à énergie variable *PANDA*, à savoir R. Gourvès du Centre Universitaire de Sciences et Techniques (CUST) de l'université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand, propose l'explication schématisée par la figure 3.7.

Le principe du contrôle du compactage au pénétromètre repose sur la détermination d'une valeur limite de q_{dL} qui doit être inférieure à la valeur moyenne mesurée.

La résistance au battage avec un pénétromètre dynamique est très sensible à la masse volumique du sol sec. Cet instrument est donc bien adapté à la détection d'insuffisance du compactage comme au repérage de l'épaisseur de couches de compacité différente.

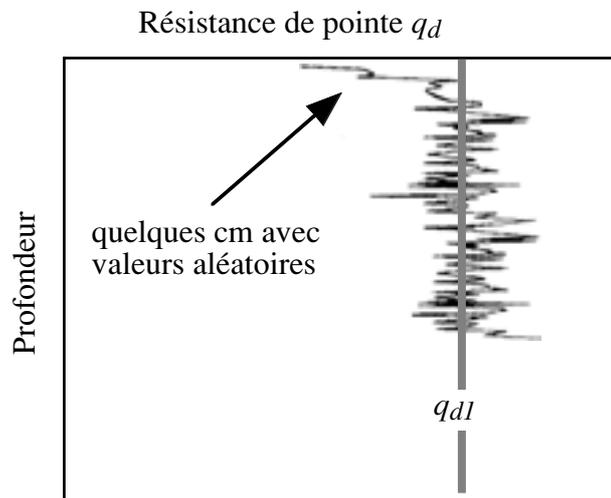


Fig. 3.6 Diagramme de battage du pénétromètre dynamique à énergie variable pour un sol compacté par couches au moyen d'un engin de compactage.

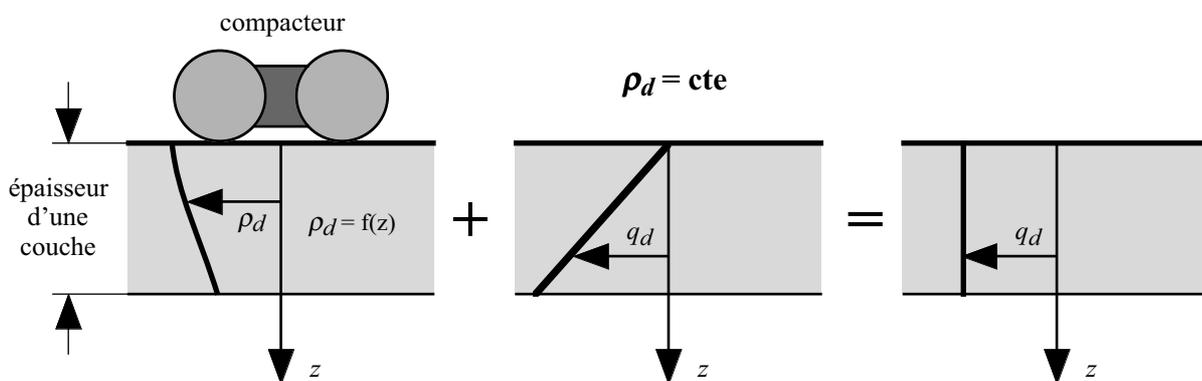


Fig. 3.7 Tentative d'explication de la différence dans l'allure des pénétrographes entre un sol compacté par compression et un sol compacté par un engin de compactage.

3.4 Différence entre le pénétromètre dynamique à énergie constante et celui à énergie variable

Le pénétromètre dynamique à énergie constante est un pénétromètre dynamique à énergie variable pour lequel chaque coup de marteau a une énergie constante ! Par exemple, le pénétromètre *PANDA* (à énergie variable) peut être équipé d'un mouton automatique à air comprimé qui produit des coups à énergie constante.

Si l'on compare le pénétromètre dynamique à énergie variable *PANDA* avec le pénétromètre à énergie constante von Moos (mouton = 30 kg, hauteur chute = 20 cm), ainsi qu'avec d'autres pénétromètres comme les DPM (Dynamic Probing Medium, mouton = 30 kg, hauteur de chute = 50 cm) ou les DPH (Dynamic Probing Heavy, mouton = 50 kg, hauteur de chute = 50 cm), la grande différence est dans l'énergie produite par chaque coup du mouton. Pour ces pénétromètres, elle est beaucoup plus importante que celle produite par un coup de marteau du *PANDA*.

En quelque sorte, le pénétromètre « lourd » à énergie constante fait la moyenne des résistances à la pénétration sur la profondeur de mesure du nombre de coups, par exemple 20 cm pour le pénétromètre von Moos (fig. 3.8).

La relation entre la résistance dynamique au battage q_d et le nombre de coups pour un enfoncement constant donné (20 cm pour le pénétromètre von Moos) s'établit théoriquement avec la relation (3.1), en sachant que la pénétration moyenne $e = x / N_x$, avec x = enfoncement de mesure du nombre de coups et N_x = nombre de coups pour un enfoncement de x (N_{M20} pour le pénétromètre von Moos, M venant de Moos). Pour le pénétromètre von Moos (mouton = 30 kg, hauteur de chute = 0,2 m, section de la pointe = 10 cm²), cette relation est la suivante :

$$q_d \text{ [kPa]} = \frac{M}{M + P} \cdot 295 \cdot N_{M20} \quad (3.3)$$

En admettant que $M / (M + P) =$ environ 0,75, alors :

$$q_d \text{ [kPa]} \approx 220 \cdot N_{M20} \quad (3.4)$$

avec :

q_d = résistance de pointe dynamique

M = masse frappante (mouton)

P = masse morte entraînée (enclume, tiges, pointe, capteur, etc.).

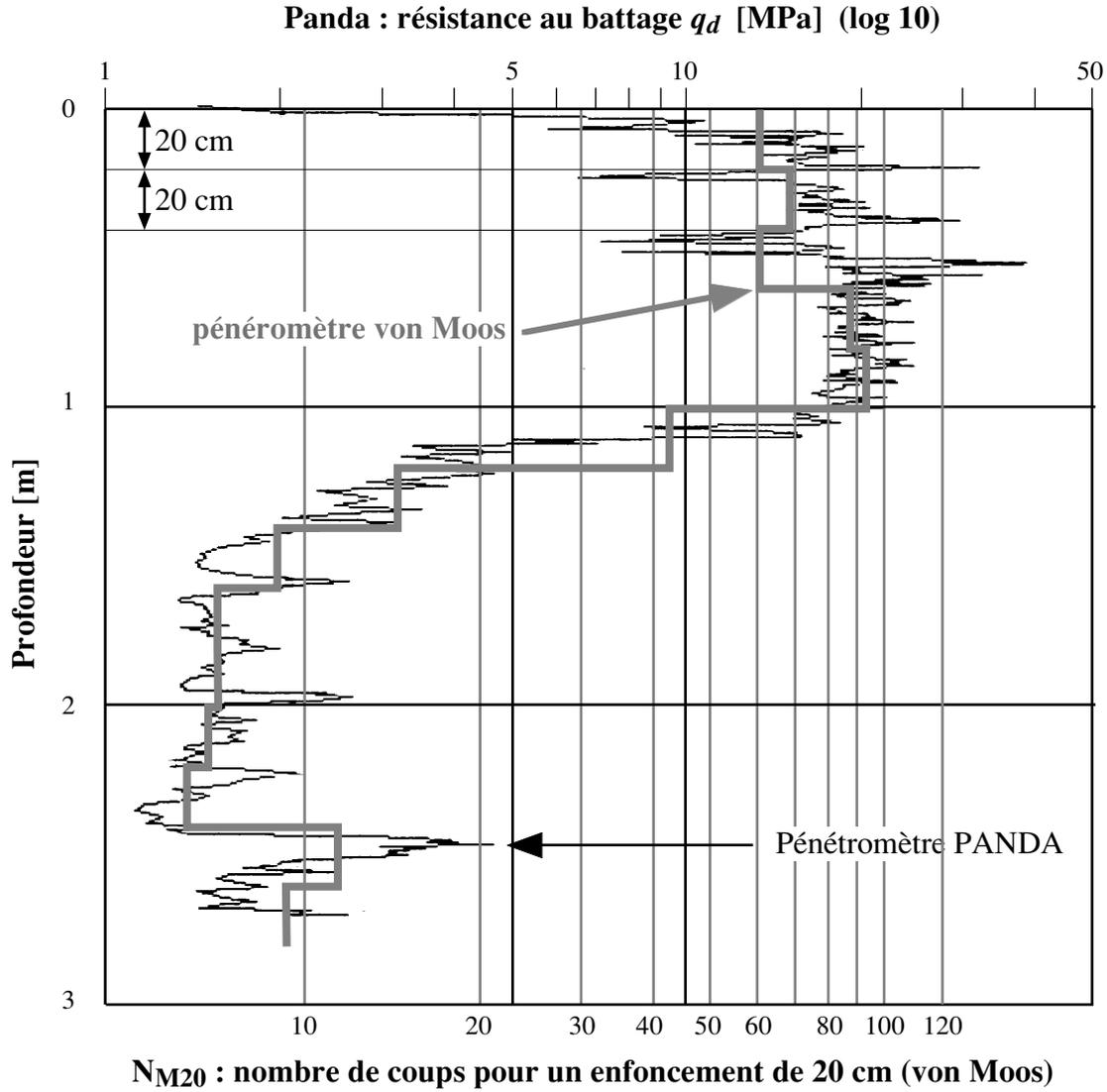


Fig. 3.8 Comparaison des diagrammes du pénétromètre dynamique à énergie constante et à énergie variable.

La relation entre le q_d du pénétromètre à énergie variable (Panda) et le N_{M20} (von Moos) est approximative :

relation 3.4

4. Enquête

4.1 Buts de l'enquête

L'enquête avait pour but de connaître en détail les moyens de contrôle du compactage des fouilles en tranchée utilisés en Suisse par les Directions des travaux, qu'elles soient celles des Maîtres de l'ouvrage ou celles des entreprises réalisant les travaux. Elle devait en particulier nous montrer si des méthodes permettant un contrôle sur toute la profondeur de la fouille étaient utilisées.

4.2 Organisation de l'enquête

Un formulaire d'enquête bilingue (français et allemand) a été envoyé à quelque 190 administrations publiques (Confédération, cantons et certaines communes), bureaux d'étude et entreprises du génie civil. 86 questionnaires dûment remplis ont été renvoyés, ce qui est un succès. La forme du questionnaire fait l'objet de la figure 4.1.

A envoyer à: Laboratoire de mécanique des sols
de l'EPFL
EPF-Ecublens
1015 LAUSANNE
Attn: M. Dysli

Ou faxer au 021 693 41 53

Contrôle du compactage des fouilles en tranchée
QUESTIONNAIRE Date:

Raison sociale:

Adresse:

Nom de la personne ayant rempli ce questionnaire:

No de téléphone de cette personne:

No fax de cette personne:

1. Quelles méthodes utilisez-vous pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée?

	Cochez
Masse volumique du sol par rapport à l'optimum Proctor, méthode du sable ou du ballon	<input type="checkbox"/>
Masse volumique du sol par rapport à l'optimum Proctor, appareil à isotopes	<input type="checkbox"/>
Essai M _E	<input type="checkbox"/>
Poinçon CBR	<input type="checkbox"/>
Autre méthode (la décrire brièvement):	<input type="checkbox"/>

Nombre de contrôles par année (par n'importe quelle méthode):

2. Utilisez-vous déjà un pénétromètre pour ce contrôle? oui non

3. Si oui, quel est sa marque et son type:

Marque:

Type:

Deutsch auf der Rückseite

Fig. 4.1 Questionnaire de l'enquête (français)

4.3 Résultats de l'enquête

Les résultats détaillés de l'enquête font l'objet du tableau décomposé sur les figures. 4.3 à 4.5. Ces résultats détaillés sont résumés sur la figure 4.2 (tableau).

Méthode de contrôle utilisée	Nbre d'utilisation	Type pour méthodes « Pénétromètre » et « Autre » (x) = nbre si > 1
Masse volumique (toute méthode)	26 (21 %)	
Essai de plaque M _E	74 (61 %)	
Pénétromètre	8 (7 %)	Bevac (2), Sedidril, Strassentest, Pard, von Moos (2), CBR Farnell (2), Panda (2)
Poinçon CBR	5 (4 %)	
Autre	8 (7 %)	Proof rolling (3), visuel (5)

Fig. 4.2 Résumé des résultats de l'enquête

4.4 Enseignements tirés de l'enquête

La majorité des réponses (61 %) indique l'essai M_E comme moyen de contrôle. Cela signifie que seuls les 30 à 50 cm supérieurs du remblai sont contrôlés à la fin des opérations de remblayage. L'exécution d'un essai M_E pendant le remblayage n'est pas impossible ; elle est cependant très compliquée et coûteuse, et il est fort probable qu'elle n'est jamais réalisée en Suisse.

Ensuite, c'est la mesure de la masse volumique qui est la plus utilisée (21 %). La forme du questionnaire ne permet pas de savoir si des mesures de la masse volumique pendant le remblayage et à diverses profondeurs ont été réalisées. Ce type de mesure est tout à fait possible et n'est pas plus compliqué que la mesure de surface. Il demande cependant plusieurs interruptions des opérations de remblayage.

Seuls 8 % des organismes ayant répondu à l'enquête utilisent un pénétromètre lourd ou léger, qui est le seul moyen pratique de contrôler le compactage des fouilles en tranchée sur toute la hauteur du remblai. Parmi ces derniers, un organisme utilise le pénétromètre CBR Farnell qui ne convient que pour des sols fins, sols rarement utilisés comme matériau de remblai des fouilles en tranchée.

Enfin, pour l'anecdote, signalons que 5 organismes utilisent encore le poinçon CBR comme moyen de contrôle du compactage, alors que cette méthode n'est plus normalisée en Suisse depuis 1994. Pour des sols grossiers, elle n'est nonobstant pas mauvaise.

Cette enquête montre qu'en Suisse et dans 90 % des cas environ, le contrôle du compactage des fouilles en tranchée n'est pas réalisé sur toute la hauteur du remblai. Cela démontre bien que l'introduction d'une nouvelle méthode normalisée est d'actualité.

Réponses enquête contrôle compactage fouilles

Nom	Date dernière mise à jour: 98-04-01	Rép.	M. vol. / Sable / ballon	M. vol. / isotope	ME	Poinçon CBR	Autre	Autre Type	Pénétré	Pénétré Type	Nbre / an
Administrations											
CFE - Direction des travaux, Berne		1		1	1						
IGT-ETHZ		1		1					1	CBR Farnell	
AG -Aarg. Baudepartment, Abteilung Umweltschutz		1			1						600
AG-Abteilung Tiefbau, Sektion Geotechnik und Belagsbau		1			1						700
FR-Bureau des autoroutes		1		1							150
FR-Etat de Fribourg, Service des Routes		1			1						20
GE-DAEL, Dir. GC, Chaussées et maintenance		1			1						
GL-Kantonal Verwaltung, Baudirektion, Glarus		1			1						
JU-Service des Ponts et Chaussées canton du Jura		1			1		1	visuel			100
LU-Kantonal Verwaltung, Tiefbauamt, Kriens		1			1						20
NE-Routes cantonales		1			1						5
NE-Service des Ponts & Chaussées NE		1			1						
NW-Kanton Nidwalden, Baudirektion		1			1		1	Proof rolling			
OW-Kantonal Verwaltung, Strasseninspektorat, Sarnen		1			1						
SG-Tiefbau- und Strassenverwaltung des Kantons St. Gallen		1									
SO-Kantonal Verwaltung, Baudepartment		1			1						200
SO-Nationalstrassen		1									
SZ-Kantonal Verwalt., Tiefbauamt Kantonsingenieur, Schwyz		1	1		1	1					
TG-Kantonal Verwalt., Tiefbauamt, Frauenfeld		1			1						
VD-Commune de Lausanne Direction travaux, routes et voirie		1			1						100
VD-DTPAT-Serv. routes et autor., Division routes cantonales		1			1						3
VD-DTPAT-Serv. routes et autor., Division routes nationales		1		1	1						3
VS-DTEE, routes cant. et cours d'eau		1			1						
ZG-Kantonal Verwaltung, Tiefbauamt, Zug		1									
ZH-Tiefbauamt Kantons Zürich, Dir. der öffentlichen Bauten		1			1	1					200

Fig. 4.3 Tableau des résultats détaillés de l'enquête (page 1)

Réponses enquête contrôle compactage fouilles

Nom	Date dernière mise à jour: 98-04-01	Rép.	M. vol. Sable / ballon	M. vol. isotope	ME	Poinçon CBR	Autre	Autre Type	Pénétration	Pénétration Type	Nbre / an
Bureaux											
Abageol SA, Fribourg		1			1				1	Bevac + Sedidni	15
Abageol SA, Payerne		1		1	1		1	Proof rolling visuel			100
Allemand, Jeanneret, Schmid SA		1			1		1				
Ammann-Geotechnik, Zug		1			1		1				
Amsler & Bombeli, Genève		1			1				1	Panda	
Andreas Steiger & Partner AG, Luzern		1			1						
B+S Ingénieur AG, Biel		1		1	1		1	Proof rolling			30
B+S Ingénieur AG, Bern		1			1						3
B.+C. Ingénieurs SA, Aigle		1			1						
Bächtold AG, Thun		1			1						40
Basler Ernst + Partner AG, Zürich		1			1						20
Baugelogie und Geo-Bau-Labor, Chur		1	1	1	1						15
BBL Baulaboratorium AG, MuttENZ		1	1		1						50
BILLIEUX, Martigny		1		1	1						10
Böhringer AG, Oberwil BL		1			1						10
Bonnard & Gardel SA, Lausanne		1			1						
Bonnard & Gardel, Bern		1			1		1	visuel			
Bucher + Dillier, Luzern		1			1						150
Colombi Schmutz Dorthé AG, Bern		1		1	1	1					40
Colombi, Schmutz, Dorthé SA, Kriens		1		1	1						10
Colombi, Schmutz, Dorthé SA, Sion		1		1	1						35
Consortium Tunnels de Pomy		1			1						
De Cérenville Géotechnique SA		1		1	1	1			1	Strassentest, Pard von Moos	100
Dériaz P.+C. & Cie SA		1			1				1		25
Electrowatt Engineering AG, Zürich		1		1	1						
Emch + Berger Bem AG		1		1	1						20
Friedli Geotechnik AG, Zürich		1		1	1						10
Gebr. Brun AG; Emmenbrücke		1		1	1						4
Geolina SA		1		1	1						1
Gruner AG, Basel		1		1	1						2
Gysi Leoni Mader AG, Zürich		1		1	1						10
ICG Lugano (Martinenghi)		1		1	1						5
IUB Ingénieur Untermehmung AG, Bem		1		1	1						
Jaeklin Felix P. Dr., Ennetbaden		1	1		1				1	CBR Farnell	
Jauslin+Stebler Ingenieure AG, MuttENZ		1			1						

Fig. 4.4 Tableau des résultats détaillés de l'enquête (page 2)

Réponses enquête contrôle compactage fouilles

Nom	Date dernière mise à jour: 98-04-01	Rép.	M. vol. / Sable / ballon	M. vol. isotope	ME	Poinçon CBR	Autre	Autre Type	Pénétr Type	Pénétr Type	Nbre / an
JOBIN S.A. Delémont		1			1						
Losinger SA, Crissier		1			1						
MARIC		1		1	1						20
Marti AG, Berne		1			1						
Marti AG, Solothurn		1			1						100
Martineghi SA		1									
Mertenat Ing. Conseils S.A.		1			1						
Passera & Pedrettil SA		1			1						15
Perreten + Milleret SA		1			1						50
Pralong Jean Dr. SA		1			1		1	visuel			10
Rüegger Geotechnik AG, Appenzell		1									
SACR		1			1				1	Panda	1500
SC+H Sieber Cassina Handke AG, Chur		1			1						30
Schindler Bernard, Prèles		1	1		1						30
Schmid + Bossi Partner AG		1			1						10
Schneider Toni R. Dr., Uerikon		1									
Schneller Ritz u. Partner AG		1			1						30
Sert SA, Lausanne		1			1						5
SOLFOR SA, Cointrin GE		1			1	1			1	Bevac P2 / von Moos	700
Stambach S.A.		1			1						100
Steiner Jucker Blumer AG, Frauenfeld		1					1	visuel			
Teyssaire + Candolfi, Visp		1			1						10
Uldry SA Sion		1			1						
Vollenweider Dr AG, Zürich		1			1						
Winkler Ernst + Partner AG, Winthertur		1		1	1						
Zschokke S.A., Aire-GE		1			1						5
Zschokke SA, Evionnaz VS		1			1						100
Totaux		86	5	21	74	5	8		8		

sur 190 envois

Fig. 4.5 Tableau des résultats détaillés de l'enquête (page 3)

5. Possibilités des pénétromètres dynamiques légers pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée

5.1 Pénétromètre dynamique à énergie variable

Lors de la séance de la Commission de recherche en matière de routes pendant laquelle a été discutée la demande du crédit de recherche sur le PDL, plusieurs de ses membres ont mis en doute la possibilité de faire pénétrer la sonde du pénétromètre *PANDA* à une profondeur permettant un contrôle unique du compactage de la plupart des fouilles en tranchée. Ces membres ont demandé aux requérants de prouver d'abord cette possibilité avant d'entreprendre des corrélations entre la résistance de pénétration dynamique et les paramètres utilisés aujourd'hui en Suisse comme critères de contrôle du compactage.

5.1.2 Examen de 43 essais au PDL

La banque des résultats des essais PDL de Amsler & Bombeli S.A. a été utilisée pour prouver que le PDL pouvait être enfoncé, dans les matériaux utilisés habituellement pour le remblayage des fouilles en tranchée, à une profondeur permettant, dans la plupart des cas, le contrôle du compactage en un seul essai. 43 essais ont été extraits de cette banque et font l'objet des fiches A annexées à ce rapport.

Tous les essais correspondants ont été réalisés avec une pointe du pénétromètre de 2 cm² de section.

Ces fiches contiennent :

- des informations résumées sur la localisation de l'essai,
- les caractéristiques du PDL (section de la pointe),
- le résultat de l'essai de pénétration ($q_d = f(\text{profondeur})$),
- des informations sur le matériau de remblayage, à savoir :
 - le type du matériau de remblayage,
 - le diamètre maximal des grains,
 - sa granulométrie lorsqu'elle est disponible,
- les résultats des essais réalisés pendant le remblayage : M_E , masse volumique,
- la position des échantillons prélevés pour les essais en laboratoire.

Toutes les fiches pouvant avoir un intérêt pour la recherche sont annexées à ce rapport. Cependant, seules certaines d'entre elles relatent des essais exécutés à une profondeur permettant de prouver que le PDL peut être utilisé pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée.

5.1.3 Conclusion de l'examen des possibilités des pénétromètres dynamiques à énergie variable

La figure 5.1 (tableau) indique les profondeurs atteintes par les essais PDL faisant l'objet de fiches. Parmi ces dernières, celles relatives à des essais au PDL dépassant 2 mètres de profondeur sont les plus intéressantes pour le but poursuivi, et certains détails les concernant sont consignés sur la figure 5.2.

Profondeur du contrôle	No des fiches annexées	Nbre
1 - 2 m	01, 02, 10, 14, 22, 23, 26, 27, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43	17
2 - 3 m	08, 11, 15, 16, 17, 18, 25, 32, 33, 35,	10
> 3 m	12, 13, 24,	3

Fig. 5.1 No des fiches PDL groupées par profondeur

No de la fiche	Profondeur [m]	Matériau du remblai	Ømax [mm]	Granulométrie oui / non
08	2,7	Grave II	80	oui
11	2,2	Grave II	80	oui
12	3,6	Grave II	100	oui
13	3,3	Environ grave I	65	oui
15	2,2	Grave I, sable et tout venant Ømax=40 mm	63	non
16	2,3	Grave I, sable et tout venant Ømax=40 mm	63	non
17	2,7	Grave II	55	oui
18	2,2	Grave II	55	oui
24	3,3	Grave II	100	non
25	3,0	Grave II	100	non
32	2,3	Grave II	>100	oui
33	2,3	Grave II	>100	oui
35	2,8	Grave II	>100	oui

Fig. 5.2 Quelques caractéristiques des PDL les plus profonds (≥ 2 m)

La figure 5.2 et les fiches correspondantes placées en annexe montrent très clairement que dans des matériaux de remblayage classiques de fouilles en tranchée dont le diamètre maximal des grains dépasse 100 mm, un PDL peut descendre en dessous de 3 mètres de profondeur.

En outre, l'analyse plus détaillée des fiches A annexées démontre que cet essai permet de reconnaître très nettement les zones mal compactées ou celles constituées de matériaux de caractéristiques différentes. Les fiches no 08, 11, 12, 13, 14 (matériaux différents), 15 (matériaux différents), 16 (matériaux différents), 17, 18, 24, 25 et 35 sont de bons exemples de cette reconnaissance.

5.2 Pénétromètre dynamique à énergie constante

En Suisse, le pénétromètre dynamique à énergie constante le plus utilisé est le pénétromètre von Moos (SN 670 417). C'est un pénétromètre relativement lourd, ce qui lui permet de pénétrer des couches de grande résistance. Son usage pour le contrôle du compactage de fouilles en tranchée devrait être possible pour toutes les compacités du remblai et pour toutes les profondeurs de fouilles.

6. Développements internationaux et corrélations correspondantes

6.1 Remarques préliminaires sur les corrélations

La compacité d'un matériau peut être mesurée par différents paramètres. Cependant, en mécanique des sols, c'est la masse volumique du sol sec qui est, de tout temps, le paramètre le plus utilisé. Les principaux autres paramètres sont : un module de déformation obtenu par un essai de plaque, une valeur CBR (pénétromètre statique), une déflexion sous une charge dynamique (par exemple au moyen du FWD) ou encore l'indice de densité défini par la norme SN 670 335.

Il n'y a pas de relation unique entre la masse volumique du sol sec et la résistance à la pénétration dynamique. Pour une masse volumique donnée, cette résistance dépend notamment de la granulométrie du matériau, de sa teneur en eau et de sa compacité. Les relations correspondantes doivent donc être établies pour différents types de matériaux classés, si possible, selon un système reconnu.

6.2 France

6.2.1 Historique

Le développement de l'usage du pénétromètre à énergie variable pour le contrôle du compactage de remblais vient essentiellement de France, et en particulier de l'institut LERMES/CUST de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand (Gourvès & Barjot 1995, Zhou 1997). Cet institut a inventé un pénétromètre dynamique à énergie variable très léger (environ 20 kg) dénommé *PANDA*, dont l'enfoncement se fait par un simple marteau. Il peut être utilisé pour le contrôle du compactage de remblais et, en particulier, pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée, car sa maniabilité lui permet d'être facilement et rapidement introduit dans ces dernières. Il peut aussi être utilisé dans de nombreuses autres applications, comme en mécanique de la neige ou pour le repérage de l'épaisseur de couches de sols naturels et de remblais.

Depuis 1992 environ, le LERMES/CUST réalise de nombreuses études pour promouvoir ce pénétromètre, dont notamment :

- des corrélations entre la résistance dynamique à la pénétration et des caractéristiques standards comme la masse volumique du sol sec,
- la mise au point de méthodes d'étalonnage du *PANDA*.

6.2.2 Corrélations

Les études du LERMES/CUST ont montré la bonne corrélation entre de la résistance obtenue avec des pénétromètres dynamiques (à énergie variable ou constante) et la masse volumique du sol sec. Les très nombreux essais effectués par cet institut ont été effectués pour obtenir des corrélations entre la résistance de pointe du pénétromètre et la masse volumique du sol sec pour différents types de matériaux et pour différentes teneurs en eau.

Le LERMES/CUST possède actuellement une base de données importante de ces corrélations.

La figure 6.1 montre, à titre d'exemple, le résultat d'essais de corrélation entre la résistance dynamique à la pénétration et la masse volumique, essais exécutés sur des sables avec diverses teneurs en eau.

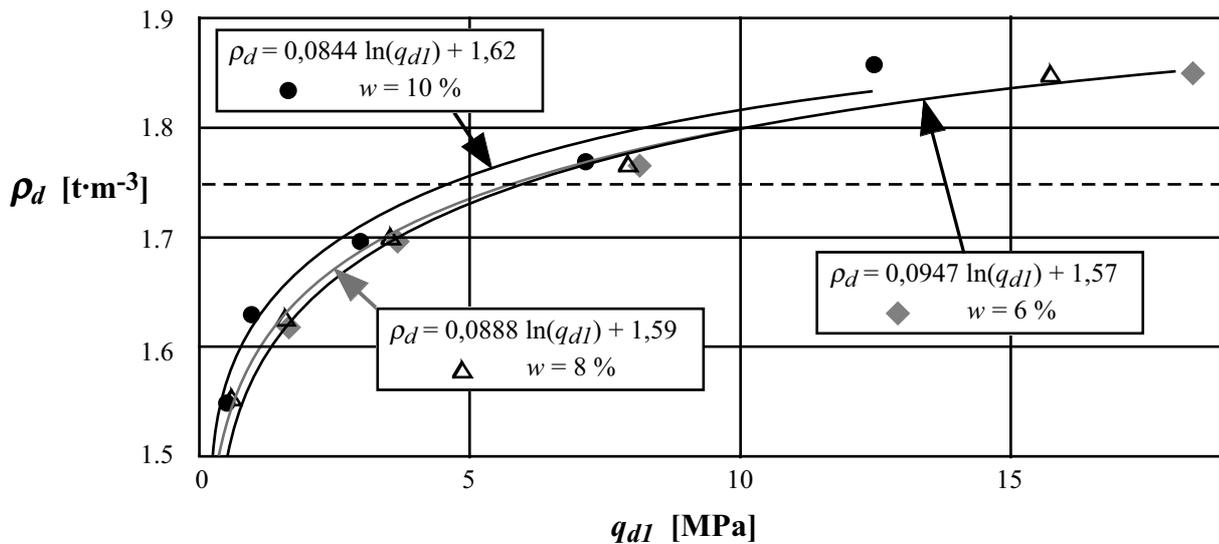


Fig. 6.1 Corrélation ρ_d en fonction de q_{dI} pour un sable (Vachon, 1998)

La figure 6.4 donne une corrélation pour une grave 0 à 20 mm. L'équation de cette corrélation est :

$$\rho_d [\text{t}\cdot\text{m}^{-3}] = 0,088 \ln(q_d [\text{Mpa}]) + 1,82 \quad (r = 0,99) \quad (6.1)$$

6.2.3 Normalisation

L'usage du pénétromètre à énergie variable pour le contrôle du compactage de remblais devenant très fréquent en France, l'AFNOR (Association française de normalisation) a normalisé cet essai par le document XP P 94-105 « Contrôle de la qualité du compactage. Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable » (mai 2000).

Cette norme traite :

- des principes de l'essai
- de ses trois fonctions :
 - L'appréciation de l'épaisseur de couches (fonction A).
 - Le contrôle de la qualité du compactage par rapport à une valeur de référence q_{dR} et à une valeur limite q_{dL} correspondant toutes deux au matériau testé ; ces valeurs sont établies par étalonnage dans un moule d'essai (fonction B).
 - Le contrôle de la qualité du compactage par comparaison avec les résultats obtenus sur une planche d'essais (fonction C).
- de sa méthode d'étalonnage
- de l'exploitation des résultats et de leur interprétation.

Dans cette norme, le frottement latéral (parasite) de la pointe n'est pas pris en compte, mais sa valeur est limitée par la procédure suivante : à chaque adjonction de tige à partir de 2 m de profondeur, le train de tiges en place est manœuvré en rotation sur 360° manuellement. S'il est impossible de tourner le train de tiges d'une seule main, l'essai doit être arrêté. On peut aussi utili-

ser une clé dynamométrique et, dans ce cas, la valeur limite du couple est fixée par le constructeur du pénétromètre.

L'étalonnage est réalisé par rapport à la masse volumique du sol sec pour différents teneurs en eau et énergies de compactage. La courbe d'étalonnage permet de fixer une valeur limite de référence q_{dL} relativement à la masse volumique optimale de l'essai Proctor (fig. 6.2).

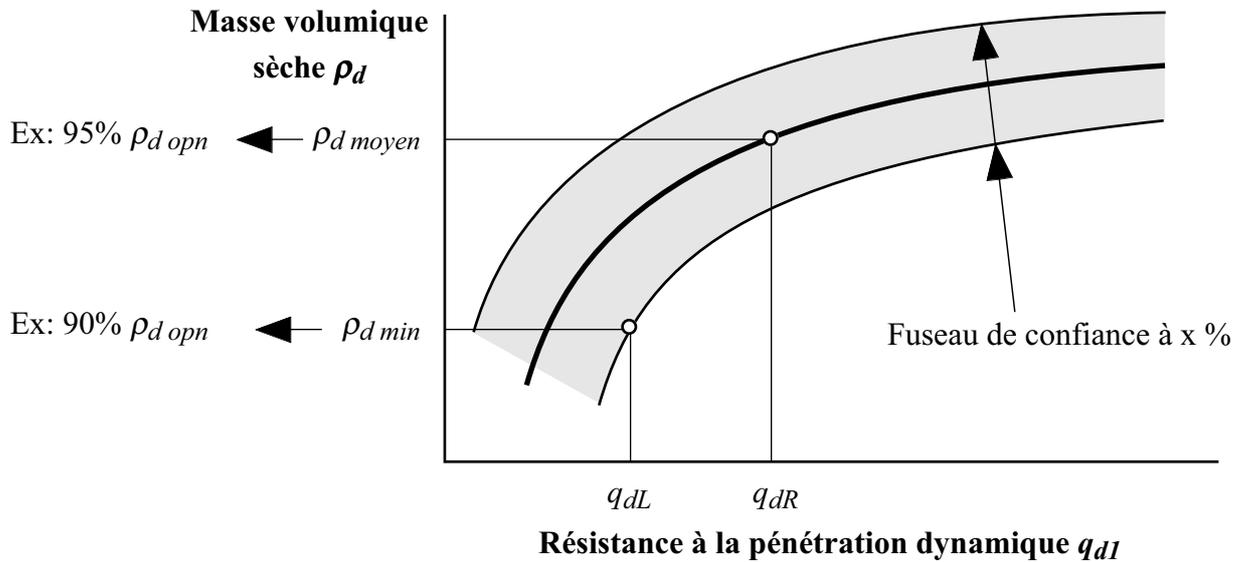


Fig. 6.2 Définitions de la valeur limite q_{dL} et de la valeur de référence q_{dR} par des essais de compactage

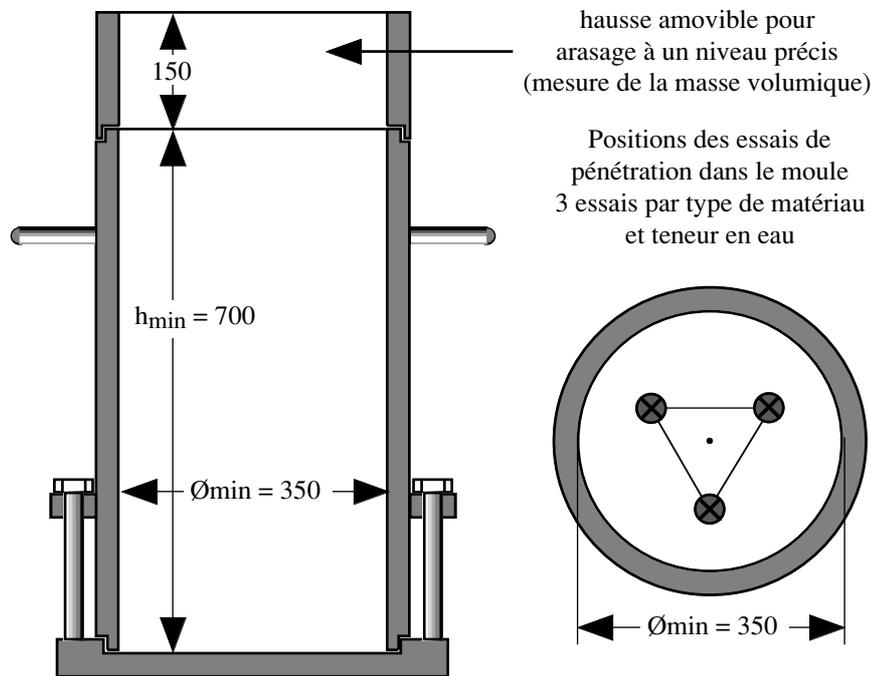
Une courbe d'étalonnage du type de celle de la figure 6.2 doit être établie pour chaque matériau classé selon une méthode bien établie, en fonction notamment de sa granulométrie. La norme française demande que cette classification soit celle décrite dans la norme NF P 11-300 « Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières », 1992.

L'étalonnage se fait dans un moule de compactage dont les dimensions sont fonctions du diamètre de la pointe du pénétromètre (fig. 6.3). Le sol est compacté à la main ou mécaniquement avec une dame genre Proctor, mais de plus grande masse et hauteur de chute, ou avec une pilonneuse. En utilisant une dame, il est possible de calculer l'énergie de compactage ; cela n'est cependant pas nécessaire car, pour l'étalonnage, l'important est de pouvoir mesurer la masse volumique de l'éprouvette après compactage.

Pour le moule de la figure 6.3, la première couche aura une épaisseur de 25 cm et les suivantes de 20 cm. La hausse amovible supérieure permet, après son démontage, d'araser le sol avec précision et, ainsi, de mesurer la masse volumique moyenne de l'éprouvette.

Pour un contrôle du compactage des fouilles en tranchée avec le pénétromètre PANDA, une pointe de 2 cm^2 est le plus souvent utilisée ($\varnothing = 16 \text{ mm}$), ceci de façon à pouvoir pénétrer des remblais de grande compacité. Le moule de la figure 6.3 convient alors parfaitement. Pour le

pénétromètre von Moos à énergie constante, dont la pointe a un diamètre de 36 mm, il faudrait un moule d'au minimum 60 cm de diamètre et de 120 cm de hauteur.



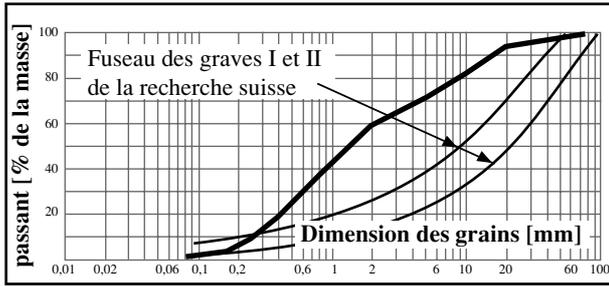
Dimensions minimales pour surface pointe $\leq 4 \text{ cm}^2$ (Cotes en mm)

Fig. 6.3 Moule d'étalonnage, dimensions minimales.

6.2.4 Exemple d'un étalonnage

Cet exemple provient de Chaigneau et Gourvès, 1999. L'étalonnage, décrit par la figure 6.4, a été exécuté dans le moule de la figure 6.3 avec un compactage au moyen d'une presse placée au sommet du moule, et non pas, par couches, au moyen d'un engin de compactage agissant à la surface des couches. La granulométrie du matériau étalonné est différente de celle des graves I et II contrôlées dans le cadre de cette recherche (voir chapitre 8).

Grave 0 - 20 mm



Essai Proctor			
Normal		Modifié	
w [%]	ρ_d [t·m ⁻³]	w [%]	ρ_d [t·m ⁻³]
10.9	1.923	5.7	2.055
14.9	1.965	7.5	2.081
14.1	1.919	9.3	2.084
6.8	1.979	10.8	1.993
13.3	1.965	12.1	1.987
ρ_d opt		1.950	2.040

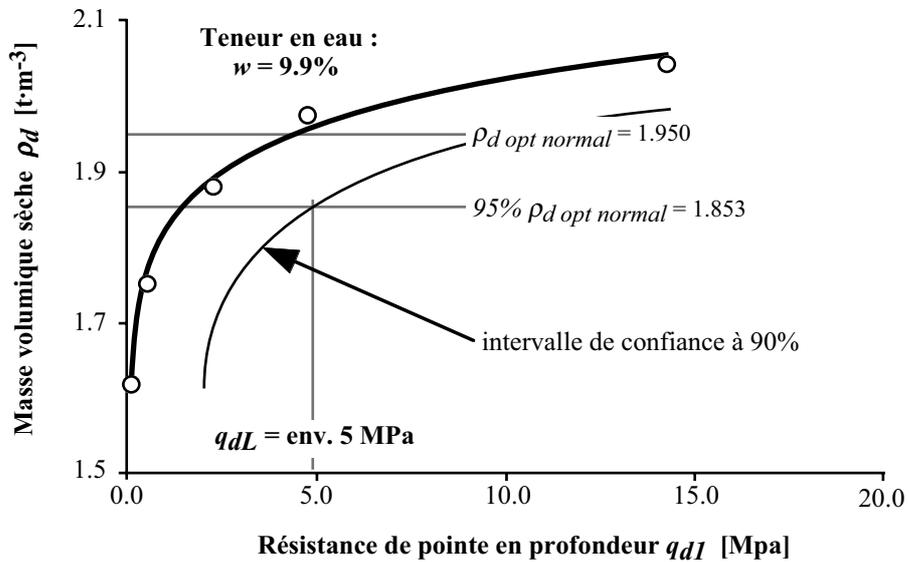
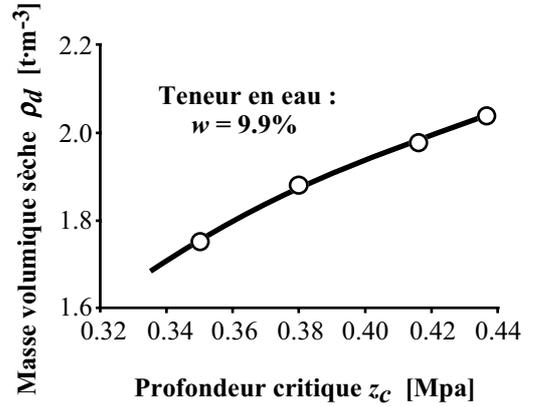
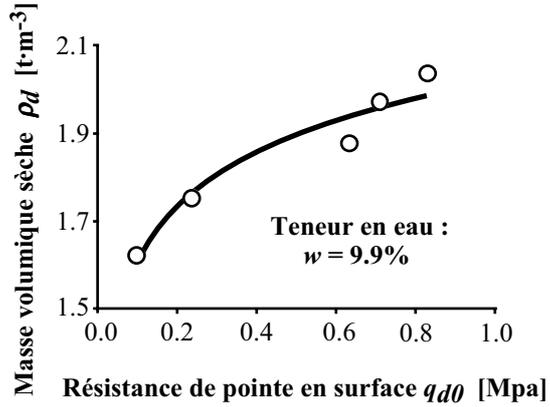


Fig. 6.4 Exemple d'un étalonnage du pénétromètre à énergie variable dans le moule de la figure 6.3. Compactage par une presse.

6.3 Angleterre

Le TRL (Transport Research Laboratory) et le BRE (Building Research Establishment) s'intéressent au pénétromètre *PANDA* depuis plusieurs années et ont réalisé plusieurs études à son propos. Ils ont notamment établi des corrélations entre la résistance q_d , obtenue avec le *PANDA*, la valeur CBR, et la résistance au pénétromètre statique CPT. Ces corrélations font l'objet de la figure 6.5. La corrélation b) montre que, pour des argiles, la résistance dynamique obtenue avec le *PANDA* est la même que celle obtenue avec le CPT.

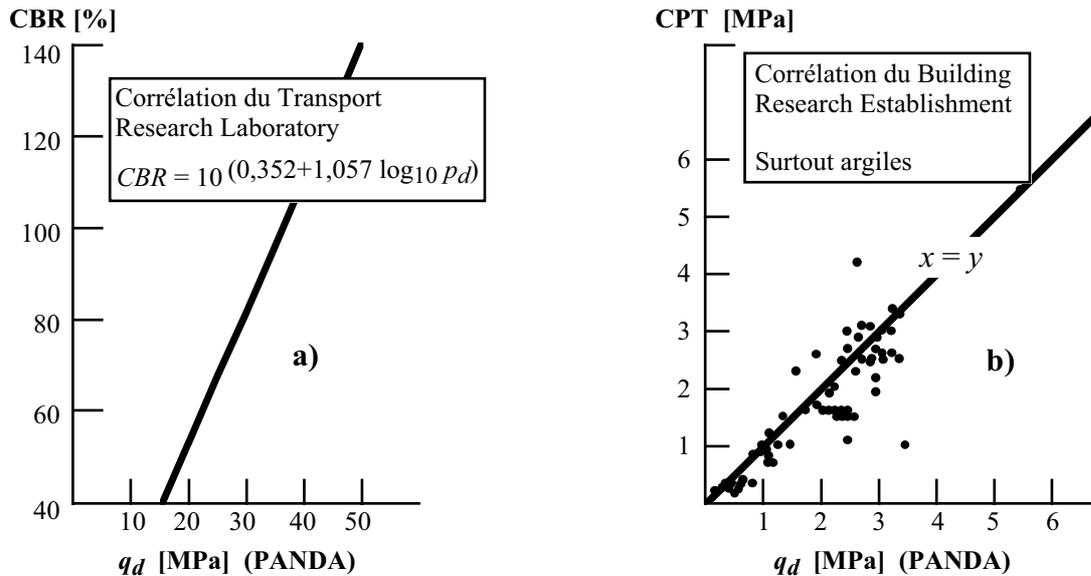


Fig. 6.5 Corrélations obtenues par le TRL et le BRE.

6.4 Etats Unis d'Amérique

Depuis quelques années, le pénétromètre *PANDA* est utilisé dans plusieurs états des USA. Par exemple, la ville de New York a récemment entrepris une campagne d'essais systématiques pour valider ce moyen de contrôle du compactage (Juran, Bocherel, Schaack & Rousset, 1999).

6.5 Développement de l'usage du pénétromètre *PANDA*

Le pénétromètre dynamique à énergie variable *PANDA* a été inventé il y a quelque 15 ans par R. Gourvès, du Centre Universitaire de Sciences et Techniques (CUST) de l'université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand. Depuis lors, il est largement utilisé dans le monde.

Quelque 1300 pénétromètres *PANDA* ont été vendus. La majorité se trouvent en France. En dehors de ce pays, on en trouve surtout en Belgique, en Australie, en Angleterre, en Argentine et aux États Unis d'Amérique. La Suisse en possède actuellement une dizaine.

7. Corrélations de la littérature entre les résistances à la pénétration et des paramètres classiques de la mécanique des sols

7.1 Introduction

Cette section contient un florilège des très nombreuses corrélations établies entre des résistances à la pénétration dynamique et statique, et différents paramètres courants de la mécanique des sols.

La définition des symboles déjà définis plus haut n'est pas répétée. En outre, toutes ces définitions peuvent être trouvées dans le chapitre « Symboles et abréviations ».

On pourra remarquer dans ce florilège que certaines corrélations sont contradictoires !

7.2 Pénétrmètre statique

Gourvès et Barjot (1995) ont donné la corrélation suivante :

$$q_d (\text{PANDA}) \approx q_c (\text{CPT}) \quad (7.1)$$

Cette relation a été confirmée par des essais exécutés en Angleterre (§ 6.3), ainsi que par ceux réalisés par Zhou (1997) sur des *limons argileux* avec une teneur en eau de 24% : $q_d = 1,05 q_c$.

Selon Buisson, l'Herminier et Tcheng (dans Sanglerat 1965) :

$$0,3 \leq \frac{q_c}{q_d} \leq 1 \quad (7.2)$$

D'après Cassan (1988) on a (q_d obtenu avec un pénétromètre dynamique quelconque) :

- pour les argiles : $q_d \neq q_c$ (7.3)

- pour les limons argileux : $q_d = 0,79 q_c$ (7.4)

- pour les sables argileux : $q_d = 0,93 q_c + 1,88$ [MPa] (7.5)

- pour les sables limoneux et les limons argilo-sableux : $q_d = 0,3 q_c$ (7.6)

- pour les sables et graviers non saturés : $q_d \neq q_c$ (7.7)

- pour les sables et graviers saturés : $q_d = 0,4 q_c$ (7.8)

Selon Laréal, Sanglerat & Gielly (1974) (q_d obtenu avec un pénétromètre dynamique quelconque) :

- pour les sables et les graviers tout-venants : $q_d \neq q_c$ (7.9)

- pour les graviers très propres ou les sables lâches : $q_d < q_c$ (7.10)

- pour les sols cohérents non saturés : $q_d \neq q_c$ (7.11)

- pour les sols cohérents saturés : $q_d = q_c \cdot (10 \text{ à } 100)$ (7.12)

7.3 Pénétromètre CBR

Le Transport Research Laboratory (Langton, 1999) a donné la corrélation suivante :

$$CBR [\%] = 10^{(0,352+1,057 \log_{10} p_d [MPa])} \quad (7.13)$$

7.4 SPT

Waschkowski (dans Cassan 1988) propose les corrélations suivantes :

- pour les argiles et limons surconsolidés : $q_d [MPa] = 0,2 N_{SPT}$ (7.14)

- pour les argiles sableuses et limons sableux : $q_d [MPa] = 0,3 N_{SPT}$ (7.15)

- pour les sables : $q_d [MPa] = 0,4 N_{SPT}$ (7.16)

- pour les sables plus ou moins graveleux : $q_d [MPa] = 0,8 N_{SPT}$ (7.17)

7.5 Cohésion et résistance à la compression simple

Zhou (1997), pour des *argiles molles* ($\rho = 1,42$, $w = 90\%$, $w_L = 74\%$ et $I_p = 20\%$) et en déterminant le c_u au moyen d'une scissomètre, donne la relation suivante :

$$q_d (\text{PANDA}) = 11,4 c_u \quad (7.18)$$

Gourvès et Barjot (1995) proposent la corrélation approximative suivante pour des *sols fins de compacité moyenne* :

$$q_d (\text{PANDA}) = c_u \cdot (15 \text{ à } 20) \quad (7.19)$$

En ce qui concerne la résistance à la compression simple q_u , sur la base d'essais de compression simple en laboratoire, Zhou (1997) propose la régression suivante pour des *limon sablo-argileux* (5 à 25% de sable, 25 à 40% de limon, 32 à 50% d'argile, $\rho_{moyen} = 1,7$, $I_p > 30\%$ et $S_r = 85\%$) :

$$q_d (\text{PANDA}) = 6,9 q_u (= 3,45 c_u) \quad (7.20)$$

7.6 Pressiomètre

Zhou (1997) propose les deux relations suivantes :

- pour les argiles : $\frac{q_d}{p_1 - p_0} = 4,6$ (7.21)

- pour les limons : $\frac{q_d}{p_1 - p_0} = 6$ (7.22)

avec :

p_0 = contrainte initiale préexistante autour du trou du pressiomètre

p_1 = pression limite de l'essai pressiométrique.

8. Essais réalisés dans le cadre de la recherche

8.1 Méthode

Les essais ont été réalisés dans des fouilles en tranchée de la région genevoise par M. Blandin du bureau Amsler & Bombeli. Ils avaient comme but initial de tenter de corrélérer (ou de montrer que les corrélations étaient difficiles, voire impossibles) les résistances à la pénétration dynamique avec les valeurs des paramètres utilisés couramment en Suisse comme critères du contrôle du compactage.

Dans chaque fouille utilisée pour les essais, le dispositif d'essais schématisé par la figure 8.1 a été utilisé. Il permettait :

- La mesure de la masse volumique jusqu'à une profondeur d'environ 30 cm au moyen d'un nucléomètre *Troxler*. Cet appareil mesure la masse volumique (humide) ρ (rayon gamma) et la teneur en eau w (neutrons). Il affiche la masse volumique du sol sec ρ_d et la teneur en eau. Ces mesures sont réalisées pour les profondeurs : 0 – 10 cm, 0 – 20 cm et 0 – 30 cm. Le *Troxler* permet aussi une mesure de surface qui n'a été que rarement exploitée.
- La mesure du module M_E selon la norme SN 670 317b, au moyen du dispositif d'essai décrit par la norme SN 670 312b (plaque de 30 cm de diamètre).
- La mesure de la résistance à la pénétration dynamique au moyen du pénétromètre *PANDA*.

Il est important de signaler que ces trois essais n'ont pu être exécutés exactement au même endroit du fond de la fouille.

En outre, comme les remblais des fouilles en tranchée sont compactés par couches au moyen d'un engin de compactage agissant à la surface de la couche, les corrélations sont établies depuis la surface sans profondeur critique (voir § 3.3). Pour le calcul des valeurs moyennes, nous avons cependant éliminé les valeurs aléatoires et trop faibles de q_d juste sous la surface du sol 0 – 10 cm, 0 – 20 cm et 0 – 30 cm.

26 groupes d'essais (ρ_d , w , M_E , q_d) ont été réalisés dans des fouilles de la région genevoises. Chacun de ces essais fait l'objet d'une fiche consignée dans l'annexe B : Fiches d'essais « Tentatives de corrélations ». Chaque fiche contient :

- l'identification de l'essai
- le résultat de l'essai de pénétration $q_d = f(\text{profondeur})$
- le résultat des mesures de ρ_d , w , M_E et q_d
- la granulométrie du matériau de remblayage.

Le fuseau de l'ensemble des granulométries fait l'objet de la figure 8.2. Ce fuseau démontre que tous les matériaux de remblai sauf un sont au moins des graves II selon la norme SN 670 120d, et qu'une bonne partie sont des graves I. Les essais dans les 26 fouilles ont donc été réalisés sur, quasiment, un même type de matériaux.

Des essais Proctor standards (\varnothing_{max} des grains = 16 mm) ont été réalisés sur une partie des échantillons de remblais prélevés. Ils ont été effectués selon la norme SN 670 320b sur des échantillons recomposés après les granulométries.

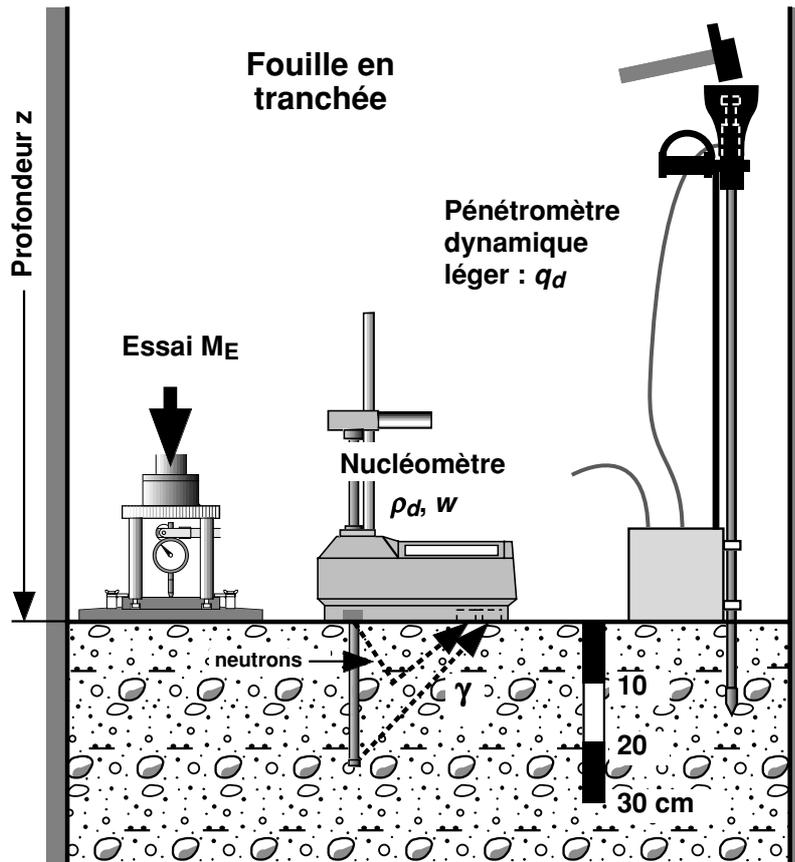


Fig. 8.1 Dispositif d'essais

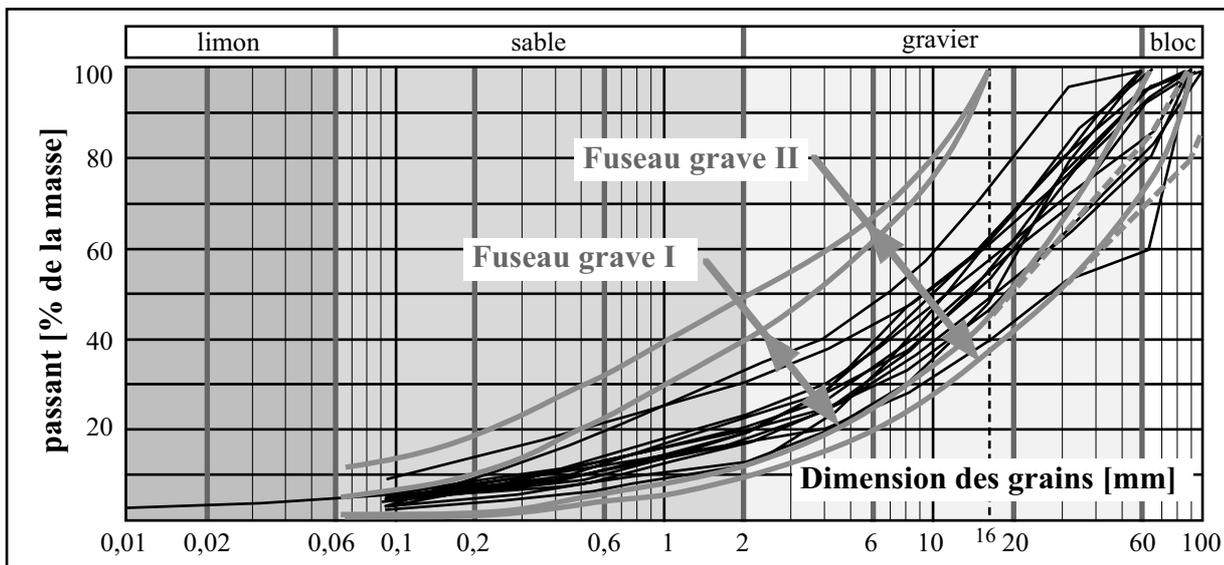


Fig. 8.2 Fuseau granulométrique des matériaux de remblai des fouilles utilisées pour les essais.

Les figures 8.3a, b et c (tableaux) récapitulent tous les essais réalisés lors de la recherche, et la figure 8.3d présente les paramètres statistiques tirés des valeurs des figures 8.3a, b et c.

No essai	Date	Prof. dans fouille [m]	Type du remblai	Essais in situ						Essais en labo		
				Prof. zone essai [cm]	Essais ME		Panda q_d [MPa]	Nucléomètre		Annexes Granulo = G	Proctor	
					M_{E1} [MPa]	M_{E2} [MPa]		ρ_d [t·m ⁻³]	w [%]		ρ_{dopn} [t·m ⁻³]	w_{opn} [t·m ⁻³]
1303b-01	13/7/00	-0.90	grave recyclée 0-150	surf. 0-10 0-20 0-30				2.16 2.24 2.20 2.14	5.6 5.3 5.6 5.5	B01 G	1.96	10.2
1303b-02	17/7/00	-0.10	grave recyclée 0-60	surf. 0-10 0-20 0-30				2.23 2.28 2.33 2.38	3.8 3.4 3.6 3.5	B02 G		
1303c-01	27/9/00	-2.65	Grave 0 - 150 Induni	surf. 0-10 0-20 0-30				2.17 2.24 2.15 2.27	4.0 4.2 4.2 4.1	B03 G	2.16	7.6
1303c-02	27/9/00	-2.65	Mélange grave 0 - 80 & tout venant	surf. 0-10 0-20 0-30				2.09 2.23 2.27 2.30	4.4 4.6 4.1 3.8	B04		
1303c-03	28/9/00	-1.65	Grave 0 - 150	surf. 0-10 0-20 0-30				1.99 2.12 2.26 2.28	3.4 3.1 3.0 2.7	B05		
1303c-04	28/9/00	-1.65	Mélange grave 0 - 80 & tout venant	surf. 0-10 0-20 0-30				2.03 2.19 2.25 2.30	5.0 4.5 4.0 3.6	B06		
1303c-05	3/10/00	-0.50	Mélange grave 0 - 80 & tout venant	surf. 0-10 0-20 0-30				1.86 2.12 2.16 2.19	4.6 3.6 3.7 3.6	B07		
1303c-06	3/10/00	-0.50	Mélange grave 0 - 80 & tout venant	surf. 0-10 0-20 0-30				2.29 2.38 2.38 2.39	4.0 3.9 4.0 4.2	B08		

Fig. 8.3a Récapitulation des essais – première partie

No essai	Date	Prof. dans fouille [m]	Type du remblai	Essais in situ						Essais en labo		
				Prof. zone essai [cm]	Essais ME		Panda	Nucléomètre		Annexes Granulo = G	Proctor	
					M_{E1} [MPa]	M_{E2} [MPa]	q_d [MPa]	ρ_d [t·m ⁻³]	w [%]		ρ_{dopn} [t·m ⁻³]	w_{opn} [t·m ⁻³]
1303d-01	26/9/00	-2.00	Grave 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				2.13 2.20 2.27 2.26	4.3 3.7 4.0 3.5	B09 G	2.14	7.7
1303d-02	26/9/00	-2.00	Grave 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				2.12 2.17 2.25 2.25	4.1 3.5 4.0 3.7	B10 G		
1303d-03	26/9/00	-2.00	Grave 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				2.13 2.24 2.28 2.30	4.4 4.0 4.1 3.9	B11 G		
1713-10	27/6/00	-1.10	Grave II 0 - 60	surf. 0-10 0-20 0-30				2.23 2.29 2.25 2.19	1.6 1.3 1.3 1.8	B12 G		
1713-11	27/6/00	-0.30	Grave II 0 - 60	surf. 0-10 0-20 0-30				2.00 2.15 2.07 2.01	2.7 2.1 2.5 2.4	B13 G		
1713-13	13/7/00	-0.18	Grave II 0 - 60	surf. 0-10 0-20 0-30				2.39 2.27 2.26 2.16	2.8 2.4 2.6 2.5	B14 G		
1867b-01	11/7/00	-0.65	Grave recyclée 0 - 150	surf. 0-10 0-20 0-30				1.95 1.97 1.99 2.01	7.8 7.5 7.5 7.3	B15 G		
1867b-02	11/7/00	-0.20	Grave I	surf. 0-10 0-20 0-30				2.23 2.26 2.23 2.24	5.7 5.1 5.7 5.3	B16 G	1.99	8.6
1867c-01	18/7/00	-0.10	Grave calcaire 0 - 50	surf. 0-10 0-20 0-30				2.16 2.20 2.21 2.22	4.5 4.6 4.3 4.4	B17 G		
1867c-02	25/7/00	-0.10	Grave recyclée 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				2.30 2.26 2.25 2.22	1.9 2.1 2.1 1.9	B18 G	2.00	9.6

Fig. 8.3b Récapitulation des essais – deuxième partie

No essai	Date	Prof. dans fouille [m]	Type du remblai	Essais in situ						Essais en labo		
				Prof. zone essai [cm]	Essais ME		Panda	Nucléomètre		Annexes Granulo = G	Proctor	
					ME1 [MPa]	ME2 [MPa]	qd [MPa]	ρ_d [t·m ⁻³]	w [%]		ρ_{dopn} [t·m ⁻³]	w_{opn} [t·m ⁻³]
1881-04	26/6/00	-0.22	Grave recyclée	0-10 0-20 0-30			26.6 29.8 26.9			B19 G		
1881-06	26/6/00	-0.22	Grave recyclée	0-10 0-20 0-30			21.6 24.9 24.1			B20 G		
1885-06	20/6/00	-2.65	Grave recyclée 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				1.93 23.5 25.5 25.8	4.0 4.0 3.6 3.8	B21 G	2.12	7.0
1885-07	27/6/00	-0.80	Grave recyclée 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				1.85 10.1 12.6 17.4	6.2 6.3 5.6 5.9	B22 G		
1885-08	11/7/00	-2.50	Grave recyclée 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				1.93 8.5 12.2 12.1	10.8 11.5 10.5 9.9	B23 G		
1885-09	17/7/00	-0.80	Grave recyclée 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				2.03 15.6 20.7 21.5	6.9 6.4 6.3 6.4	B24 G		
1885-10	18/9/00	-2.30	Grave recyclée 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				1.95 13.0 12.6 11.9	7.7 7.5 7.3 7.2	B25		
1885-11	19/9/00	-1.00	Grave recyclée 0 - 100	surf. 0-10 0-20 0-30				1.86 12.7 16.7 15.0	6.3 6.2 5.9 6.1	B26		
1885-12	16/10/00	-0.50	Grave 0 - 60 de 0 à -0.30 m	surf. 0-10 0-20 0-30				1.94 4.7 8.1 8.1	2.3 2.3 2.1 2.2	B27 G		
1885-13	16/10/00	-0.50	Tout venant	surf. 0-10 0-20 0-30				1.98 2.02 4.1 2.02	2.8 2.7 3.0 2.6	B28 G		

Fig. 8.3c Récapitulation des essais – troisième partie

Prof. zone essai [cm]	Essais ME		Panda	Nucléomètre	
	M_{E1}	M_{E2}	q_d	ρ_d	w
Paramètres statistiques	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[t·m ⁻³]	[%]
0 - 10	Voir 0-30	Voir 0-30			
Minimum			4.1	1.91	1.3
Maximum			55.1	2.38	11.5
Moyenne			16.6	2.14	4.5
Ecart type			11.1	0.13	2.2
Intervalle confiance 90%			±3.6	±0.04	±0.07
Intervalle confiance 80%			±4.3	±0.05	±0.08
0 - 20	Voir 0-30	Voir 0-30			
Minimum			4.1	1.91	2.1
Maximum			28.2	2.38	10.5
Moyenne			16.1	2.14	4.5
Ecart type			6.3	0.14	1.9
Intervalle confiance 90%			±2.0	±0.05	±0.6
Intervalle confiance 80%			±2.4	±0.06	±0.7
0 - 30					
Minimum	29.1	107.2	8.1	1.94	1.9
Maximum	119.6	342.8	27.2	2.39	9.9
Moyenne	64.1	176.1	17.4	2.15	4.4
Ecart type	25.6	53.0	5.6	0.15	1.9
Intervalle confiance 90%	±7.9	±16.5	±1.8	±0.05	±0.6
Intervalle confiance 80%	±9.5	±19.6	±2.2	±0.06	±0.7

Fig. 8.3d Récapitulation des essais – paramètres statistiques

Plusieurs lois de corrélation ont été tentées : logarithmique, linéaire, exponentielle, etc. La corrélation logarithmique de la forme $y = a \ln(x) + b$ a été la meilleure dans tous les cas. Le remplacement du logarithme naturel par le logarithme de base 10 conduit à la même corrélation : $a \ln(x) = 2,303 a \log_{10}(x)$.

8.2 Masse volumique

Les corrélations obtenues entre la masse volumique du sol sec ρ_d et la résistance à la pénétration dynamique q_d font l'objet des figures 8.4, 8.5 et 8.6.

La figure 8.4 établit une corrélation logarithmique entre ρ_d et q_d pour les mesures réalisées de 0 à 10 cm de profondeur (pour q_d , moyenne de 0 à 10 cm avec élimination des valeurs de surface).

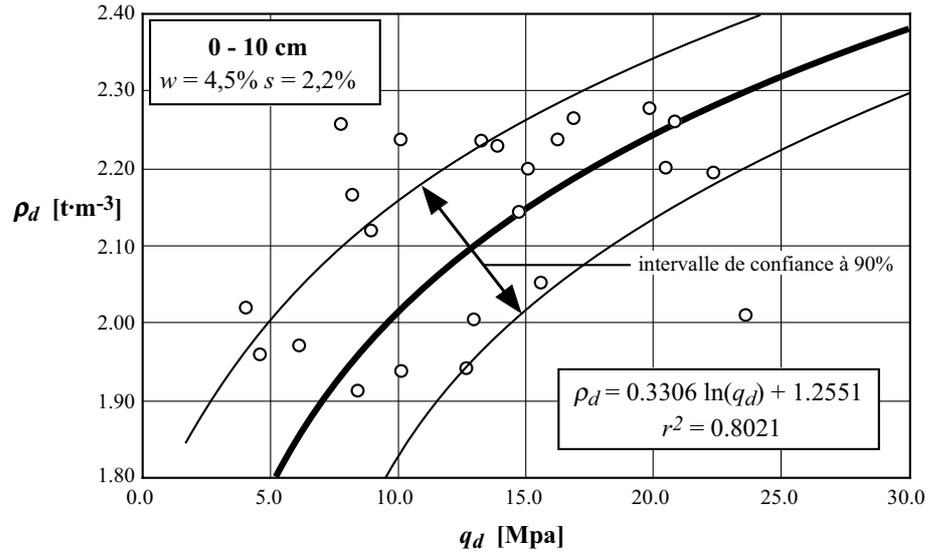


Fig. 8.4 Corrélation $\rho_d = f(q_d)$ de 0 à 10 cm de profondeur

La figure 8.5 établit une corrélation logarithmique entre ρ_d et q_d pour les mesures réalisées de 0 à 20 cm de profondeur (pour q_d , moyenne de 0 à 20 cm).

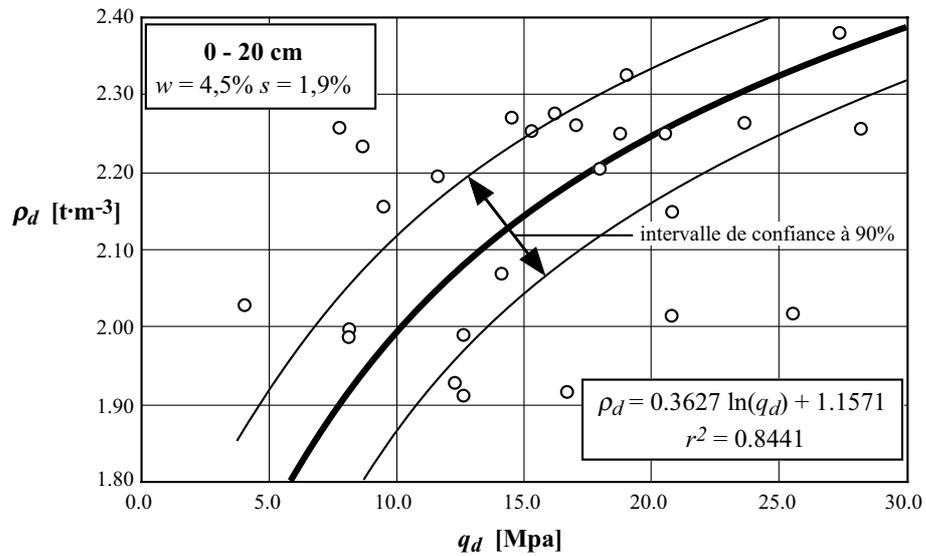


Fig. 8.5 Corrélation $\rho_d = f(q_d)$ de 0 à 20 cm de profondeur

Enfin, la figure 8.6 établit une même corrélation pour les mesures réalisées de 0 à 30 cm de profondeur (pour q_d , moyenne de 0 à 30 cm).

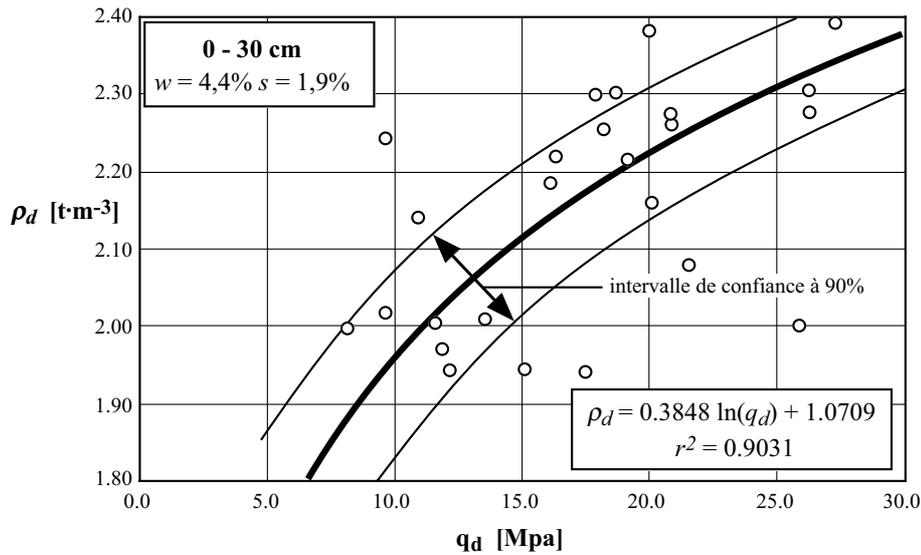


Fig. 8.6 Corrélation $\rho_d = f(q_d)$ de 0 à 30 cm de profondeur

Chaigneau, Gourvès et Bacconnet (2000), ont montré que les corrélations entre la masse volumique et la pénétration dynamique sont en général bonnes. C'est aussi le cas pour nos essais réalisés sur un matériau assez homogène (Grave I et II, voir fig. 8.2).

La moins bonne des corrélations est celle obtenue pour une profondeur de 0 à 10 cm, et la meilleure, pour une profondeur des mesures de 0 à 30 cm. Cela provient certainement des valeurs de surface qui n'ont pu être éliminées de façon très systématique.

8.3 Module M_E

Les corrélations obtenues entre les modules M_{E1} et M_{E2} , et la résistance à la pénétration dynamique q_d font l'objet des figures 8.7 et 8.8. Toutes ces corrélations ont été établies entre les modules M_E mesurés en surface et les résistances à la pénétration mesurées entre 0 et 20 cm, et entre 0 et 30 cm de profondeur. Le choix de ces deux profondeurs provient de la répartition des contraintes sous la plaque de 30 cm utilisée pour l'essai de chargement avec plaque.

La figure 8.7 établit ces deux corrélations logarithmiques entre les modules M_E et q_d pour les mesures réalisées de 0 à 20 cm de profondeur.

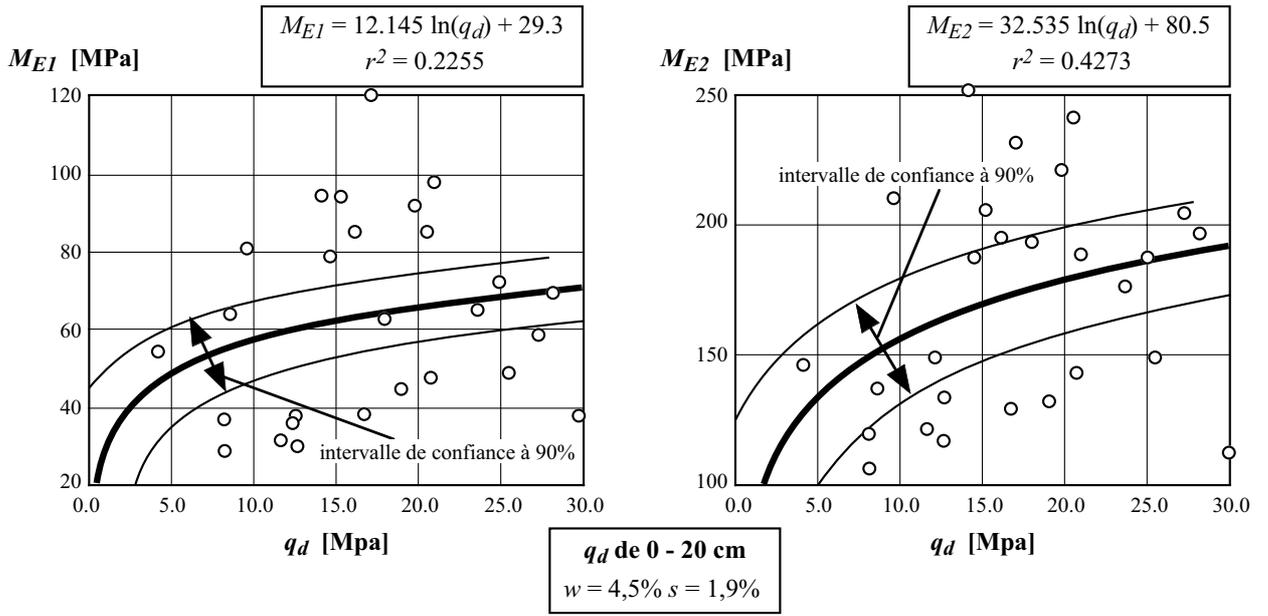


Fig. 8.7 Corrélations M_{E1} et $M_{E2} = f(q_d)$, q_d de 0 à 20 cm de profondeur

La figure 8.8 établit ces mêmes corrélations entre les modules M_E et q_d pour les mesures réalisées de 0 à 30 cm de profondeur.

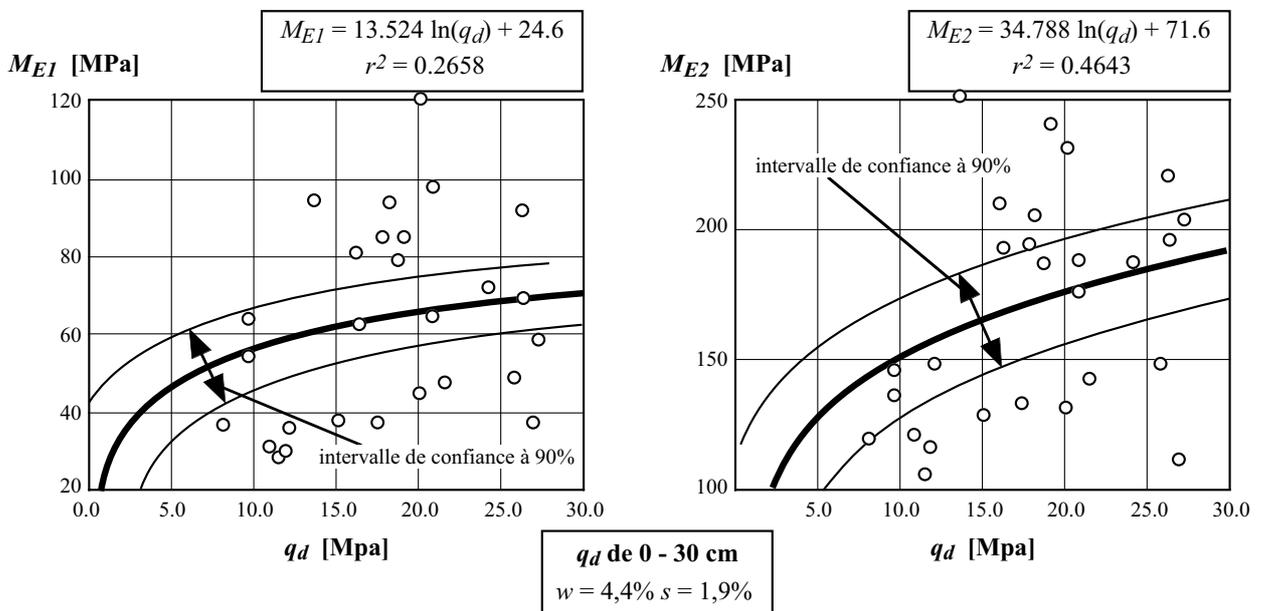


Fig. 8.8 Corrélations M_{E1} et $M_{E2} = f(q_d)$, q_d de 0 à 30 cm de profondeur

Les quatre corrélations des figures 8.7 et 8.8 sont mauvaises. Comme on peut le comprendre facilement, les meilleures concernent le module M_{E2} . Il est clair que les deux valeurs corrélées proviennent de deux essais totalement différents, à savoir :

- un essai de compressibilité à relativement faibles contraintes où le sol n'est pour ainsi dire pas plastifié,
- un essai de poinçonnement réalisé avec un pénétromètre où le sol est dans un état plastique.

Ces très mauvaises corrélations nous ont cependant un peu surpris.

Il est intéressant de comparer ces corrélations entre les modules M_E et la résistance à la pénétration, avec une corrélation entre ces modules M_E et la masse volumique du sol sec. Cette dernière corrélation fait l'objet de la figure 8.9. Dans ce cas la corrélation linéaire donne les meilleurs coefficients de régression. On constate sur la figure 8.9 que ces corrélations ne sont pas meilleures que celles entre les modules M_E et la résistance à la pénétration q_d .

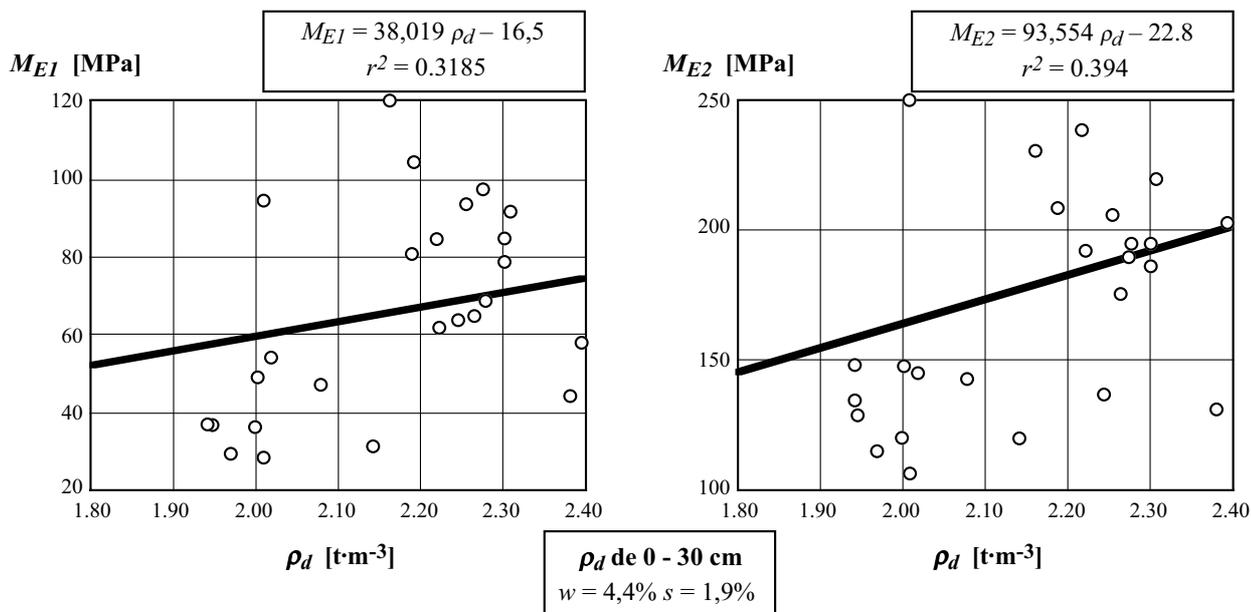


Fig. 8.9 Corrélations M_{E1} et $M_{E2} = f(\rho_d)$, ρ_d de 0 à 30 cm de profondeur

8.4 Tentative de détermination d'un critère de qualification pour les graves

Le résultat des recherches présentées jusqu'à ce paragraphe montre que le pénétromètre dynamique léger est un excellent moyen pour le contrôle du compactage des fouilles en tranchée comme des autres types de remblais. Il peut notamment être utilisé sur des hauteurs de remblais pouvant atteindre 4 m. Pour que son usage généralisé soit possible, il faut encore déterminer des critères de qualités en fonction du type des matériaux de remblai.

Nos essais in situ ont presque tous été réalisés dans des graves I et II (SN 670 120d) bien compactées, dont les teneurs en eau ne varient pas trop. Pour ce type de matériau et cette teneur en eau, il est ainsi possible de tenter d'établir un critère de qualité sur cette base. Pour d'autres matériaux, la méthode proposée au chapitre 9 (norme) pourra être utilisée. Le présent paragraphe indique comment cette méthode peut être appliquée.

Les corrélations présentées ci-dessus montrent que, pour un matériau assez homogène, les corrélations entre la masse volumique du sol sec ρ_d et la résistance à la pénétration dynamique q_d sont bonnes. Elles peuvent donc être utilisées, pour les graves I et II, à la détermination d'un critère de contrôle du compactage basé sur la masse volumique optimale de l'essai Proctor, ceci du moins provisoirement, avant qu'une norme ne fixe avec plus de précision le moyen d'obtenir ce critère. Par contre, les corrélations avec le module M_E sont mauvaises. Elles ne peuvent donc servir à qualifier le compactage des remblais des fouilles en tranchée sur la base de ce module de déformation.

La démarche nécessaire à la détermination du critère de qualité applicable aux graves fait l'objet des figures 8.10 et 8.11. La figure 8.10 montre comment sont définies les deux valeurs propres à ce critère, à savoir la valeur de référence de la pénétration dynamique q_{dR} et la valeur limite q_{dL} .

Ces deux valeurs se réfèrent à un matériau déterminé, dans notre cas les graves I et II.

Dans notre cas, la valeur de référence q_{dR} correspond, sur la courbe de régression, à la moyenne des masses volumiques du sol sec de tous les essais de pénétration. Sur la figure 8.10, sa valeur est de 16 Mpa (arrondi au Mpa) et elle correspond à un $\rho_{d\text{moyen}}$ de 2,15 t·m⁻³.

La valeur limite q_{dL} peut se déterminer de différentes façons. Nous avons choisi une méthode semi-probabiliste. Une valeur minimale admissible de la masse volumique est tout d'abord établie sur la base de l'optimum Proctor standard $\rho_{d\text{opt}}$: par exemple le 85% de cet optimum. Ensuite, la valeur limite q_{dL} est obtenue avec la limite de confiance à 90% de la régression.

Les essais Proctor ont été réalisés dans un moule AASHTO (Ø 102 mm) avec un diamètre maximum des grains de 16 mm alors qu'in situ, le diamètre maximum pouvait atteindre 150 mm. Nous devons donc corriger la valeur moyenne de $\rho_{d\text{opt}}$: 2,06 t·m⁻³ ($w_{\text{opt}} = 8,5\%$) obtenue en laboratoire (voir figures 8.3a, b & c). La masse volumique optimum, correspondant à un diamètre in situ de 100 mm environ, est de (voir norme SN 670 330) :

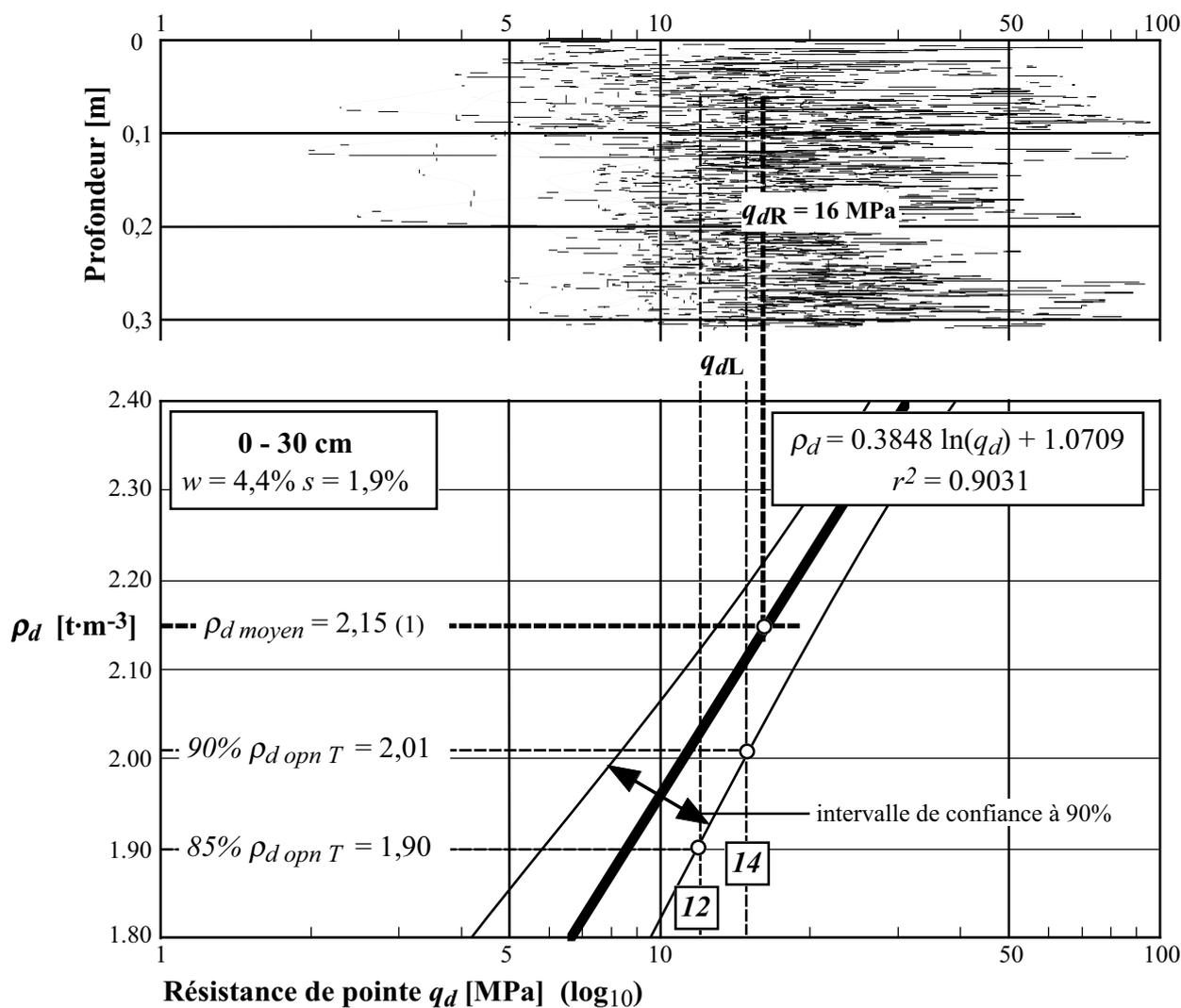
$$\rho_{d\text{opt } T=\text{Ø}100\text{mm}} = \rho_{d\text{opt}} (1 - p/100) + 0,9 \cdot \rho_s (p/100) \quad (8.1)$$

avec : p = fraction grossière éliminée = environ 45 % (voir fig. 8.2)

ρ_s = masse volumique des particules solides = 2,7 t·m⁻³ .

La relation 8.1 conduit à un $\rho_{d\text{ opn } T=\varnothing 100\text{mm}}$ de $2,23 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$, à comparer à la masse volumique moyenne obtenue dans les tranchées par la mesure au nucléomètre, qui est de $2,15 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$. Les essais Proctor n'ont pas été très nombreux ; leurs valeurs moyennes correspondent cependant assez bien à celles qui sont données dans la norme SN 670 010a pour les sols classés selon l'USCS dans les GP : $\rho_{d\text{ opn}} = 2,05 \pm 0,10 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ et $w_{\text{opn}} = 9 \pm 2\%$.

Sur la figure 8.10, le 90% de la masse volumique $\rho_{d\text{ opnn } T=\varnothing 100\text{mm}}$, provenant des essais Proctor réalisés dans le cadre de cette recherche, conduit à une valeur limite q_{dL} de 14 Mpa, alors que le 85% détermine une valeur limite q_{dL} de 12 MPa.



(1) Moyenne dans toutes les tranchées d'essai, de 0 à 30 cm de profondeur

Fig. 8.10 Tentative de détermination d'un critère de qualification pour les graves.

Les fouilles qui ont servi de base à l'établissement de la figure 8.10 étaient toutes bien à très bien compactées. La valeur limite q_{dL} doit donc être choisie en conséquence, à savoir pas trop élevée. Ainsi et provisoirement, nous admettrons pour les graves I et II une valeur de 12 MPa.

Un pénétrogramme sur la profondeur du remblai peut avoir des formes diverses. C'est pourquoi l'application sans exception du critère basé sur la valeur de référence, la valeur limite et la moyenne des résistances q_d sur la hauteur du contrôle, n'est pas possible. Différents cas sont examinés sur la figure 8.11 et des solutions d'interprétation sont proposées. Elles sont notamment basées sur la norme française XP P 94-105.

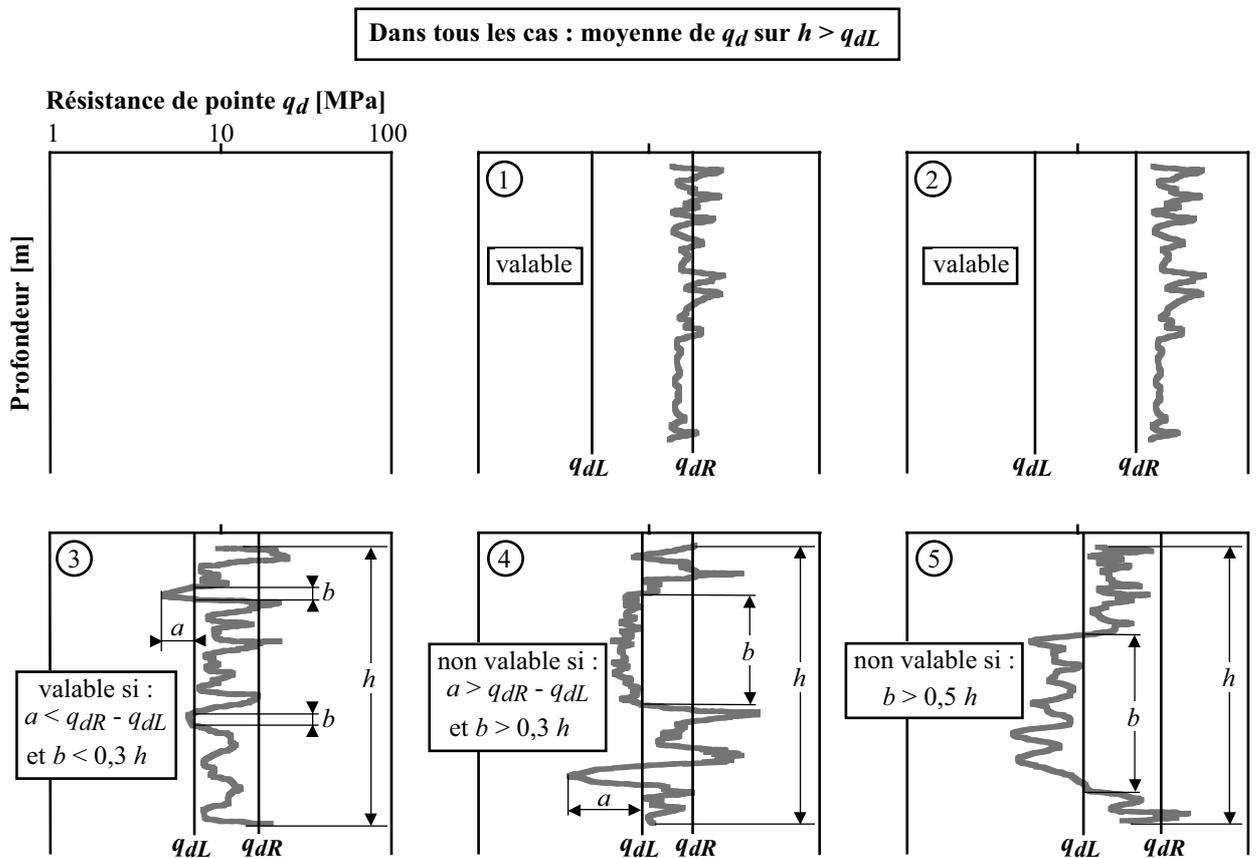


Fig. 8.11 Divers cas de pénétrogrammes avec solutions pour l'application du critère de qualification basé sur les valeurs q_{dR} et q_{dL} .

Il existe bien entendu de nombreux autres cas qui doivent être appréciés en fonction de ceux décrits par la figure 8.11. En outre, pour faciliter l'analyse des cas possibles, un lissage du pénétrogramme obtenu avec un pénétromètre à énergie variable est recommandé. Ce lissage peut être réalisé avec le programme d'enregistrement des données du fabricant du pénétromètre ou avec un tableur, en faisant des moyennes sur des intervalles de profondeurs. En outre, les points aberrants doivent être éliminés.

La décomposition du pénétrogramme en couches de compacité différente peut se faire « à l’œil » ou au moyen d’un algorithme tel que celui proposé par la norme française XP P 94–105.

En résumé et provisoirement, *pour des graves I et II définies par la norme SN 670 120*, le critère du contrôle du compactage des *fouilles en tranchée* réalisé au moyen d’un pénétromètre dynamique léger est le suivant :

Graves I et II selon SN 670 120
 $q_{dL} = 12 \text{ MPa}$
 $q_{dR} = 16 \text{ MPa}$
 Cas particuliers : traitement selon figure 8.11
 Elimination des quelque 5 premiers centimètres du
 pénétrogramme et des points aberrants.

8.5 Application du critère provisoire à 3 pénétrogrammes caractéristiques

Nous allons maintenant tenter d’appliquer ce critère provisoire de contrôle du compactage des graves I et II à 3 pénétrogrammes caractéristiques obtenus, dans le cadre de cette recherche, dans des fouilles en tranchée de la région genevoise. Ces 3 pénétrogrammes font l’objet des figures 8.12, 8.13 et 8.14. Ils proviennent des annexes A.

On admet pour ces exemples que les remblais sont tous constitués de graves I ou II.

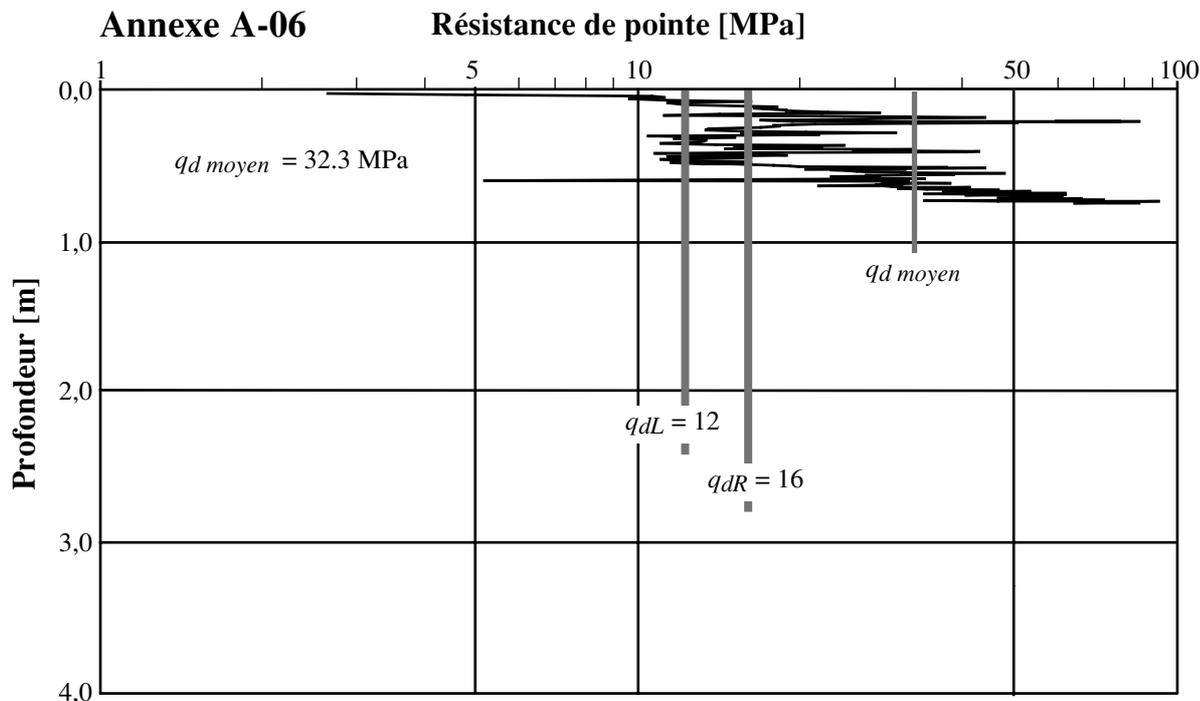


Fig. 8.12 Première application du critère de contrôle (annexe A-06).

Le pénétrogramme de la figure 8.12 répond au critère sur toute sa hauteur à condition que l'on élimine les valeurs aléatoires des premiers centimètres. A environ 0,5 m de profondeur, une ou quelques valeurs sont très faibles ; on doit les considérer comme points aberrants et les éliminer de la moyenne ($q_{d\text{moyen}}$) comme du critère.

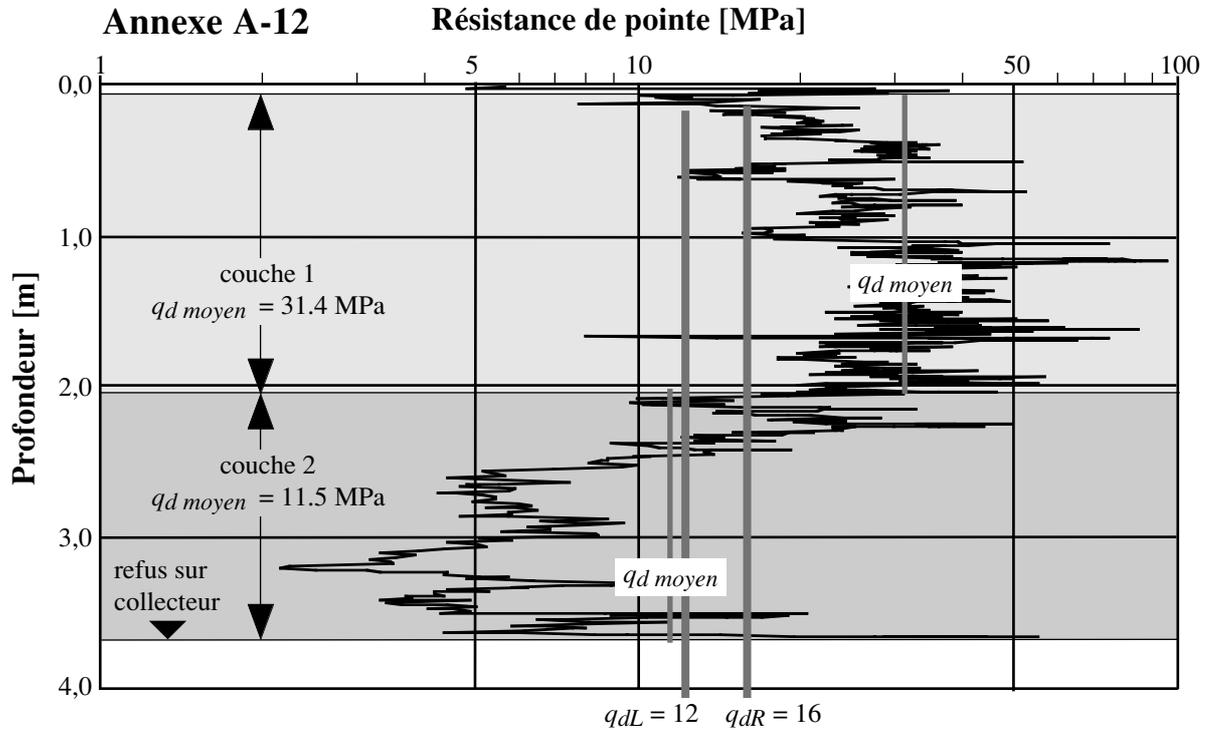


Fig. 8.13 Deuxième application du critère de contrôle (annexe A-12).

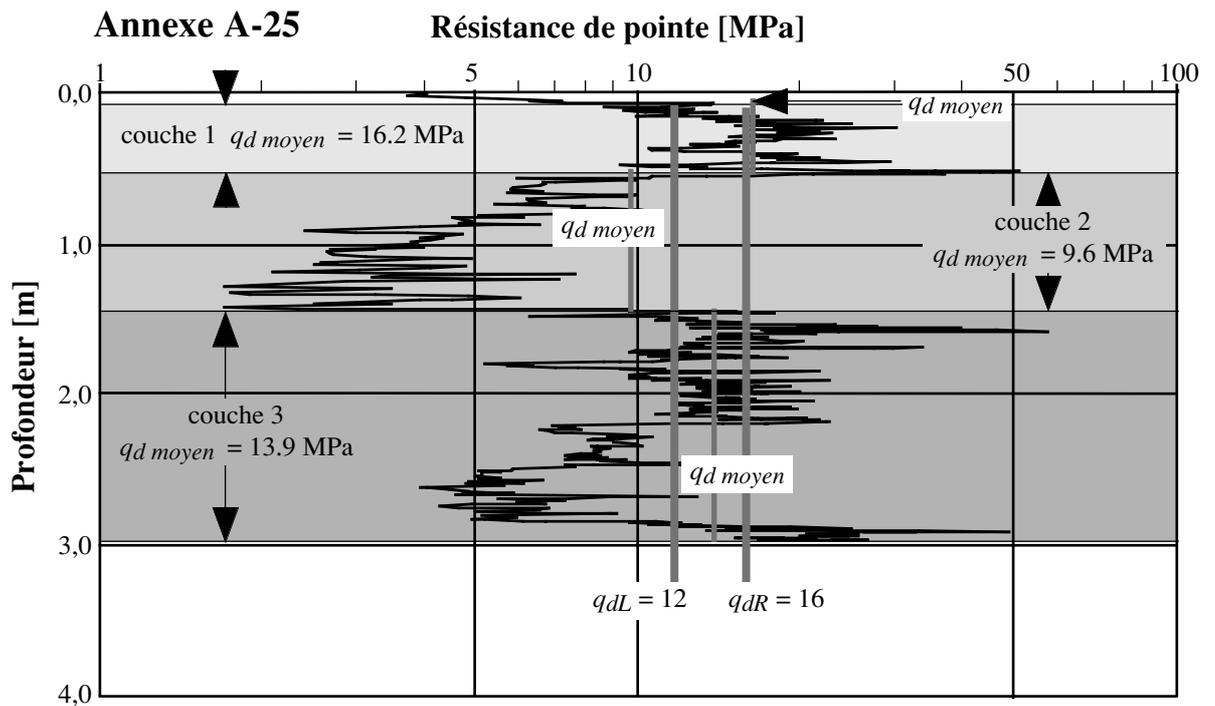


Fig. 8.14 Troisième application du critère de contrôle (annexe A-25).

Le pénétrogramme de la figure 8.13 montre que le remblai peut être décomposé en deux couches de compacités moyennes différentes. Si on élimine, comme permis, les valeurs des premiers centimètres et la valeur aberrante vers 1,7 m de profondeur, la couche supérieure répond au critère de qualification du compactage du remblai. La couche inférieure est, par contre, manifestement mal compactée.

Le remblai de la fouille doit être refait (excavation et nouveau remblaiement avec compactage correct) sur toute sa hauteur.

Le pénétrogramme de la figure 8.14 peut être décomposé en trois couches. En éliminant les valeurs juste sous la surface, la couche supérieure peut être considérée comme bien compactée. En effet, les deux zones du pénétrogramme qui sont inférieures à la valeur limite q_{dL} répondent au cas 3 de la figure 8.11.

La couche 2 est, elle, manifestement mal compactée.

Quant à la couche 3, si son q_d moyen est supérieur à la valeur limite q_{dL} , la zone inférieure du pénétrogramme ne répond pas au cas 3 de la figure 8.11 (ou répond au cas 4 de cette même figure). Cette couche doit donc être considérée comme mal compactée.

Le remblai de la fouille doit être refait sur toute sa hauteur.

9. Bases pour une normalisation en Suisse

9.1 Raison d'une normalisation

Les essais in situ réalisés dans le cadre de cette recherche et, d'une manière générale, l'intérêt que semble rencontrer en Suisse le contrôle du compactage des remblais des fouilles en tranchée, voire d'autres types de remblais en pleine masse, au moyen d'un pénétromètre dynamique le plus léger possible, montrent qu'une certaine normalisation de cet essai est indispensable. Cet essai de contrôle est en effet facile à mettre en œuvre et peu coûteux, alors que les autres moyens de contrôle de la qualité du compactage de ces remblais ne présentent pas les mêmes avantages. Cette normalisation est notamment indispensable pour définir les critères de qualification contractuels qui peuvent faire l'objet de contestations s'ils ne sont pas basés sur une norme décrivant comment les déterminer par des essais d'étalonnage en laboratoire, ceci pour chaque type de matériaux utilisés pour ces remblais.

9.2 Normes proposées

Une première norme pourrait être rédigée pour les appareillages nécessaires à l'exécution de l'essai pénétrométrique à *énergie variable*. Cette norme serait le pendant de la norme SN 670 417 « Essai au pénétromètre dynamique von Moos » qui décrit un pénétromètre à énergie constante.

Cette norme n'est pas indispensable.

Une deuxième norme, à notre avis indispensable, doit décrire comment déterminer les valeurs de référence (les critères de qualification) des pénétromètres dynamiques à énergie variable comme constante pour le contrôle du compactage des remblais des fouilles en tranchée voire d'autres types de remblais en pleine masse, critères basés sur une corrélation entre la résistance de pointe dynamique et la masse volumique optimale du sol. Ces valeurs de référence sont propres à chaque type de matériaux de remblai utilisé.

Cette norme ne s'applique pas au contrôle du compactage des couches de fondation des routes et voies ferrées, pour lesquelles l'essai à la plaque doit rester l'essai contractuel.

Comme ces deux normes décrivent des essais in situ, c'est la commission de l'Union des professionnels suisses de la route (VSS) 5.07 : essais in situ, qui devrait les rédiger.

9.3 Structure de la norme sur les valeurs de référence et l'étalonnage des matériaux

Titre : Contrôle de la qualité du compactage des fouilles en tranchée et des remblais par des pénétromètres dynamiques légers

A Généralités

1. *Domaine d'application*
2. *Objet*
3. *But*
4. *Définitions*

Définitions de tous les termes et symboles utilisés dans la norme.

B Appareillages

5. *Pénétrromètre dynamique à énergie constante*

Faire référence à la norme SN 670 417 « Essai au pénétromètre dynamique von Moos ».

En plus : indiquer comment utiliser ce pénétromètre sans le trépied pour le contrôle du compactage des remblais de fouilles en tranchée.

6. *Pénétrromètre dynamique à énergie variable*

Faire référence aux procédures des fabricants ou à des normes d'autres pays.

C Procédure des essais

7. *Contrôle du compactage par rapport à une valeur limite de référence (q_{dL})*

C'est la fonction B de la norme française XP P 94-105. La norme française sur le contrôle du compactage par pénétromètre à énergie variable décrit comment traiter les diverses anomalies que l'on peut rencontrer dans un diagramme pénétrométrique. Il serait utile de reprendre ces modes de traitement dans la norme suisse (voir fig. 8.11).

8. *Contrôle du compactage par comparaison avec les résultats obtenus sur une planche d'essais*

C'est la fonction C de la norme française.

9. *Evaluation de l'épaisseur des couches de compacité différente*

C'est la fonction A de la norme française. Prévoir une évaluation « à l'œil » et, éventuellement, une évaluation par un algorithme semblable à celui de la norme française (on peut faire mieux car, dans la norme française, la valeur q_b , à savoir la résistance à la pénétration en haut de la couche sous-jacente, est mal définie).

10. *Exploitation des résultats*

Protocole, etc.

Il manque des exemples dans la norme française, exemples qu'il faudra introduire dans la norme suisse.

D Etalonnage des matériaux

11. *Appareillage pour l'étalonnage des matériaux*

En principe, le moule décrit par la figure 6.3 et un moule de plus grandes dimensions pour le pénétromètre von Moos.

Pour toute la Suisse, un seul appareillage pour l'étalonnage des matériaux serait suffisant. Il faudrait donc s'entendre avec un des laboratoires suisses de géotechnique ayant une accréditation de type *c*. Le LMS-EPFL serait en principe d'accord pour exécuter ces essais.

12. *Procédure d'étalonnage des matériaux*

On pourrait utiliser les mêmes méthodes d'étalonnage que dans la norme française, car elles ont déjà fait leurs preuves. Cependant la norme française manque cruellement d'exemples, qu'il faudra introduire dans la future norme suisse.

E Bibliographie

10. Conclusions

Cette recherche a montré que le pénétromètre dynamique léger à énergie variable comme le pénétromètre à énergie constante, tels que décrits au chapitre 3, peuvent être utilisés avantageusement pour le contrôle du compactage des remblais des fouilles en tranchée réalisés au moyen de matériaux graveleux, sur une profondeur pouvant atteindre 4 m pour le pénétromètre léger à énergie variable de type *PANDA* et beaucoup plus pour un pénétromètre à énergie constante de type *von Moos*.

Ce nouveau moyen permettra ainsi de combler une lacune dans les moyens de contrôle du compactage de ces fouilles. L'enquête menée pour connaître les moyens utilisés en Suisse pour ce contrôle a en effet démontré qu'il n'était, dans la plupart des cas, réalisé que sur les 3 à 5 décimètres supérieurs du remblai, la plupart du temps par un essai de plaque.

Cependant, pour utiliser ce moyen facile à mettre en œuvre et peu coûteux, il est indispensable d'établir des critères de contrôle de la qualité du remblai basés sur des corrélations entre la résistance de pointe dynamique et la masse volumique optimale du sol. En effet, seule la masse volumique peut entrer en considération pour ces corrélations, car les essais réalisés dans le cadre de cette recherche ont montré que les corrélations entre la résistance à la pénétration et d'autres paramètres étaient mauvaises, alors que celles avec la masse volumique étaient bonnes.

L'établissement d'une norme décrivant la méthode de détermination, sur la base d'essais en laboratoire, des critères de contrôle à appliquer aux matériaux de remblai est ainsi nécessaire.

Par la suite, les principaux matériaux utilisés pour le remblayage des fouilles pourront être classés en quelques catégories, qui auront chacune leur propre critère de contrôle pénétrométrique.

Une deuxième norme décrivant le pénétromètre dynamique à énergie variable pourrait être aussi rédigée, mais elle n'est pas indispensable.

Provisoirement, et *uniquement pour les graves I et II selon la norme SN 670 120 utilisées pour les remblais de fouilles en tranchée*, les nombreux essais réalisés sur des remblais de fouilles en tranchée dans le cadre de la présente recherche permettent de proposer les valeurs suivantes comme critère provisoire de contrôle :

q_{dL} = valeur limite (minimale) de la résistance à la pénétration = 12 MPa

q_{dR} = valeur de référence de la résistance à la pénétration = 16 Mpa.

Les cas particuliers sont à traiter au moyen de la figure 8.11, et les quelque 5 cm supérieurs du pénétrogramme doivent être éliminés.

Enfin, il n'est pas inutile de signaler que les pénétromètres dynamiques peuvent aussi être utilisés pour le contrôle du compactage de remblais autres que ceux des fouilles en tranchée. Ils sont notamment intéressants pour le contrôle du compactage des digues en terre.

Ils ne peuvent cependant remplacer l'essai à la plaque pour le contrôle du compactage des couches de fondation des routes et voies ferrées.

Symboles et abréviations

Des dimensions sont données à titre d'exemple ; elles peuvent être cependant différentes.

A	= section de la pointe du pénétromètre [m ²]
CBR	= California Bearing Ratio [%]
CPT	= Cone Penetration Test (pénétromètre statique)
c_u	= cohésion apparente (non drainée) [kPa]
C_{ud}	= uniformité de la courbe granulométrique [-]
C_{cd}	= courbure de la courbe granulométrique [-]
DPL	= Dynamic Probing Test – Light
DPM	= Dynamic Probing Test - Medium
DPL	= Dynamic Probing Test - Heavy
D_x	= diamètre à x % de la courbe granulométrique [mm]
e	= pénétration moyenne pour un coup de la masse frappante d'un pénétromètre [m]
g	= accélération de la pesanteur [m·s ⁻²]
h	= hauteur de chute du mouton [m]
I_P	= indice de plasticité [%]
M	= masse frappante (mouton) [kg]
M_E	= module de déformation de l'essai de plaque [kPa ou Mpa] (ou E_v)
M_{E1}	= module M_E au premier chargement [kPa ou Mpa]
M_{E2}	= module M_E au rechargement [kPa ou Mpa]
N_x	= nombre de coups pour un enfoncement de x cm
N_{M20}	= N_x du pénétromètre dynamique von Moos
N_{SPT}	= résistance à la pénétration du pénétromètre SPT = nombre de coups pour 30 cm d'enfoncement
P	= masse morte entraînée (enclume, tiges, pointe, capteur, etc.) [kg]
p_0	= contrainte initiale préexistante autour du trou du pressiomètre
p_l	= pression limite de l'essai pressiométrique
q_c	= résistance de pointe du pénétromètre statique [kPa ou MPa] (CPT)
q_d	= résistance de pointe du pénétromètre dynamique [kPa ou MPa]
q_{d0}	= q_d à la surface du sol [kPa ou MPa]
q_{d1}	= q_d en profondeur (sous la profondeur critique z_c) [kPa ou MPa]
q_{dR}	= valeur de référence de la résistance à la pénétration q_d [kPa ou MPa] propre à un matériau déterminé (classé)
q_{dL}	= valeur limite (minimale) de la résistance à la pénétration q_d [kPa ou MPa] propre à un matériau déterminé (classé)
q_u	= résistance à la compression simple [kPa ou MPa]

ρ	= masse volumique (humide) [t·m ⁻³]
ρ_d	= masse volumique du sol sec [t·m ⁻³]
$\rho_{d\,opt}$	= masse volumique du sol sec à l'optimum Proctor, essai standard [t·m ⁻³]
$\rho_{d\,optm}$	= masse volumique du sol sec à l'optimum Proctor, essai modifié [t·m ⁻³]
r	= coefficient de corrélation
s	= écart type
S_r	= degré de saturation [%]
SN	= Schweizer Norm = norme suisse
SPT	= Standard Penetration Test
w	= teneur en eau massique [%]
w_L	= limite de liquidité [%]
w_{opt}	= teneur en eau à l'optimum Proctor, essai standard [%]
w_{optm}	= teneur en eau à l'optimum Proctor, essai modifié [%]
z_c	= profondeur critique [m]

Bibliographie

- CASSAN M. 1988. *Les essais in situ en mécanique des sols. Tome I Réalisation et interprétation*. Eyrolles.
- BACCONNET C., BOISSIER D., GOURVÈS R. 1996. Aide au diagnostic d'une digue en terre par pénétrométrie. *14^e Rencontres Universitaires de Génie Civil – Clermont-Ferrand* 9-10 mai.
- CHAIGNEAU L., GOURVÈS R. 1999. *Contrôle de compactage au pénétromètre dynamique et utilisation d'une base de données*. Rapport interne CUST, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- CHAIGNEAU L., GOURVÈS R., BACCONNET C. 2000. Compaction control with variable energy dynamic penetrometer. *SIMSGE / ETC11 Aspect géotechnique dans la conception et la construction des chaussées et voies ferrées*, Paris.
- CHAIGNEAU L., GOURVÈS R., BOISSIER D. 2000. Compaction control with a dynamic cone penetrometer. *Int. Workshop on compaction of soils, granulates and powders, Innsbruck*, 28-29 February.
- DEPLAGNE F., BACCONNET C., ROYET P. 1993. Intérêt du pénétromètre dynamique léger pour le contrôle du compactage des barrages en terre, *Comptes rendus des journées nationales d'étude AFEID-CFGB: Petits barrages*, Bordeaux, février.
- GOURVÈS R., BARJOT R. 1995. The Panda ultralight dynamic penetrometer. *Proceeding of the XI European Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.* Vol. 3 pp. 83-88, Copenhagen, May.
- GOURVÈS R., ZHOU S. 1997. The in-situ characterization of mechanical properties of granular media with the help of penetrometer. *3rd Int. Conf. on Micromechanics of granular media*, pp. 57-50, Durham USA.
- GOURVÈS R., ZHOU S. 1999. Contrôle du compactage des remblais à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable. *Proceeding of the XII European Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.* pp. 351-356, Amsterdam, June.
- JURAN I., BOCHEREL P., SCHAACK PH., ROUSSET A. 1999. A soil compaction control technology. Assessment and demonstration. *APWA International Public Works Congress*, Sept. 19-22, Urban Utility Center, Polytechnic University, Brooklyn NY USA.
- LARÉAL P., SANGLERAT G., GIÉLLE J. 1974. Comparaison des essais de pénétration effectués avec différents pénétromètres statiques et dynamiques. *Symp. Européen sur les essais de pénétration*. Stockholm.
- LANGTON D.D. 1999. The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. *Ground Engineering*, Sept. 1999.
- LEPETIT L., BACCONNET C., BOISSIER D., GOURVÈS R. 1999. Geostatistical study of the Chinese loess. *Applic. of Statistics and Probability*, Sydney, Australia, 12-15 Dec.
- SANGLERAT G. 1965. *Le pénétromètre et la reconnaissance des sols*. Dunod.
- VACHON C. 1998. The development of the Panda in the United State. *Mémoire d'ingénieur CUST, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand*.

NORMALISATION FRANÇAISE NF P 98-331 SEPTEMBRE 1994. Chaussées et dépendances. Tranchées : ouverture, remblayage, réfection.

NORMALISATION FRANÇAISE XP P 94-063 AOÛT 1997. Reconnaissance des sols. Contrôle du compactage. Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante.

NORMALISATION FRANÇAISE XP P 94-105 MAI 2000. Reconnaissance des sols. Contrôle de la qualité du compactage. Méthode au pénétromètre à énergie variable.

ZHOU S. 1997. Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable type « Panda ». *Thèse Doctorat de l'Université Blaise Pascal*, France.

Annexes A : Fiches d'essais « Possibilités »

Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-01

Lieu de l'essai: 39/41-B1

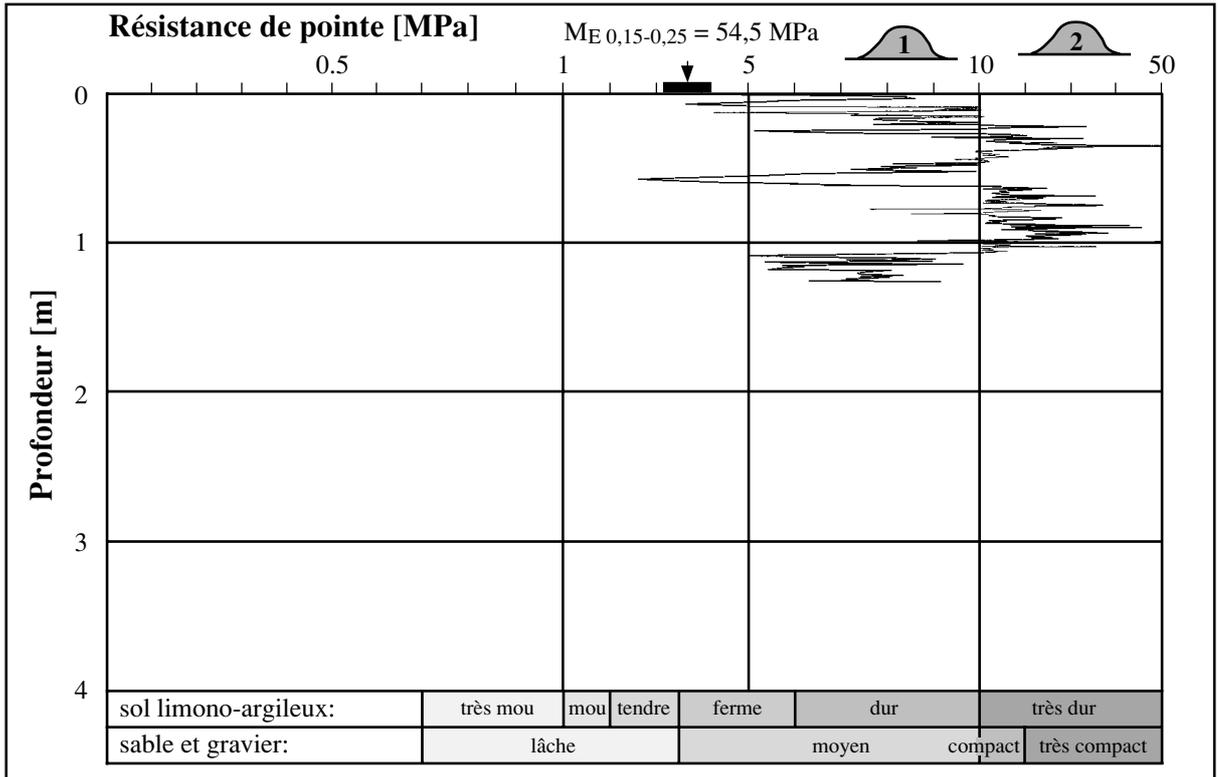
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage remblais sous immeuble

Date: 1996-11-15

Matériau de remblayage: grave I

Ømax: 80 mm

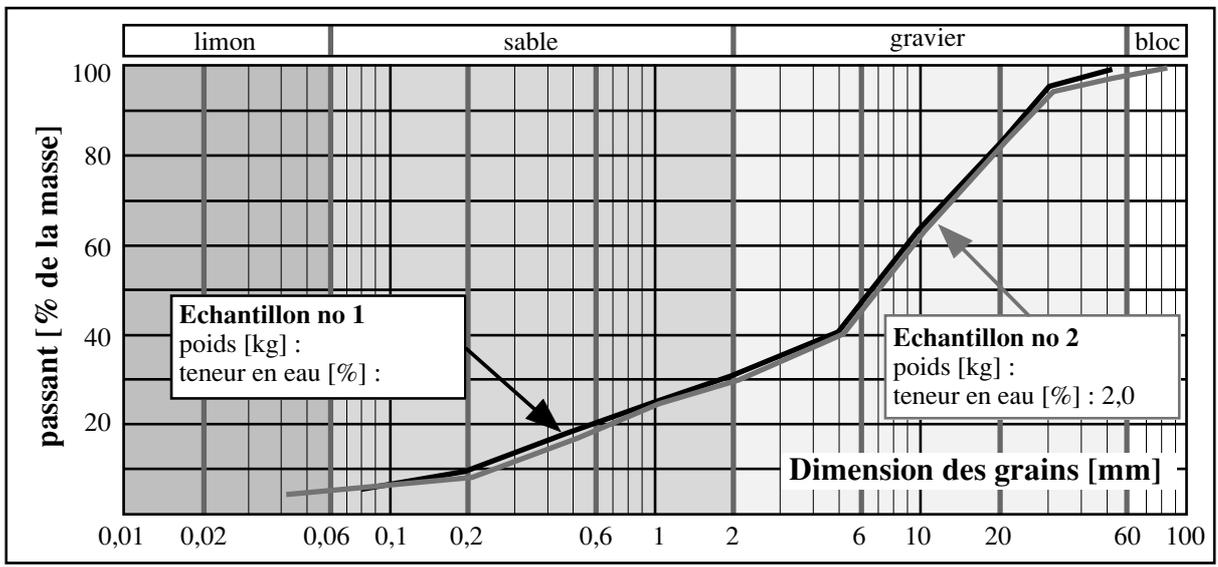


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E 0,15-0,25} = 87,5 \text{ MPa}$

Echant. prélevé au tas: **3**

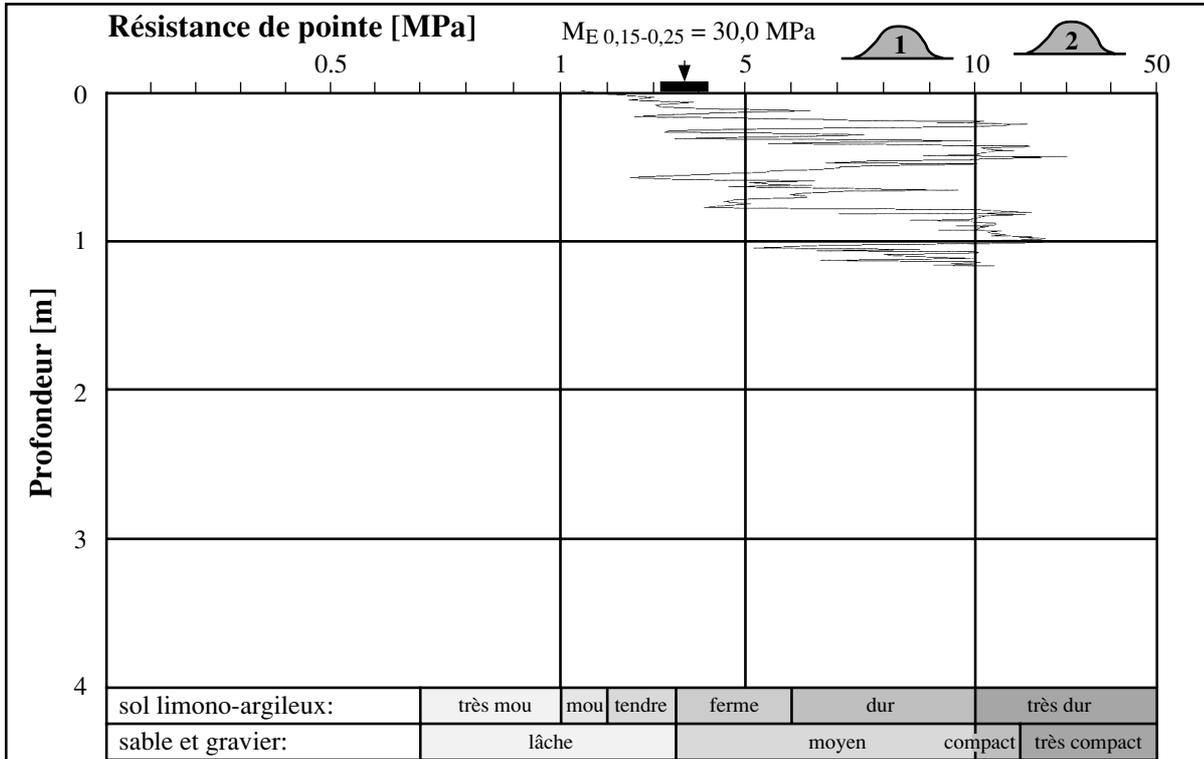


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-02

Lieu de l'essai: 39/41-B2 Type du PDL: Panda 2 cm²
 But de l'essai: Contrôle compactage remblais sous immeuble Date: 1996-11-15
 Matériau de remblayage: grave I Ømax: 80 mm

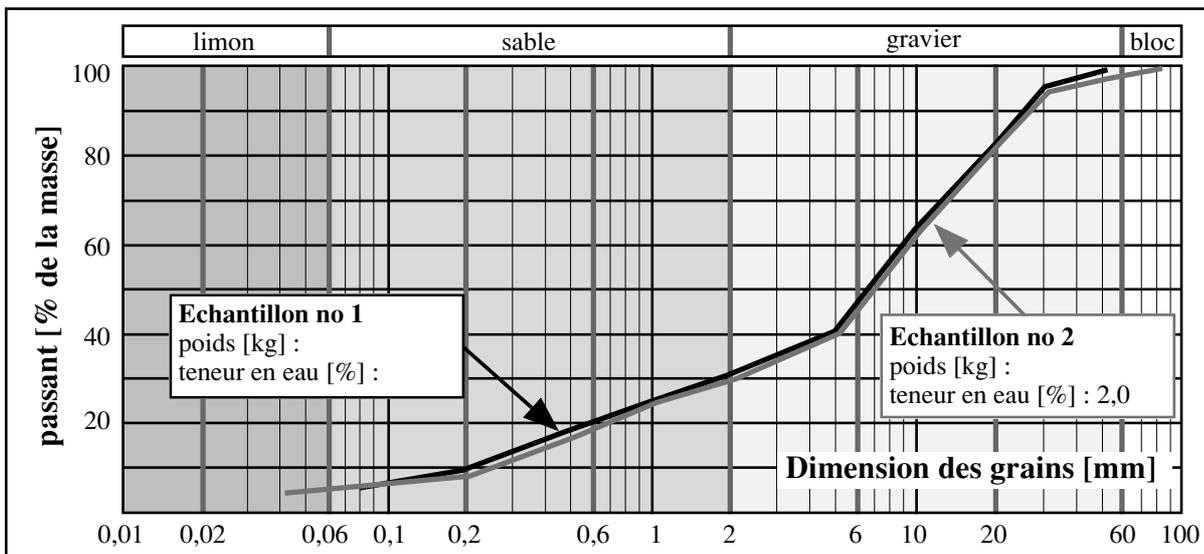


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E0,15-0,25} = 87,5$ MPa

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-03

Lieu de l'essai: CFFCEG-1

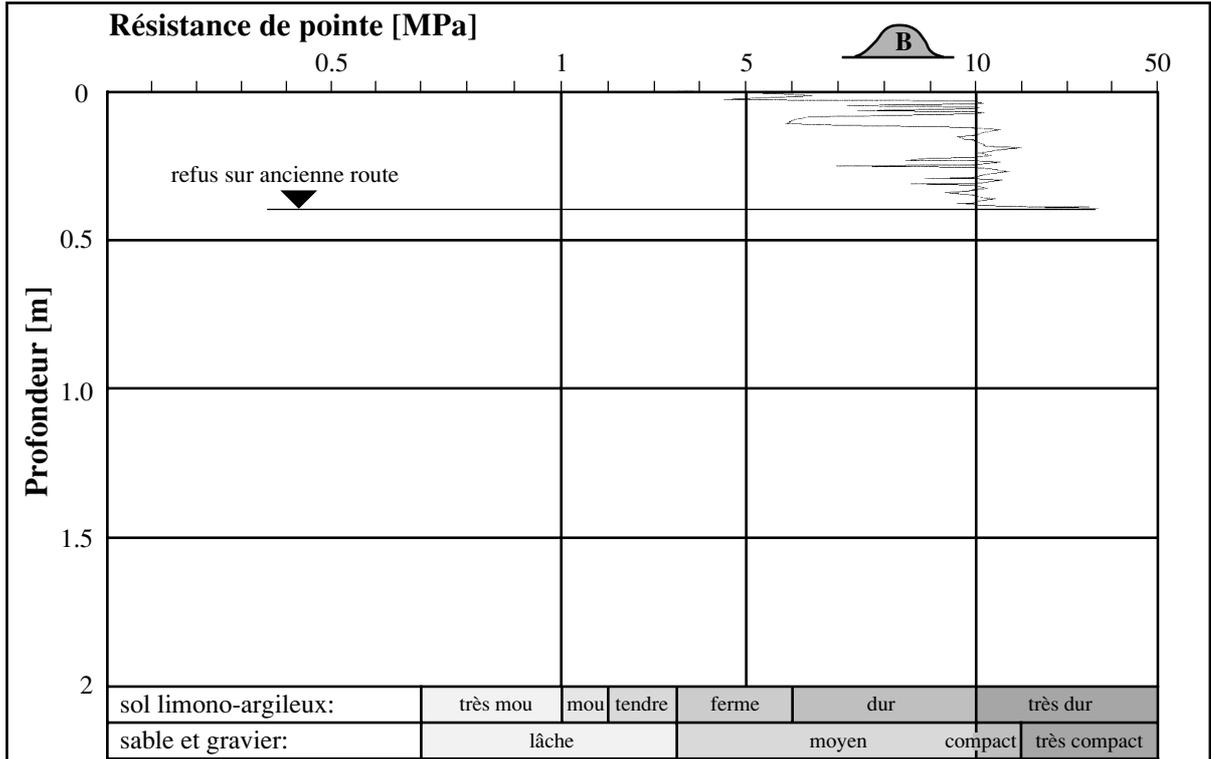
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage

Date: 1997-09-18

Matériau de remblayage: Moraine graveleuse (Alluvion ancienne)

Ømax: 100 mm

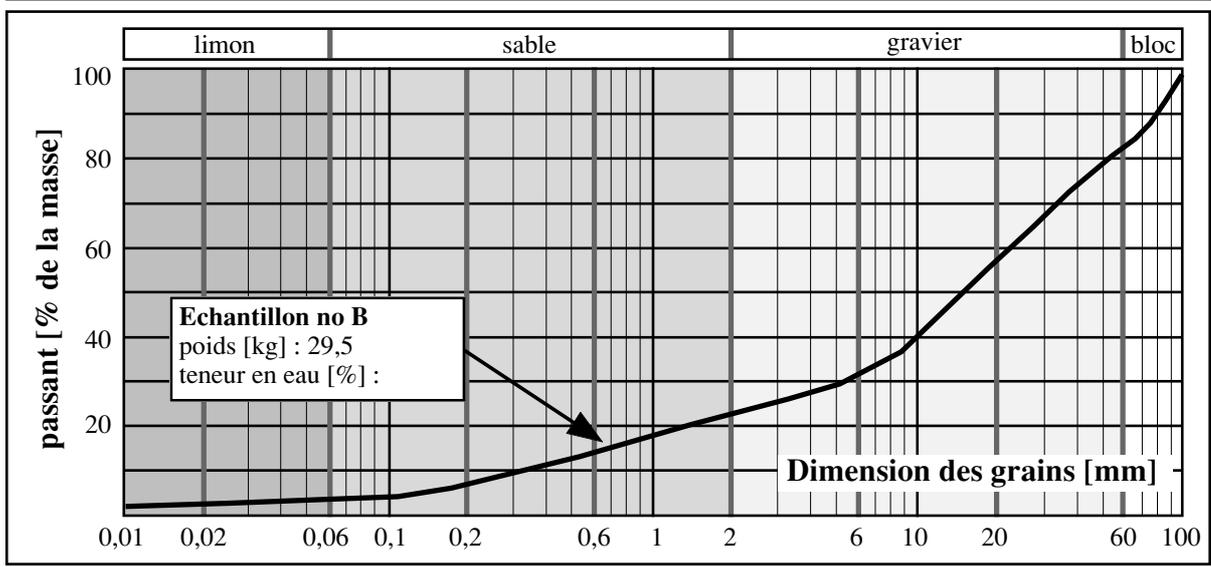


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E: M_E 0,15-0,25 = 87,5 MPa

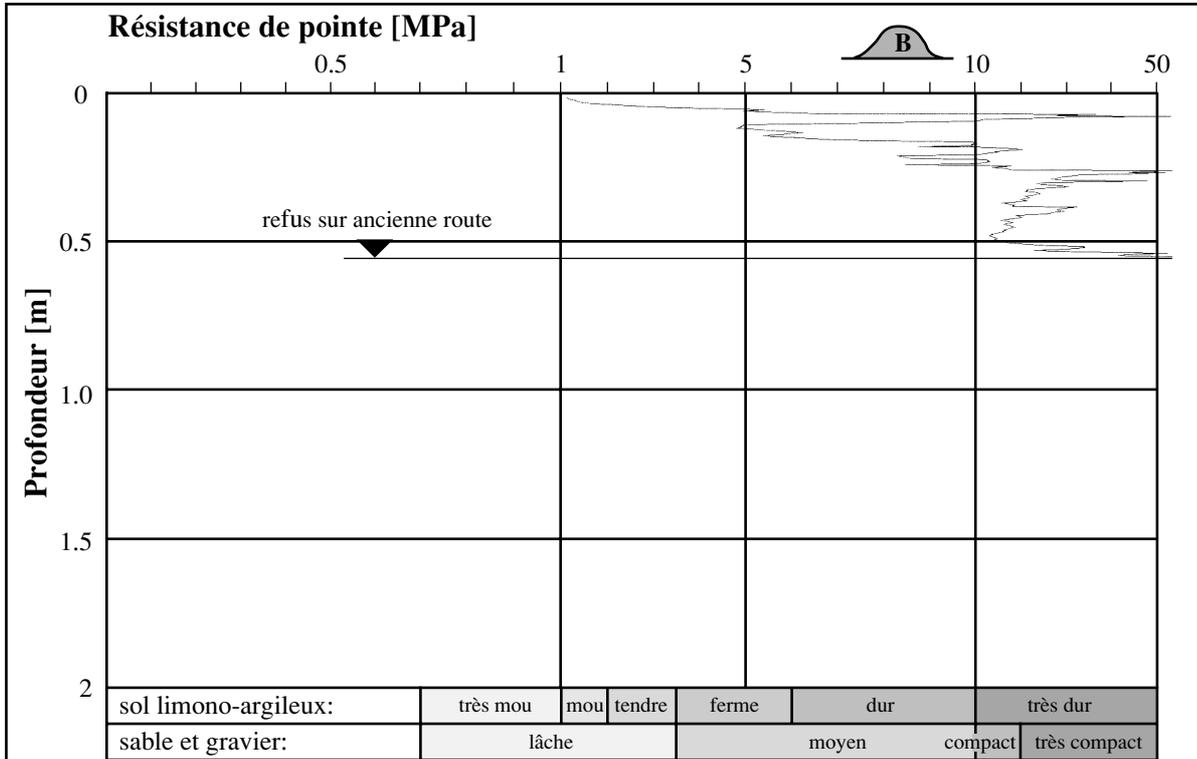
Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-04

Lieu de l'essai: CFFCEG-2 **Type du PDL:** Panda 2 cm²
But de l'essai: Contrôle compactage **Date:** 1997-09-18
Matériau de remblayage: Moraine graveleuse (Alluvion ancienne) **Ømax:** 100 mm

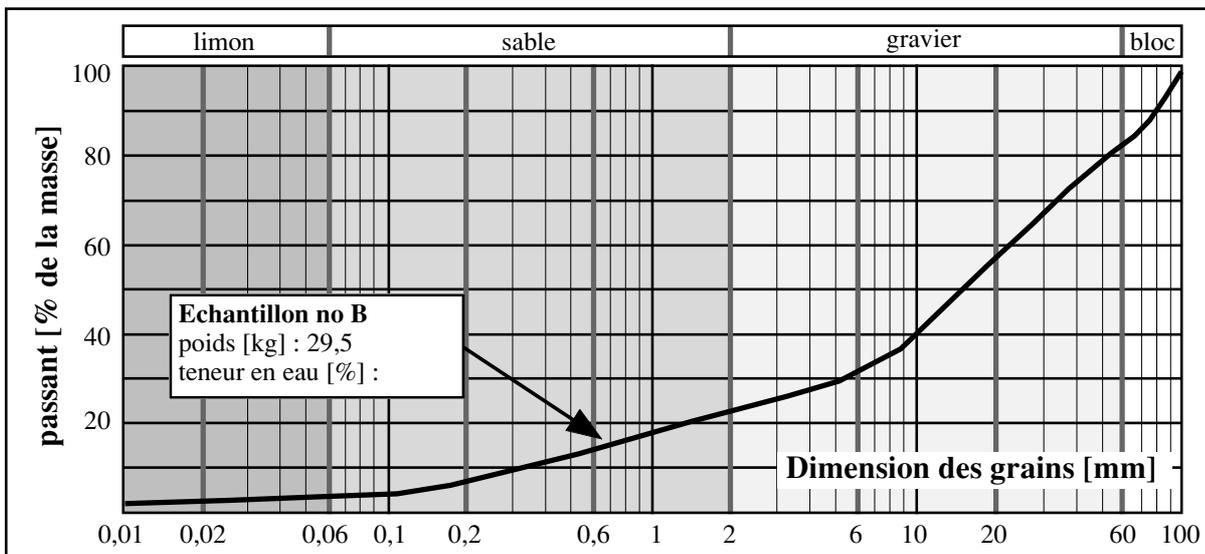


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai ME : ME_{0,15-0,25} = 87,5 MPa

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-05

Lieu de l'essai: CFFCEG-3

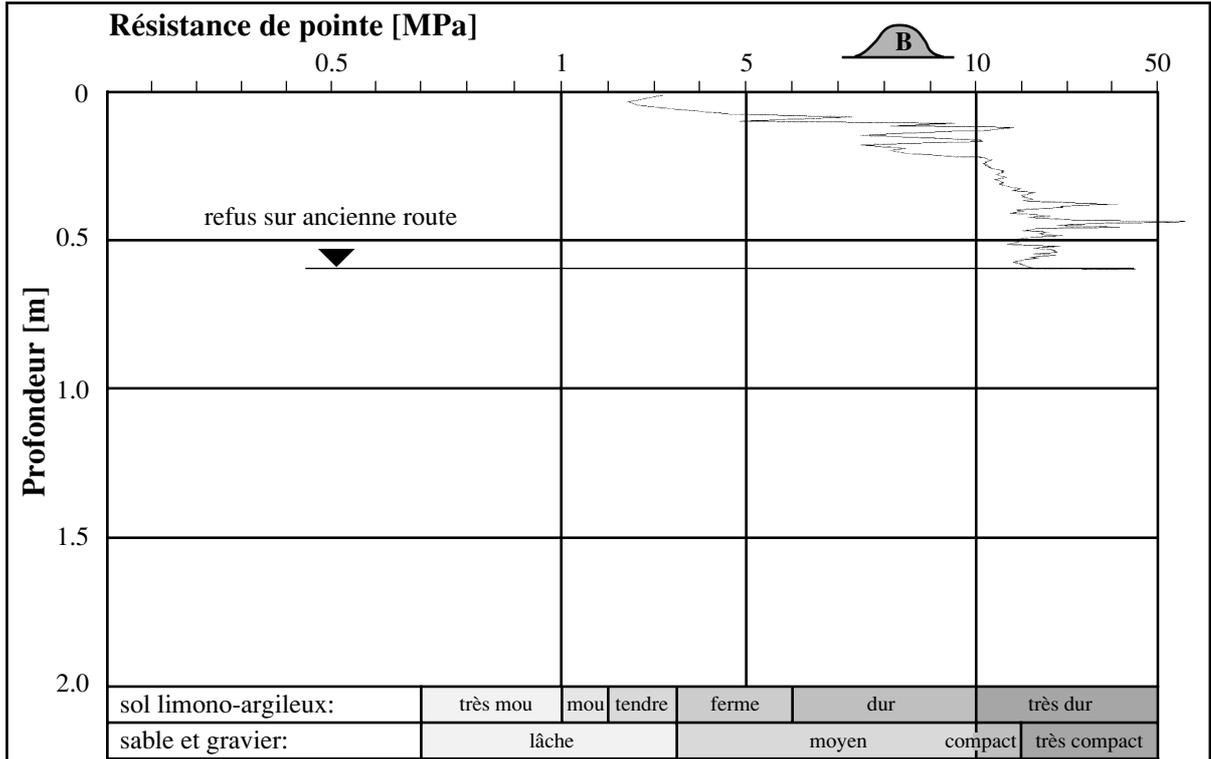
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage

Date: 1997-09-18

Matériau de remblayage: Moraine graveleuse (Alluvion ancienne)

Ømax: 100 mm

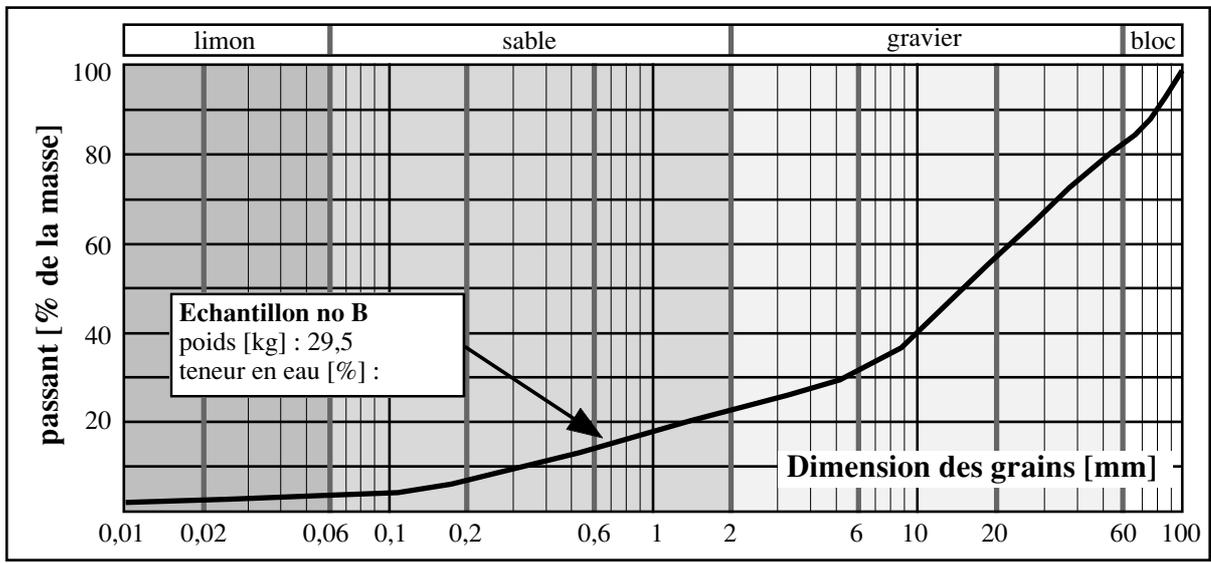


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai ME : ME_{0,15-0,25} = 87,5 MPa

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-06

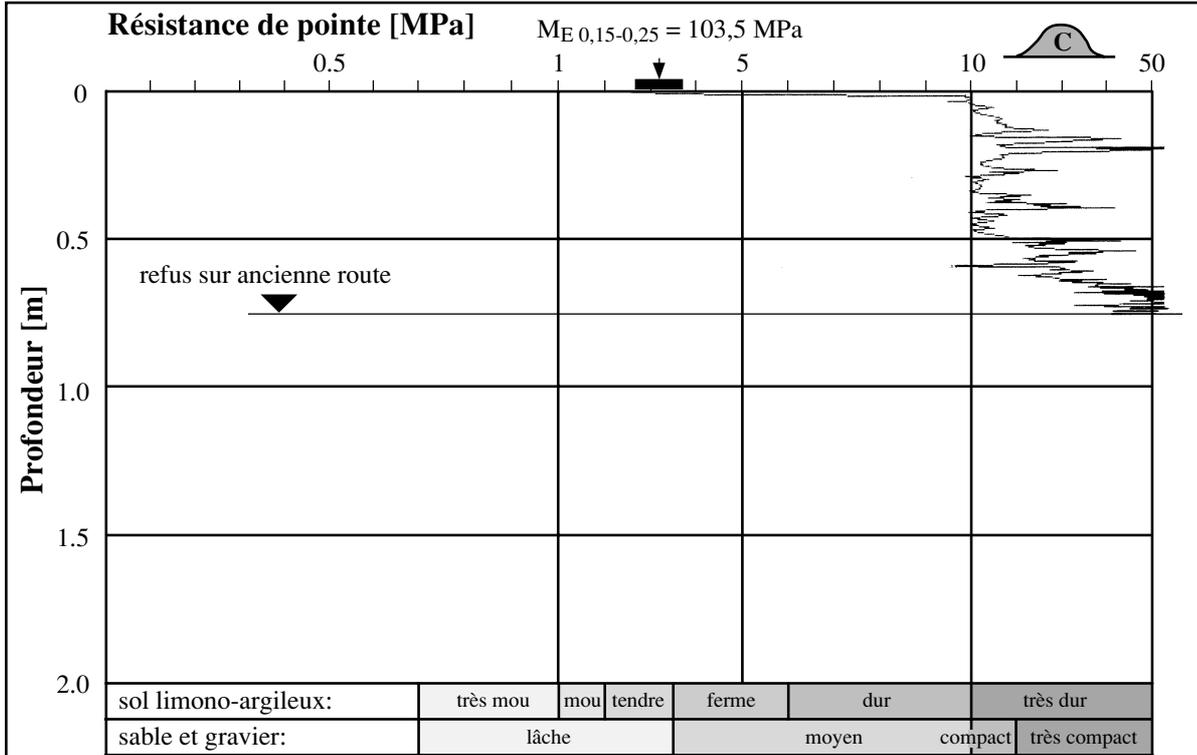
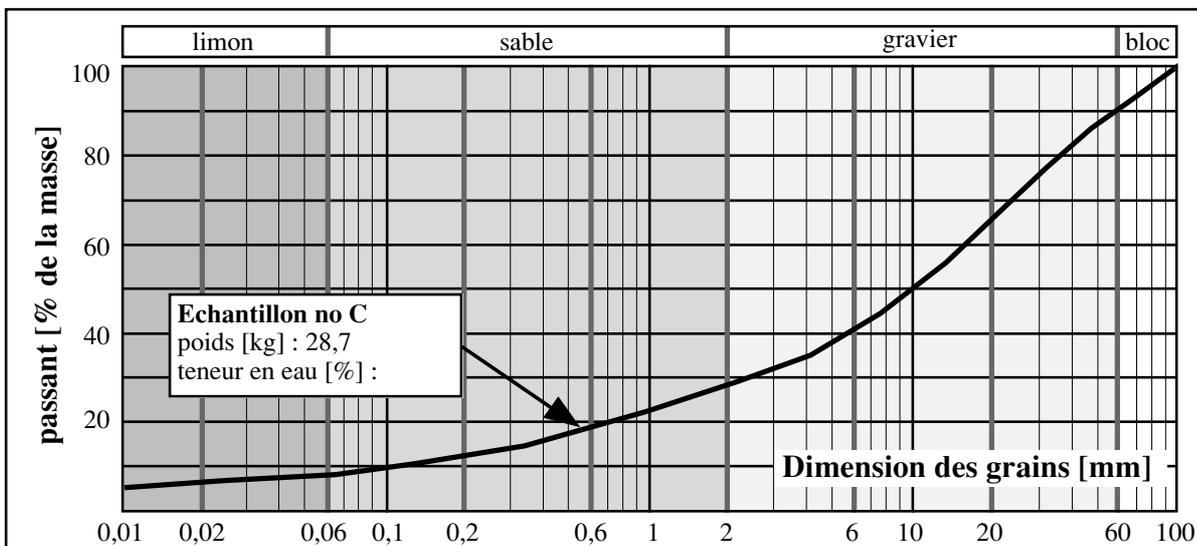
Lieu de l'essai: CFFCEG-2

Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage

Date: 1997-10-03

Matériau de remblayage: Moraine graveleuse (Alluvion ancienne) Ømax: 100 mm

Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$ Echant. prélevé au tas: **3**

Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-07

Lieu de l'essai: CFFCEG-3

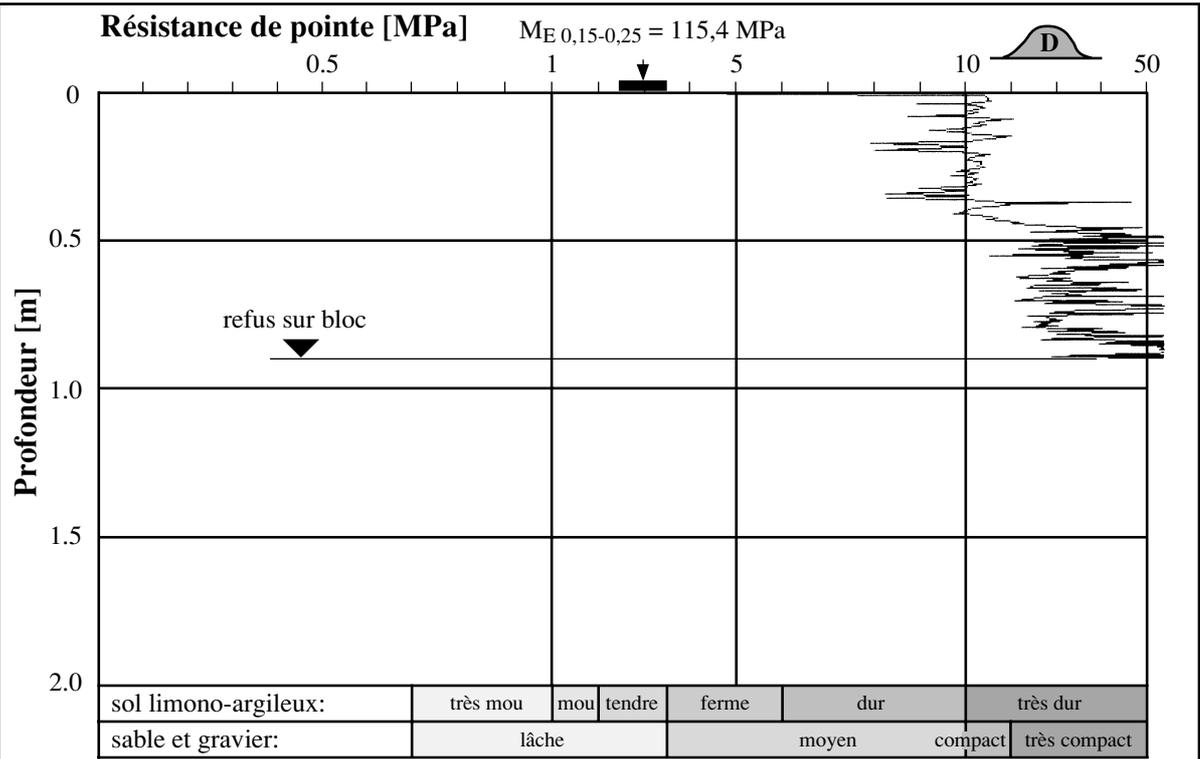
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage

Date: 1997-10-06

Matériau de remblayage: Moraine graveleuse (Alluvion ancienne)

Ømax: 100 mm

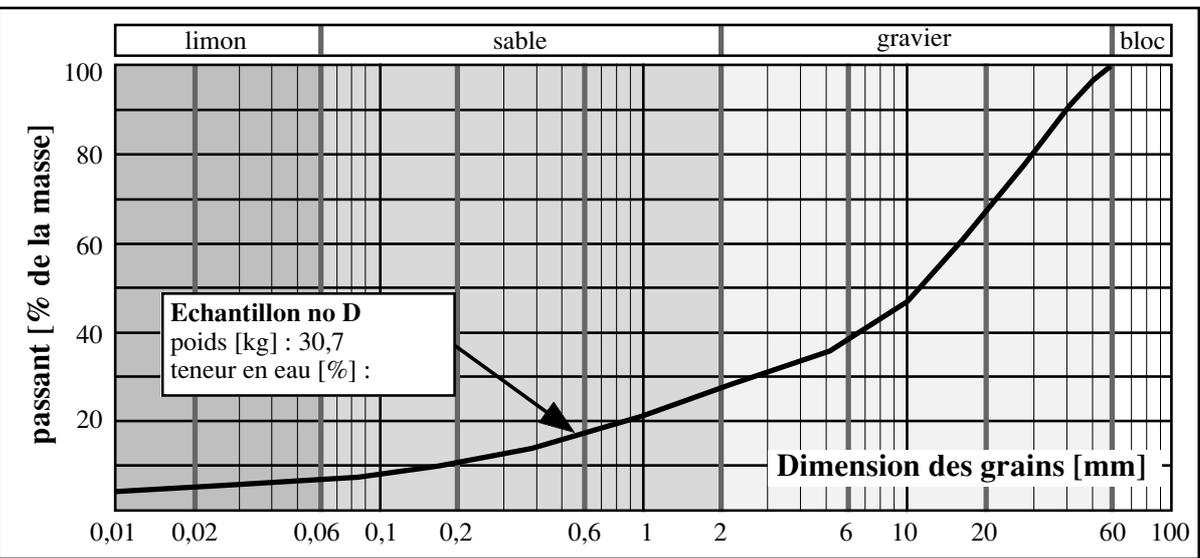


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E0,15-0,25} = 87,5$ MPa

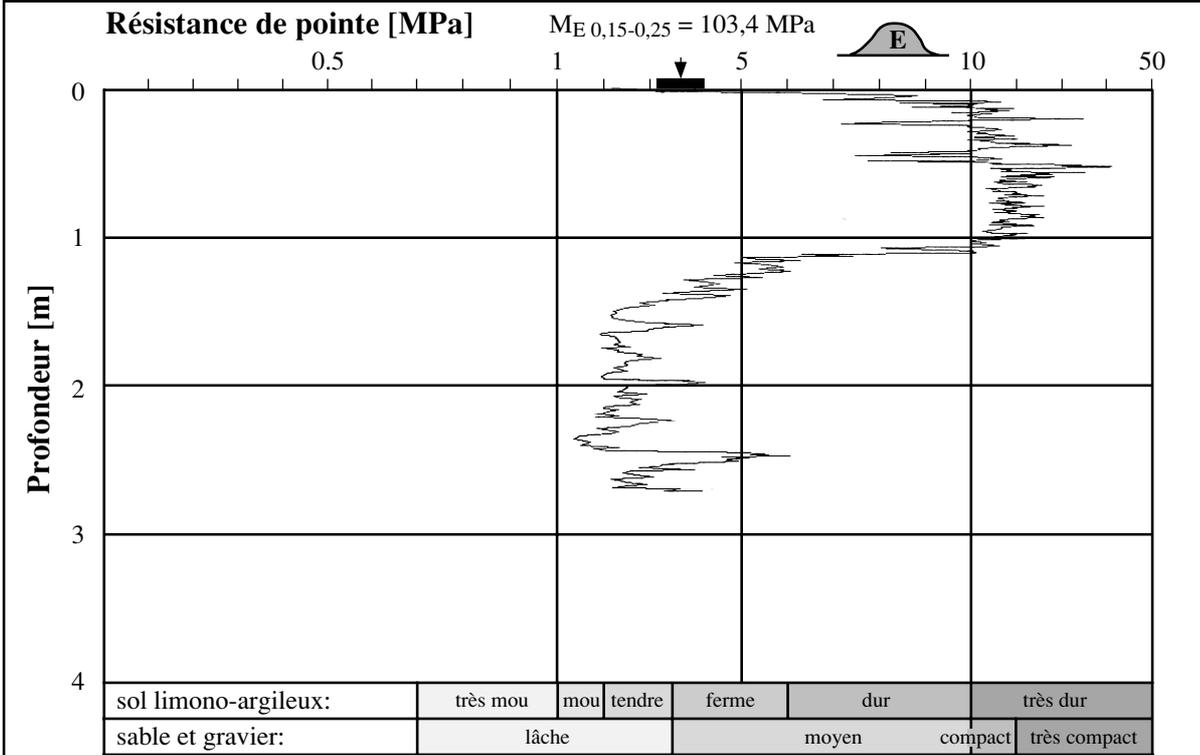
Echant. prélevé au tas: **3**



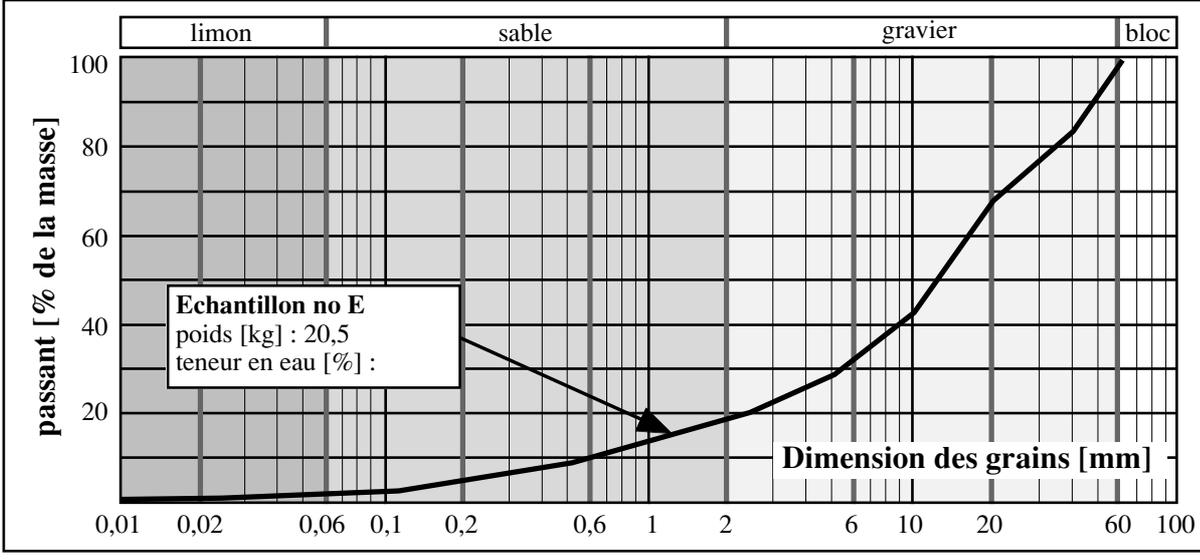
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
 Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-08

Lieu de l'essai: PM3 **Type du PDL:** Panda 2 cm²
But de l'essai: Contrôle compactage fouille en fendue **Date:** 1997-10-16
Matériau de remblayage: grave II **Ømax:** 80 mm



Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**
 Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$ Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-09

Lieu de l'essai: PM4

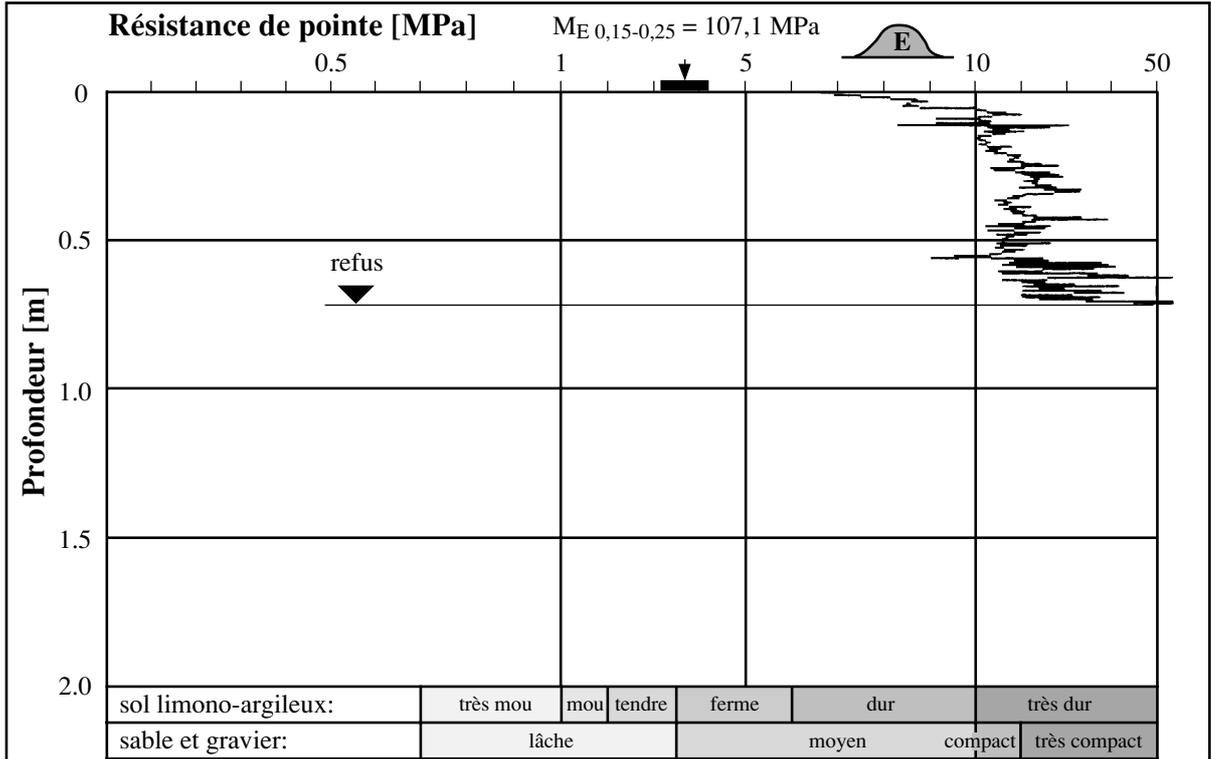
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille en fendue

Date: 1997-10-16

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: 80 mm

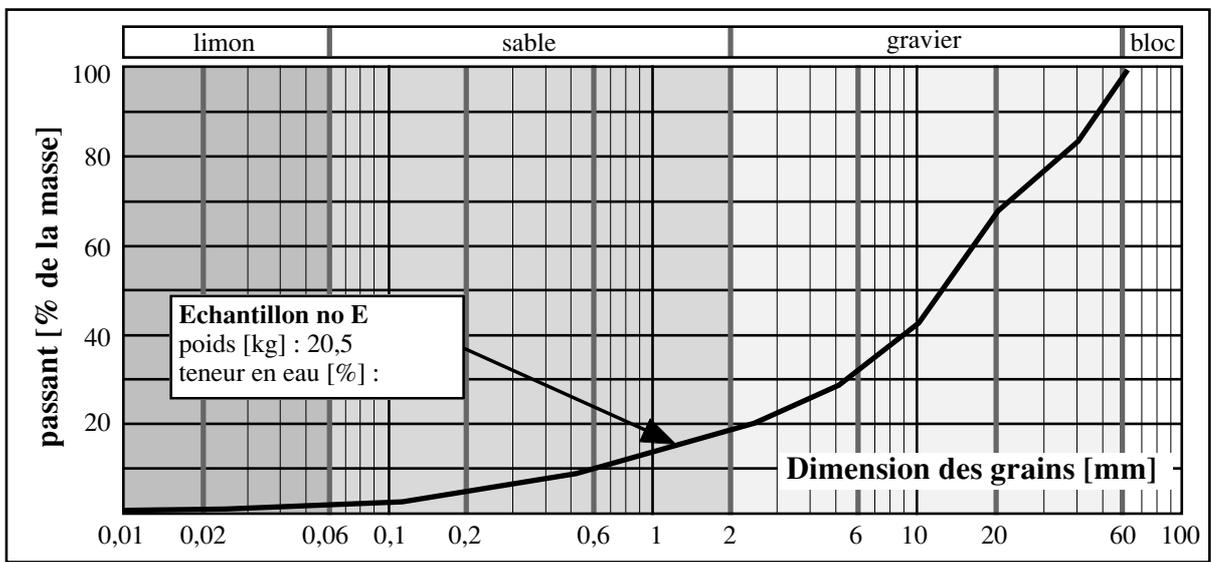


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$

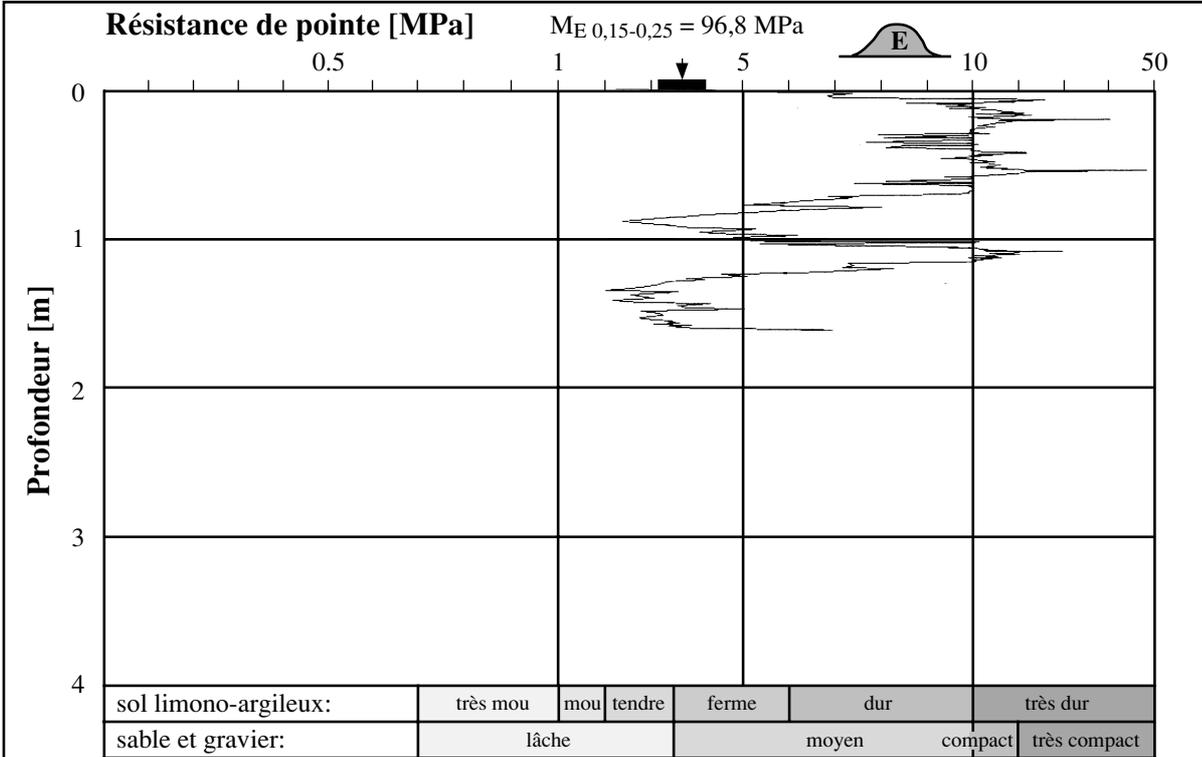
Echant. prélevé au tas: **3**



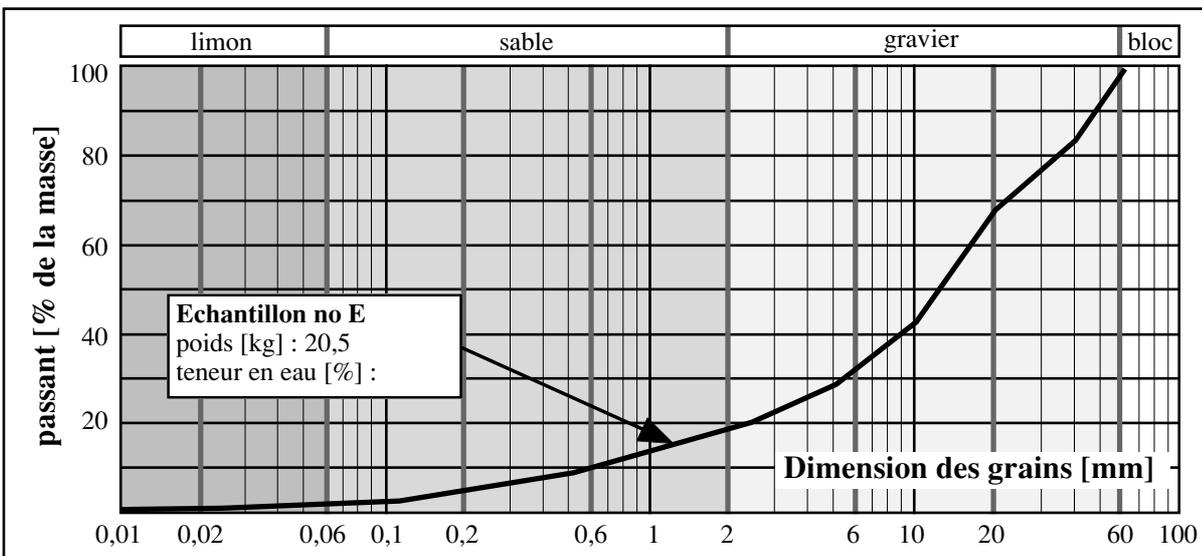
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-10

Lieu de l'essai: PM5	Type du PDL: Panda 2 cm ²
But de l'essai: Contrôle compactage fouille en fendue	Date: 1997-10-16
Matériau de remblayage: grave II	Ømax: 80 mm



Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$	Echant. prélevé dans la fouille: 3
Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$	Echant. prélevé au tas: 3



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-11

Lieu de l'essai: PM6

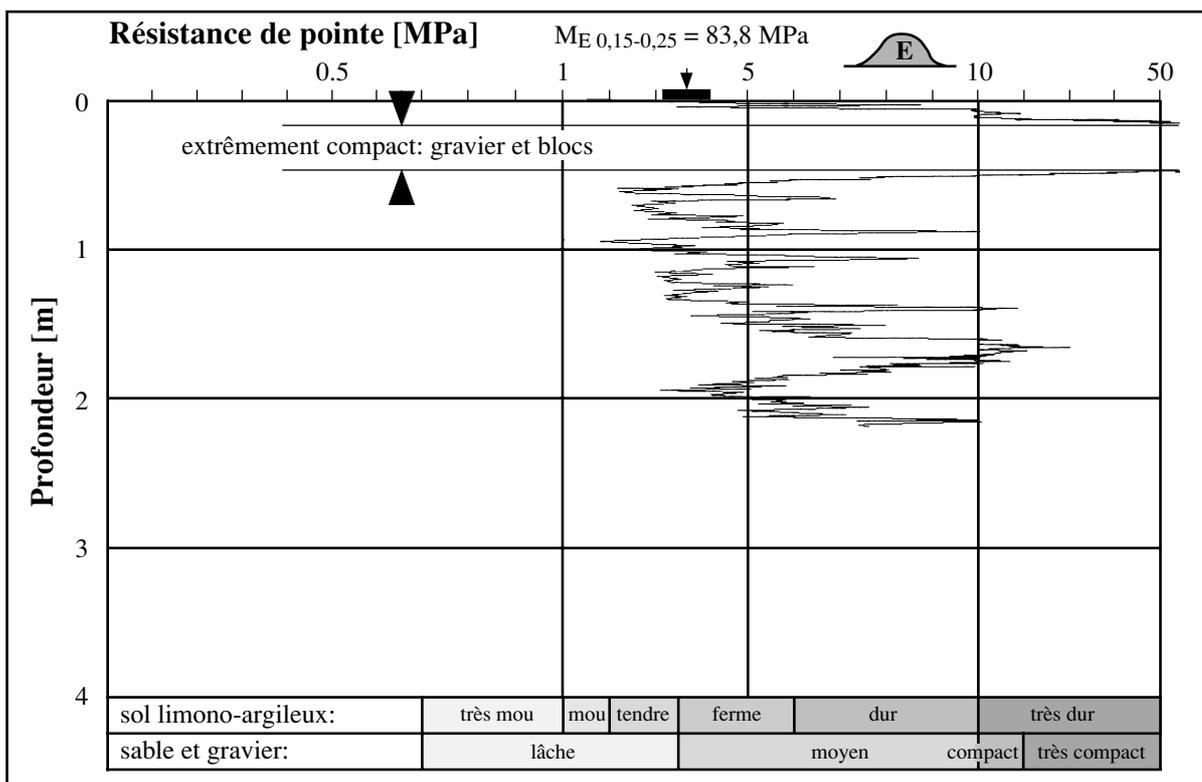
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille en fendue

Date: 1997-10-16

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: 80 mm

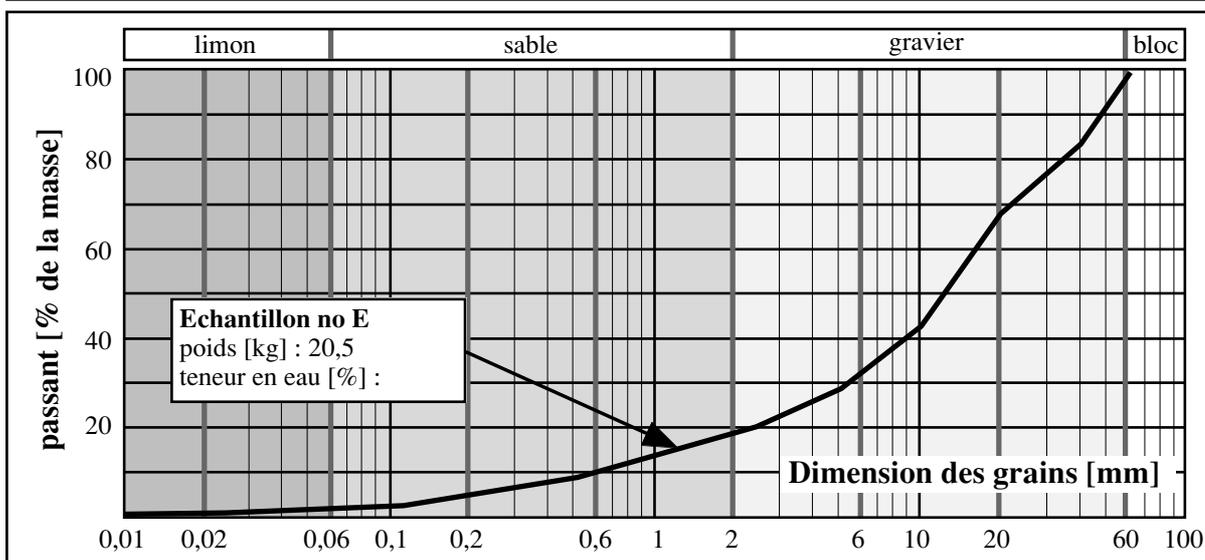


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-12

Lieu de l'essai: RC2-1

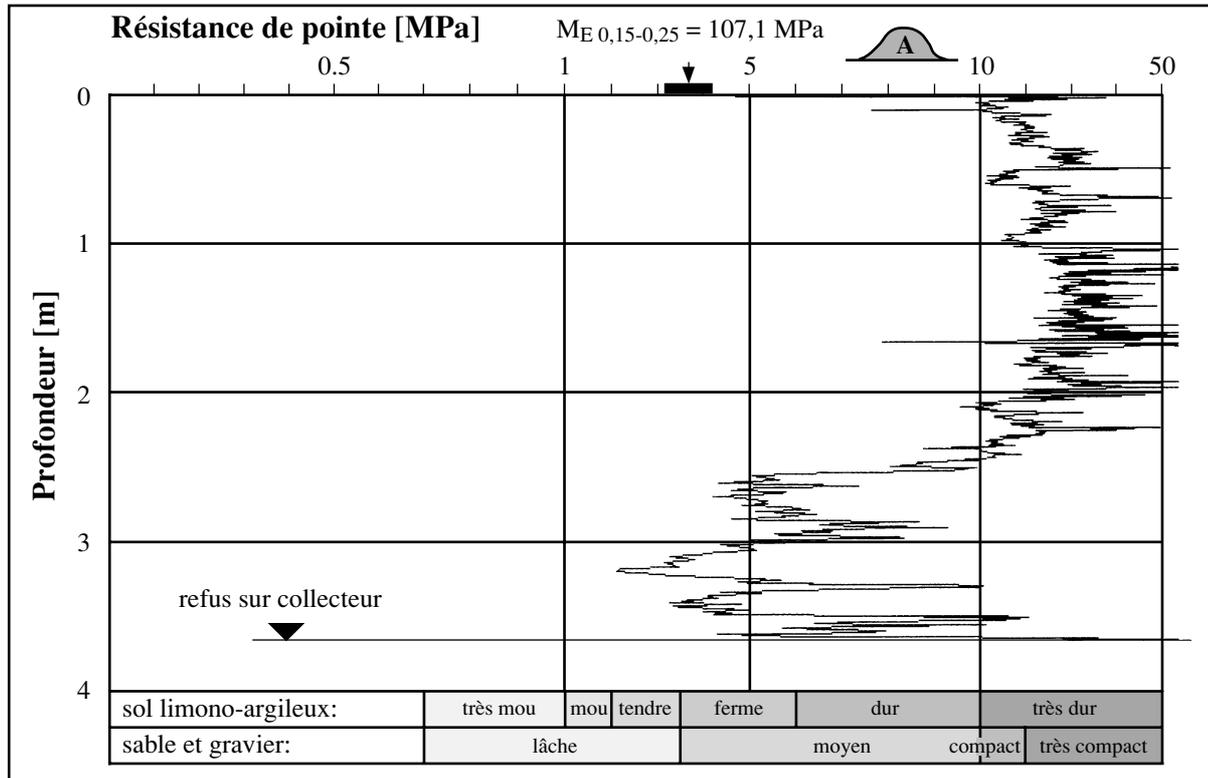
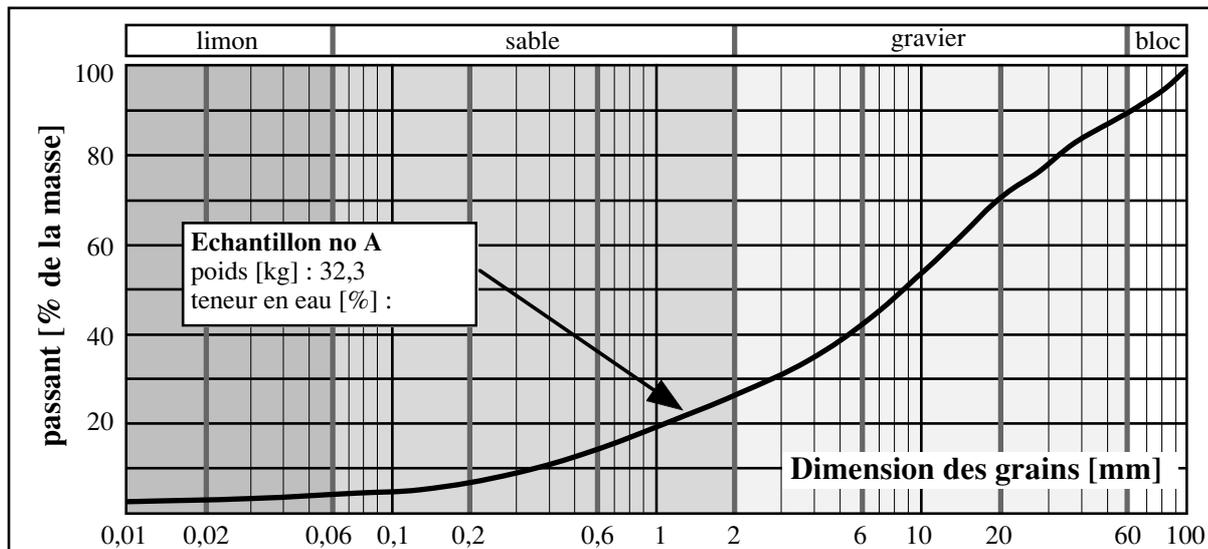
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille en fendue

Date: 1997-08-26

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: 100 mm

Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$ Echant. prélevé au tas: **3**

Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-13

Lieu de l'essai: SN1a0202

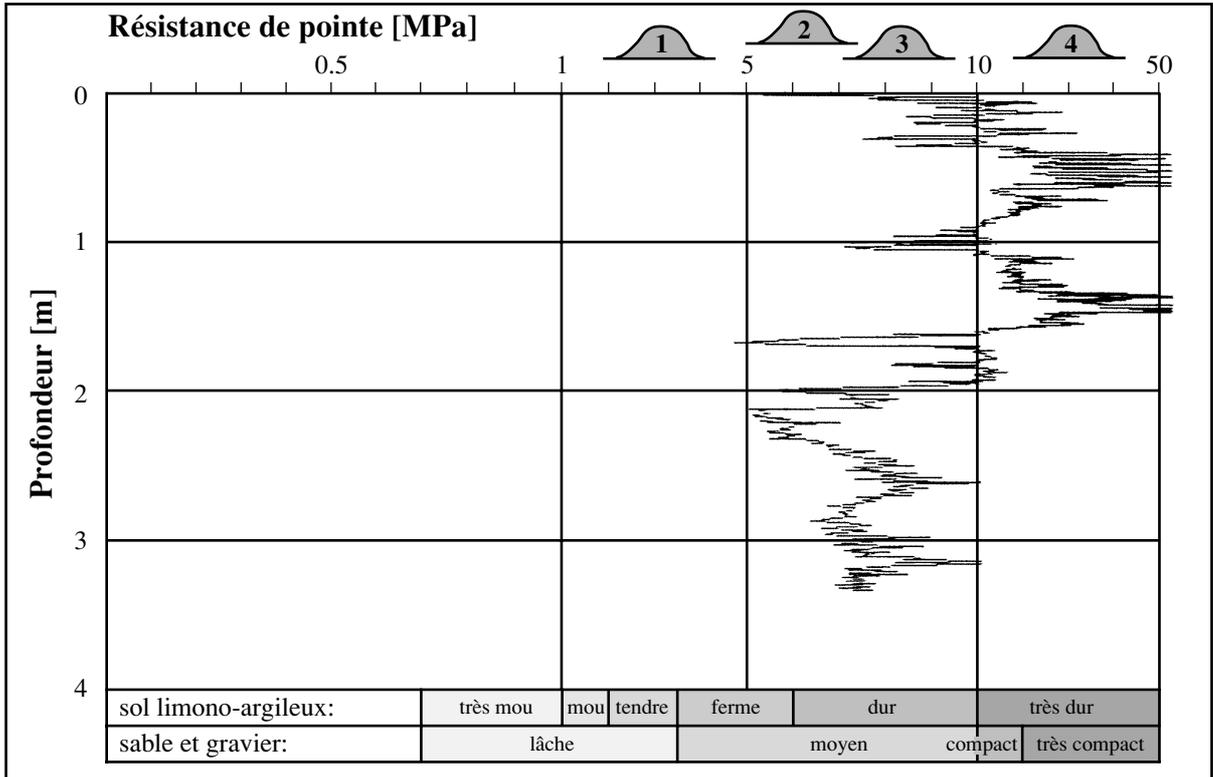
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage remblayage fouille

Date: 1996-11-22

Matériau de remblayage: environ grave I

Ømax: 65 mm

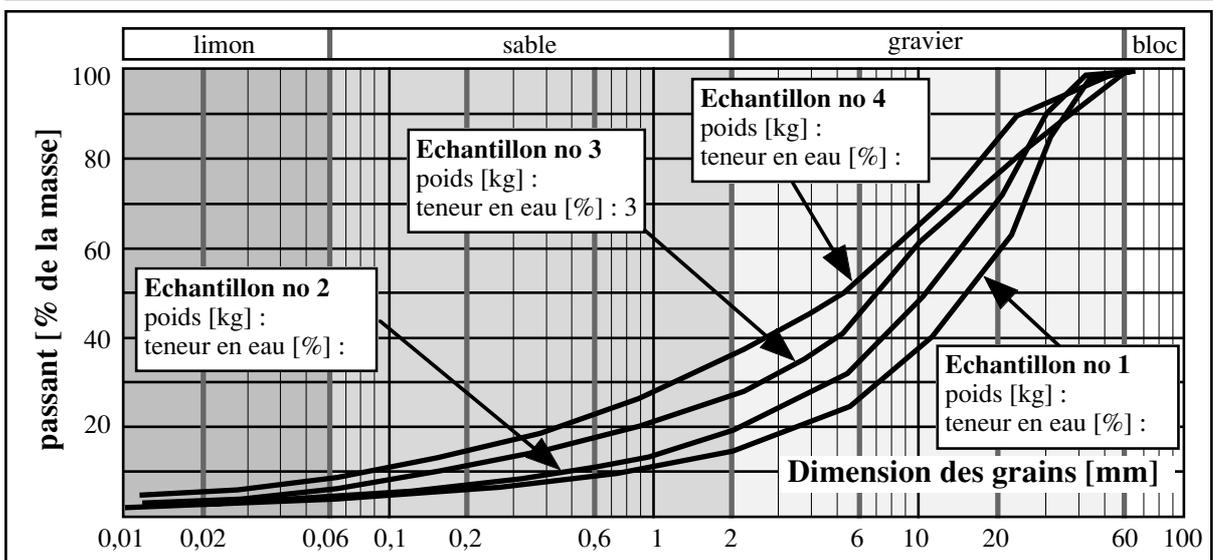


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E: $M_{E0,15-0,25} = 87,5$ MPa

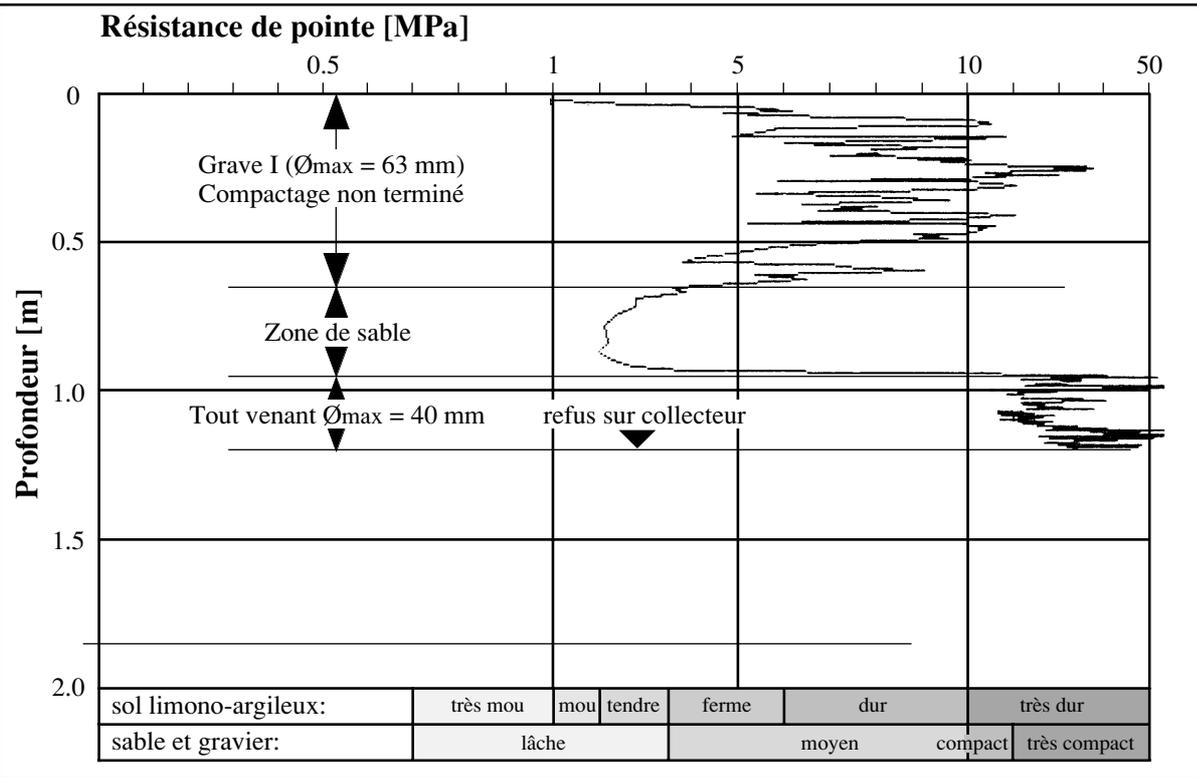
Echant. prélevé au tas: **3**



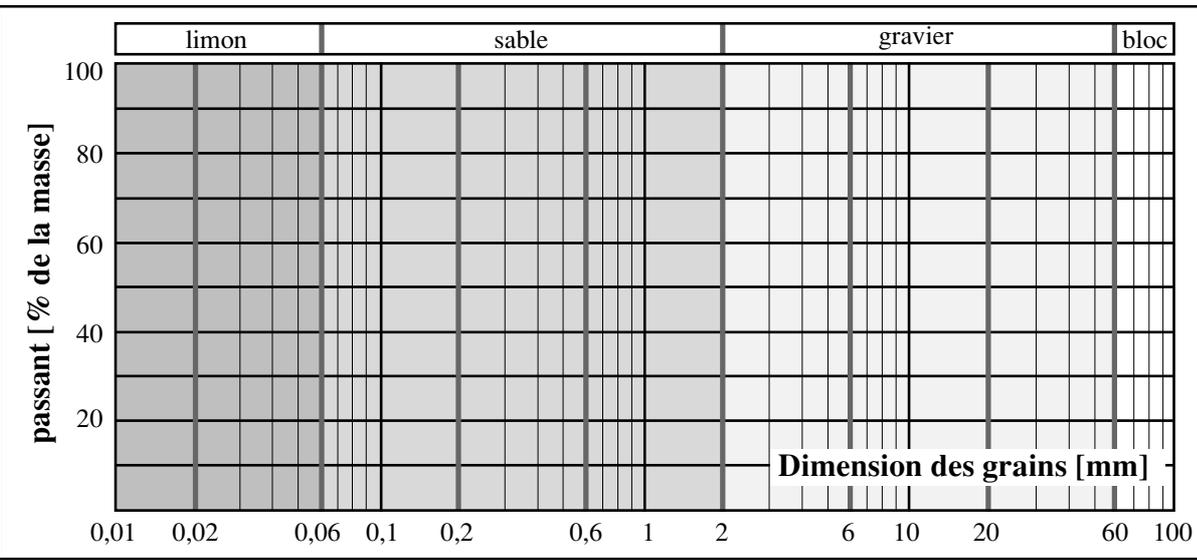
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-14

Lieu de l'essai: SN1aRC3COL-11 **Type du PDL:** Panda 2 cm²
But de l'essai: Contrôle compactage remblayage fouille en fendue **Date:** 1997-03-17
Matériau de remblayage: grave I, sable et tout venant Ø_{max} 40 mm **Ø_{max}:** 63 mm



Masse volumique par nucléomètre: ρ = 2,1 Echant. prélevé dans la fouille: **3**
 Essai M_E: M_E 0,15-0,25 = 87,5 MPa Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-15

Lieu de l'essai: SN1aRC3COL-12

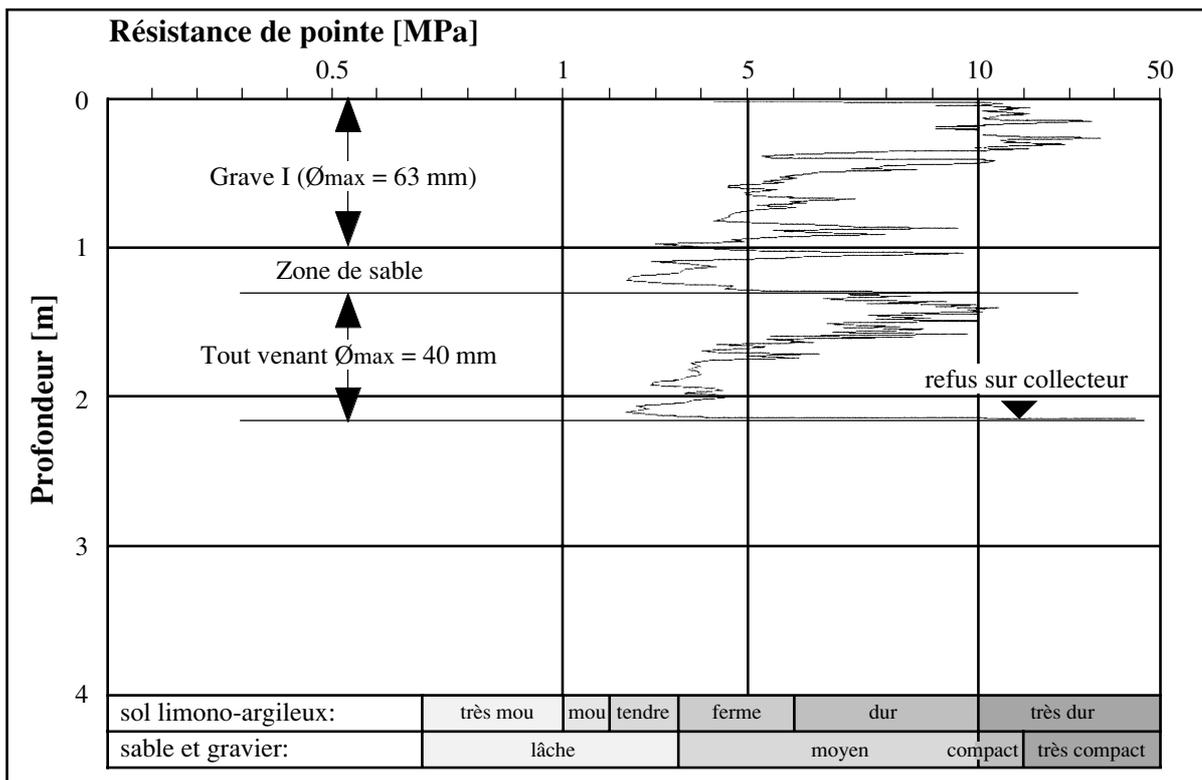
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage remblayage fouille en fendue

Date: 1997-03-17

Matériau de remblayage: grave I, sable et tout venant Ømax 40 mm

Ømax: 63 mm

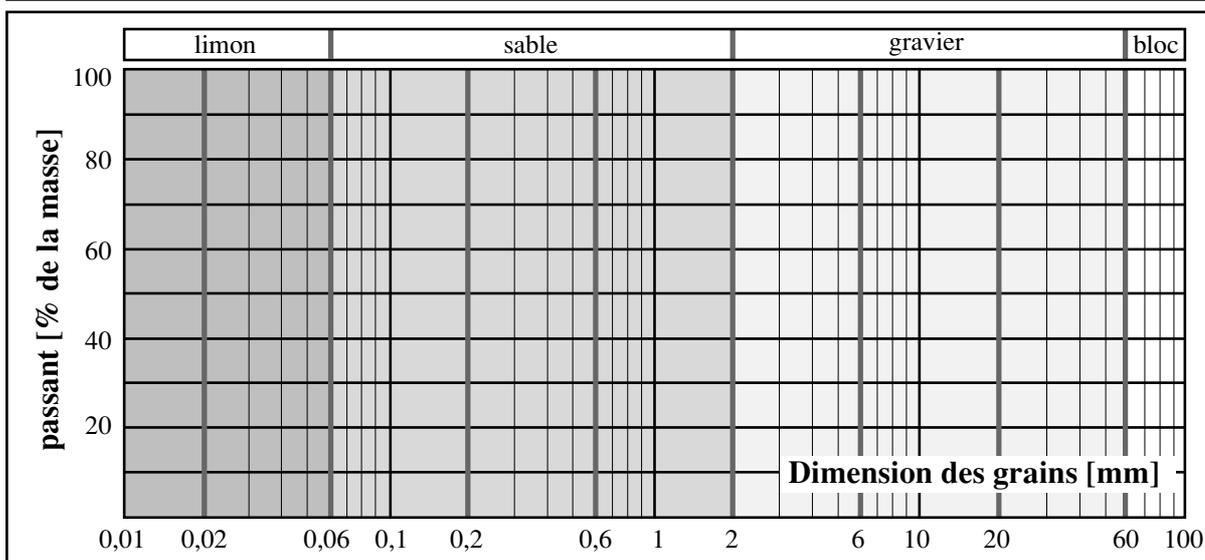


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

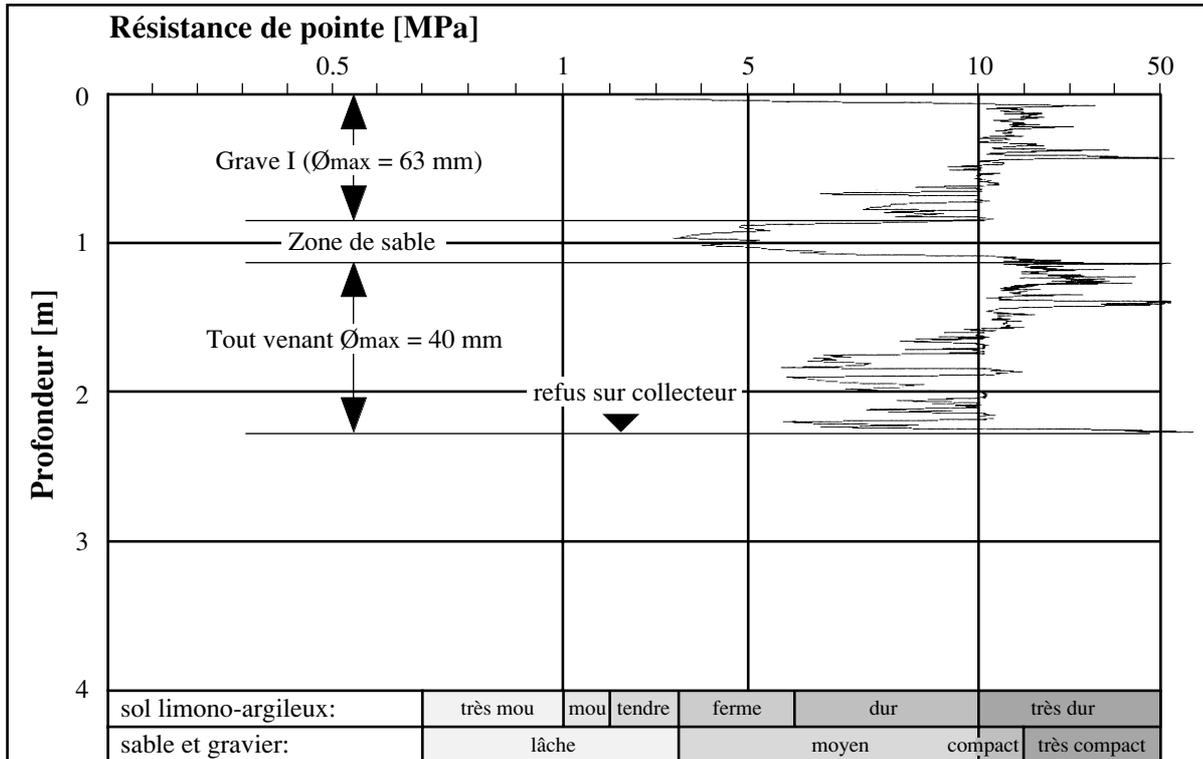
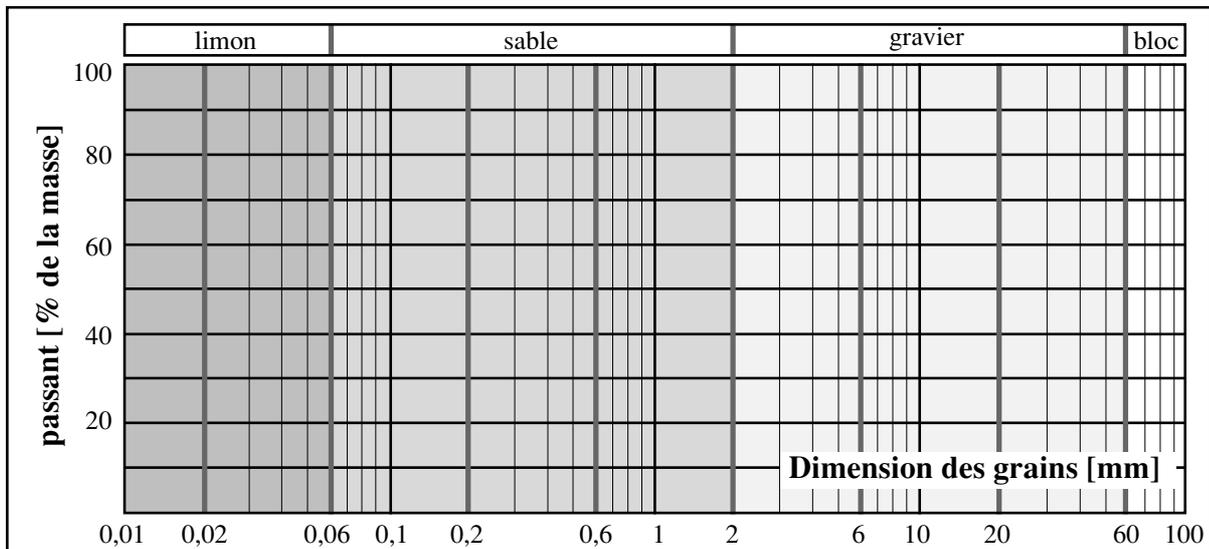
Essai ME: ME_{0,15-0,25} = 87,5 MPa

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-16**Lieu de l'essai:** SN1aRC3COL-13**Type du PDL:** Panda 2 cm²**But de l'essai:** Contrôle compactage remblayage fouille en fendue **Date:** 1997-03-17**Matériau de remblayage:** grave I, sable et tout venant Ø_{max} 40 mm **Ø_{max}:** 63 mmMasse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**Essai M_E: M_{E 0,15-0,25} = 87,5 MPaEchant. prélevé au tas: **3**

Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-17

Lieu de l'essai: SN1aRC3GIR-1

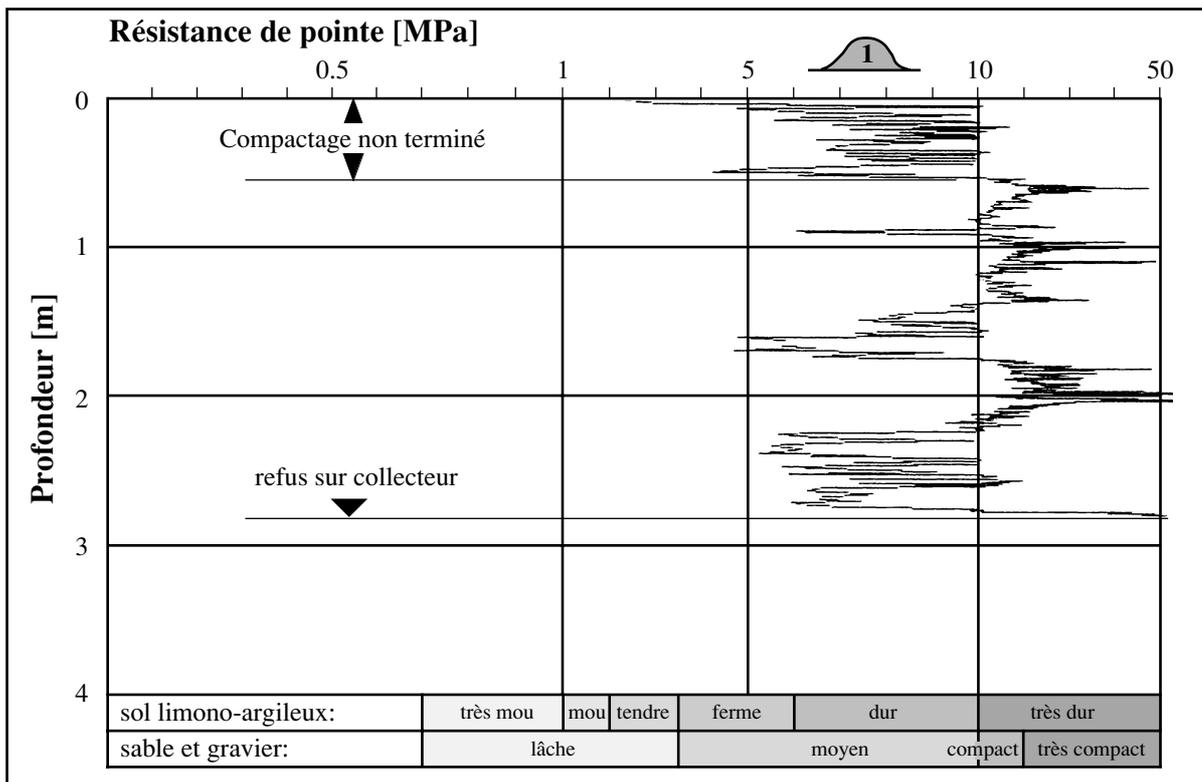
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage remblayage fouille en fendue

Date: 1997-03-19

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: 55 mm

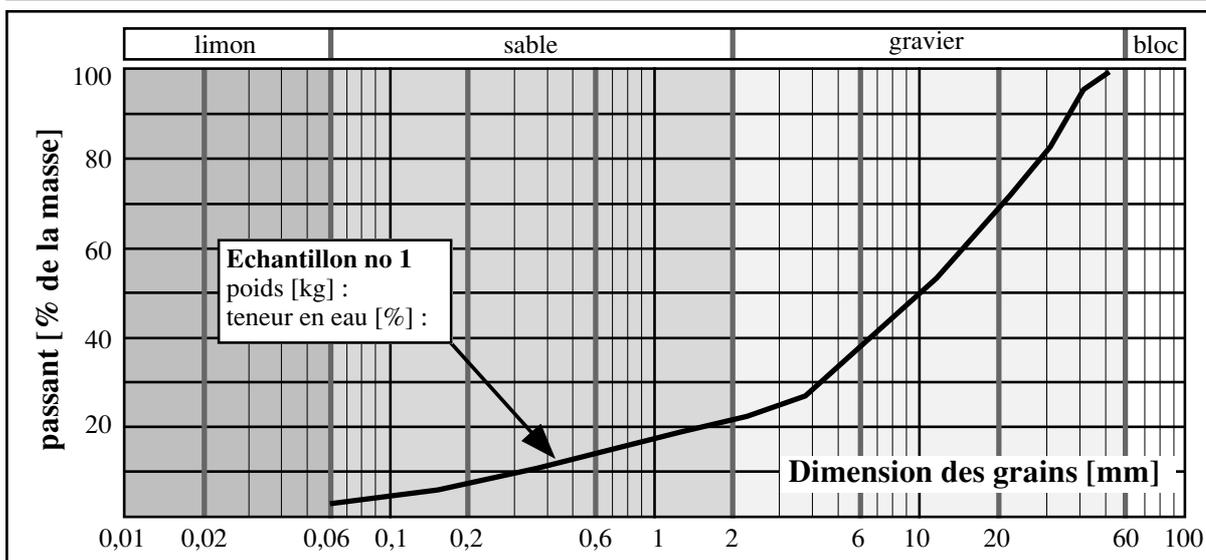


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: 3

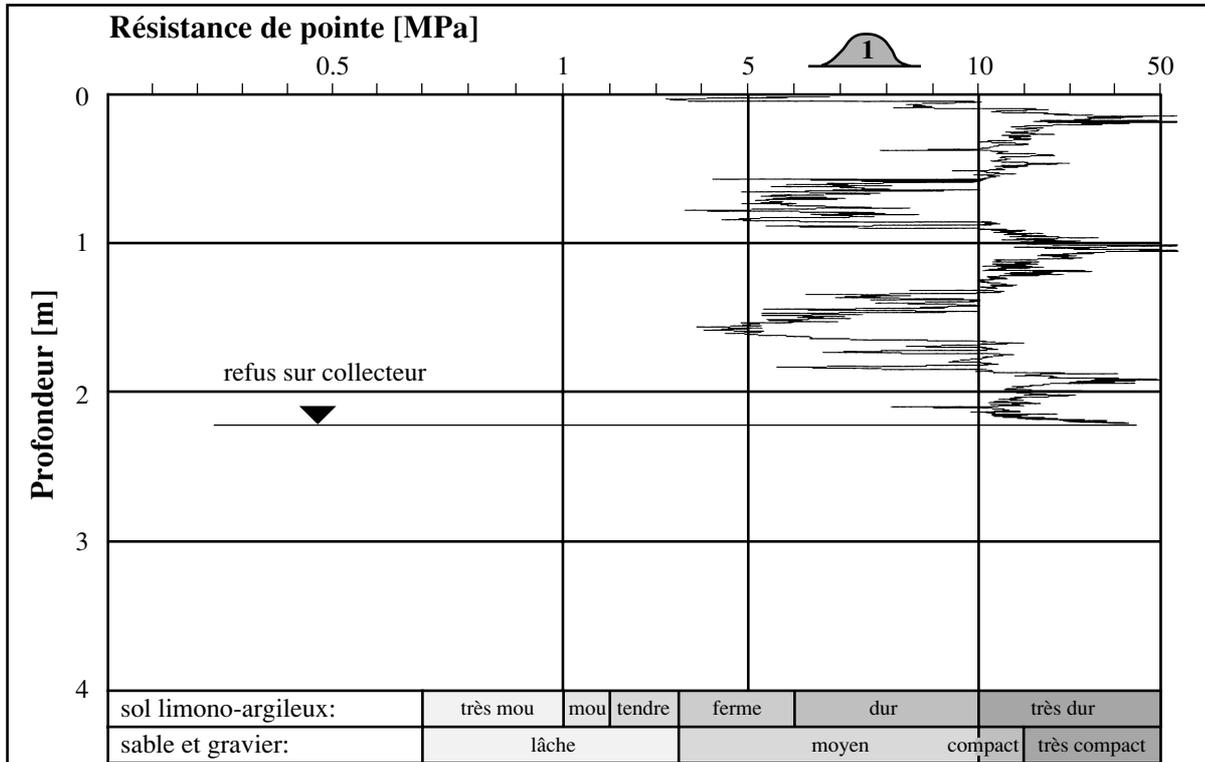
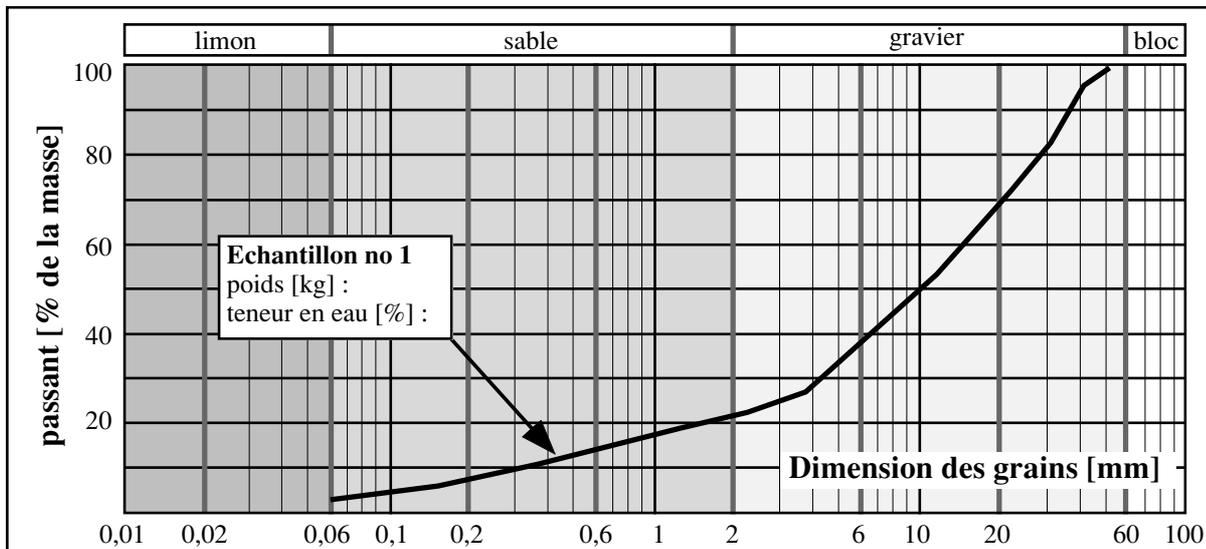
Essai M_E: $M_{E0,15-0,25} = 87,5$ MPa

Echant. prélevé au tas: 3



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

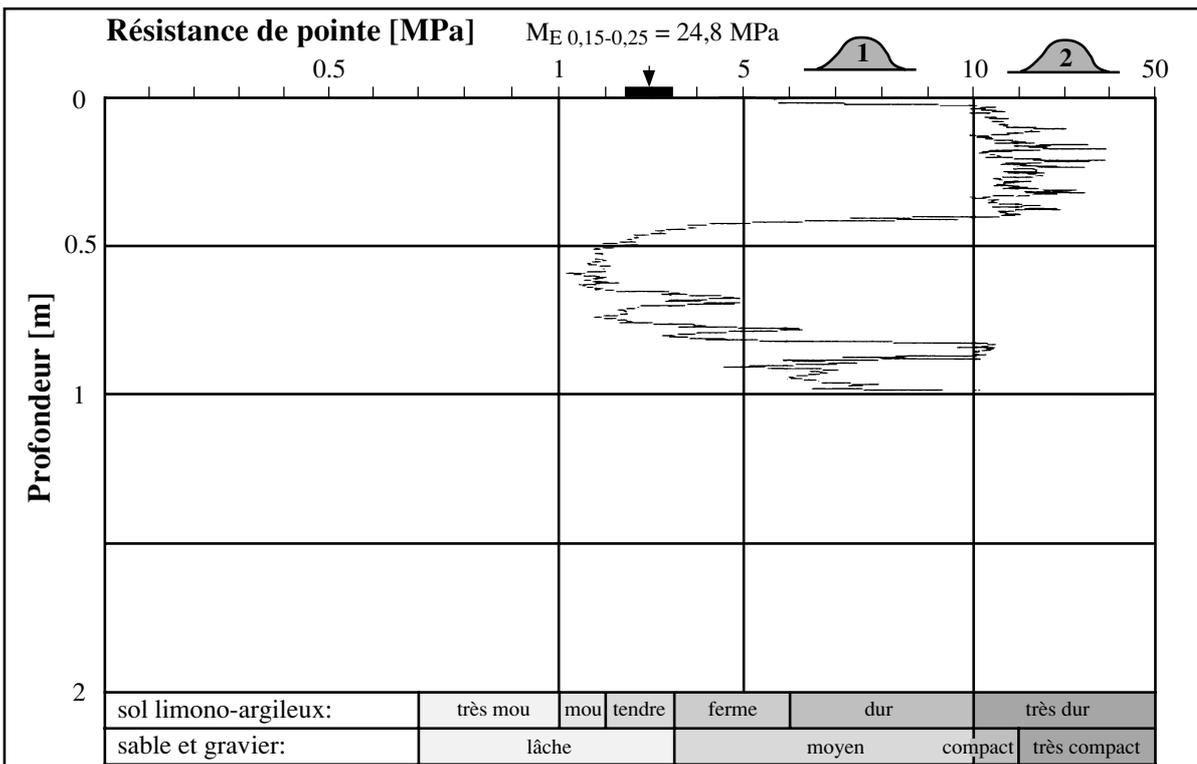
Fiche d'essai no A-18**Lieu de l'essai:** SN1aRC3GIR-2**Type du PDL:** Panda 2 cm²**But de l'essai:** Contrôle compactage remblayage fouille en fendue**Date:** 1997-03-19**Matériau de remblayage:** grave II**Ømax:** 55 mmMasse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**Essai M_E : $M_{E,0,15-0,25} = 87,5$ MPaEchant. prélevé au tas: **3**

Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-19

Lieu de l'essai: SN1aT01-1
But de l'essai: Contrôle compactage
Matériau de remblayage: grave I

Type du PDL: Panda 2 cm²
Date: 1995-04-11
Ømax: 65 mm

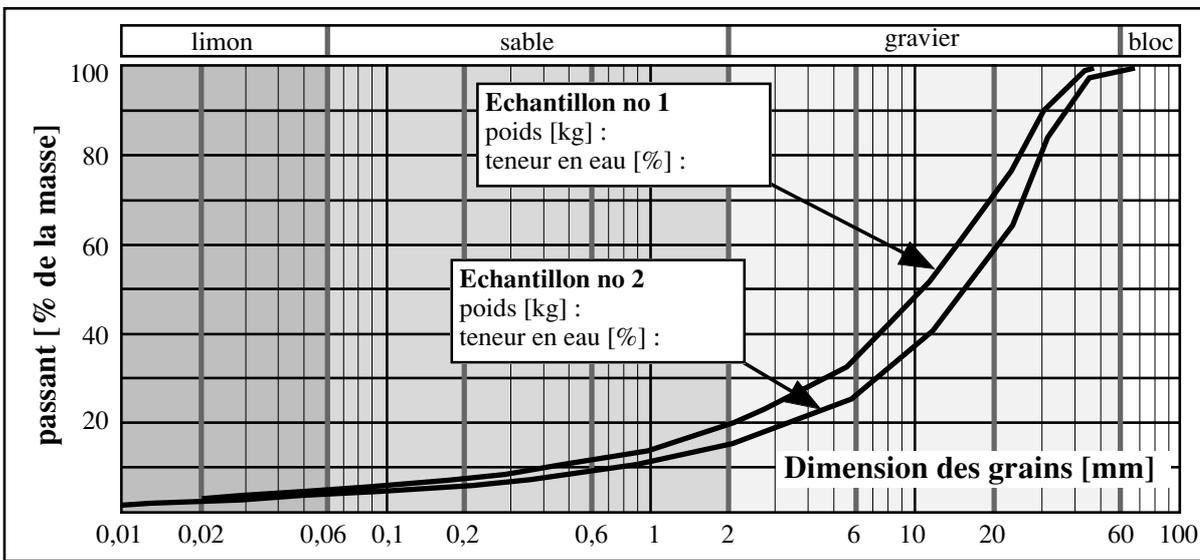


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$

Echant. prélevé au tas: **3**

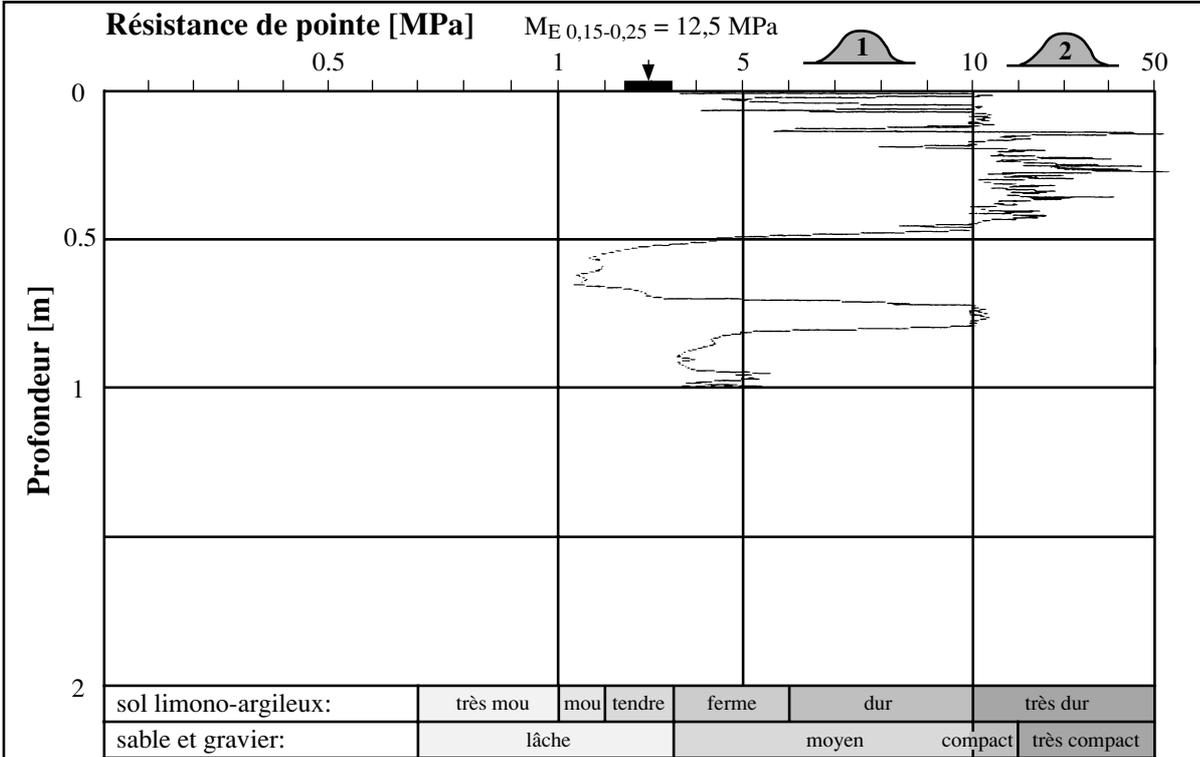


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-20

Lieu de l'essai: SN1aT01-2
But de l'essai: Contrôle compactage
Matériau de remblayage: grave I

Type du PDL: Panda 2 cm²
Date: 1995-04-11
Ømax: 65 mm

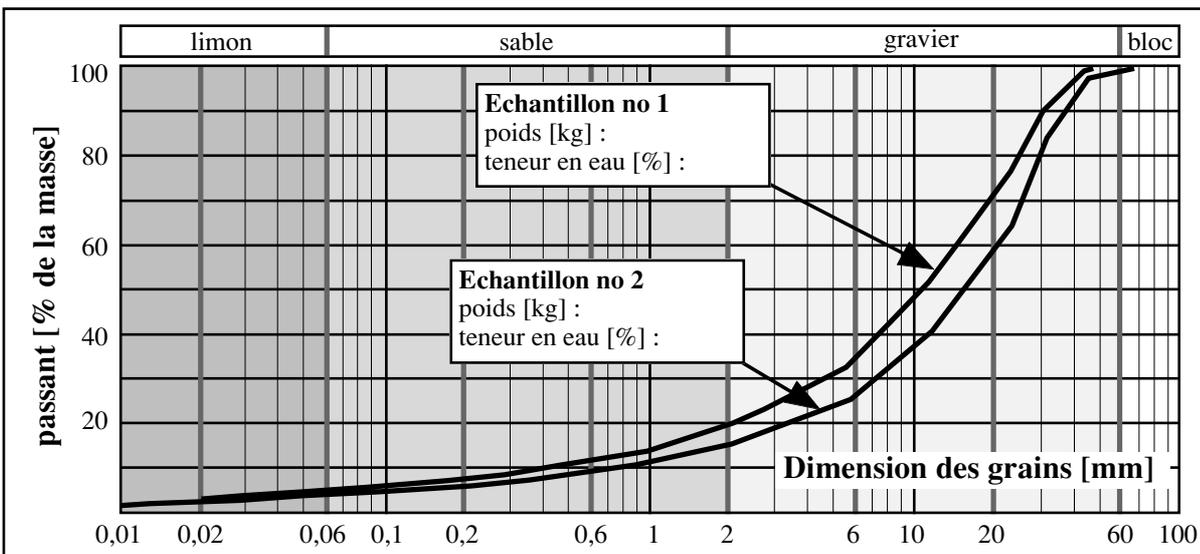


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$

Echant. prélevé au tas: **3**

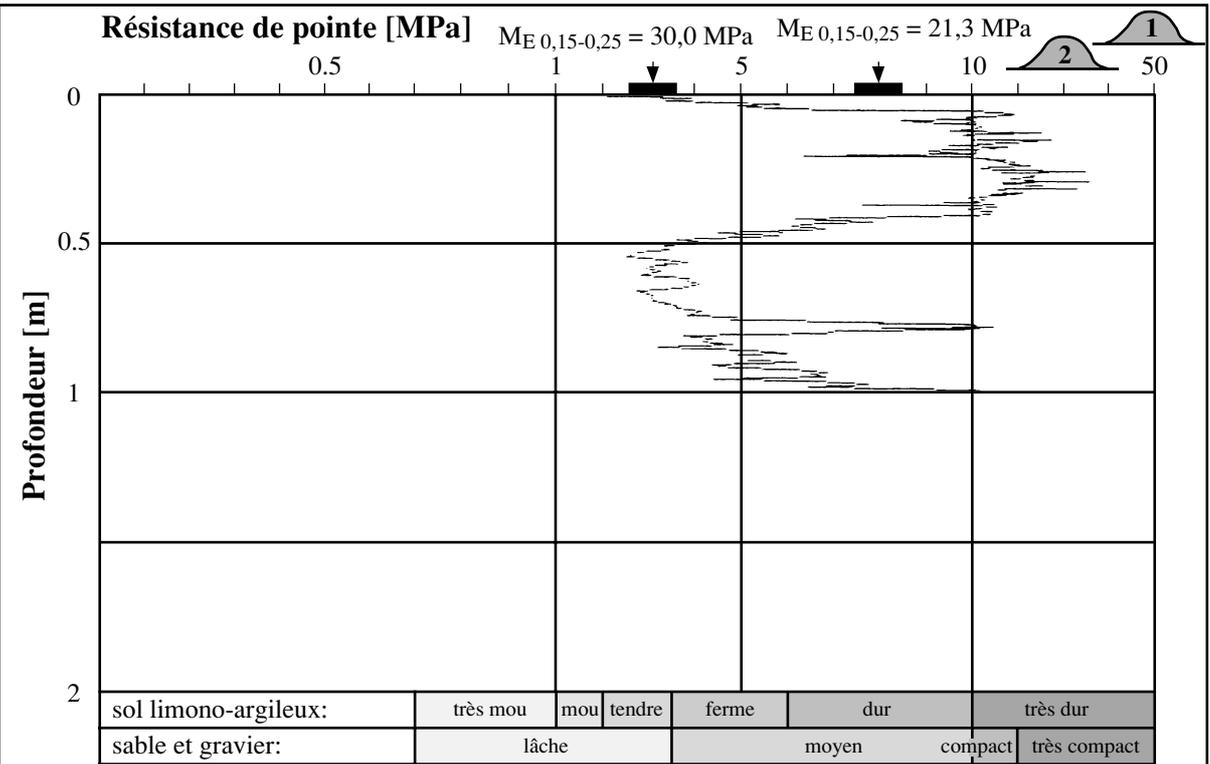


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-21

Lieu de l'essai: SN1aT01-3
But de l'essai: Contrôle compactage
Matériau de remblayage: grave I

Type du PDL: Panda 2 cm²
Date: 1995-04-11
Ømax: 65 mm

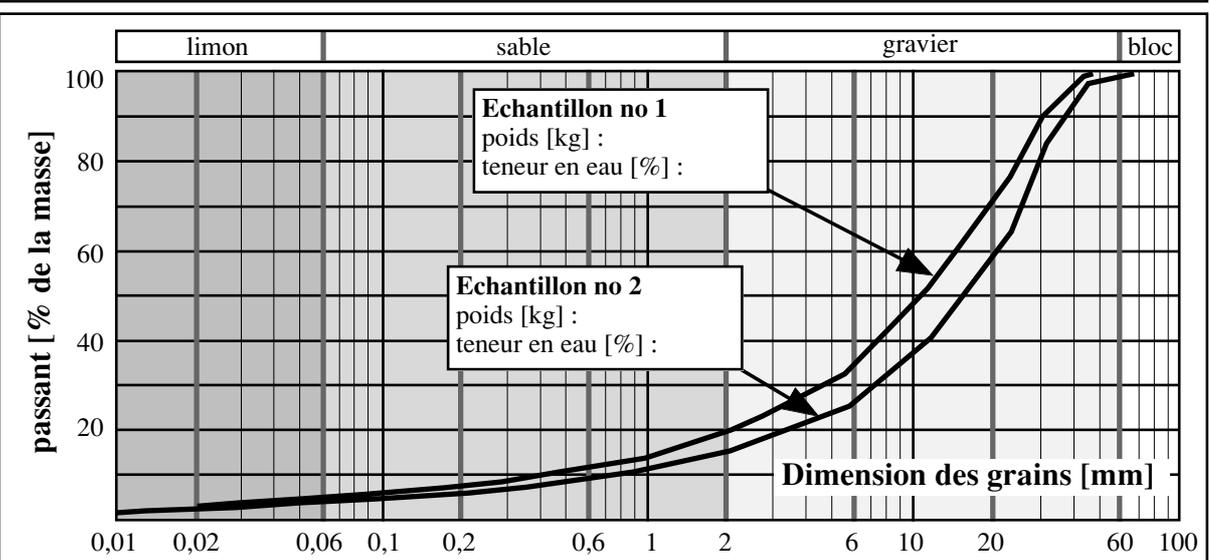


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$

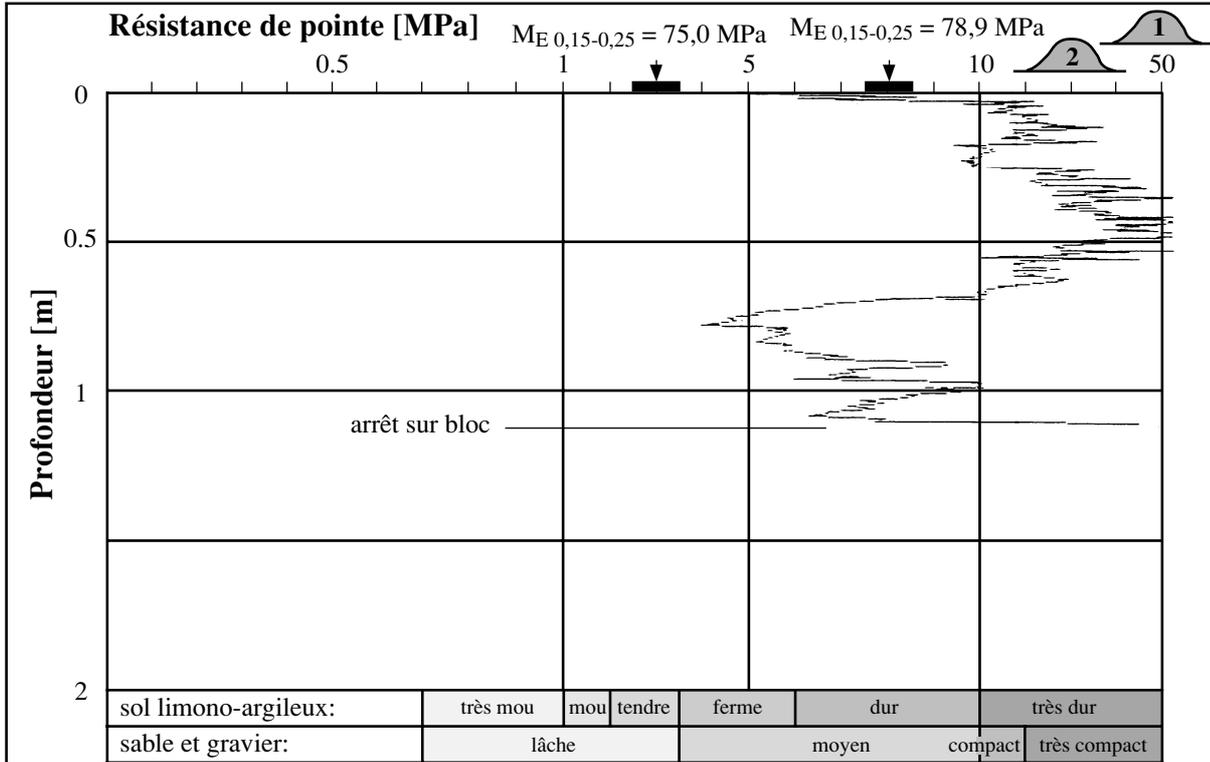
Echant. prélevé au tas: **3**



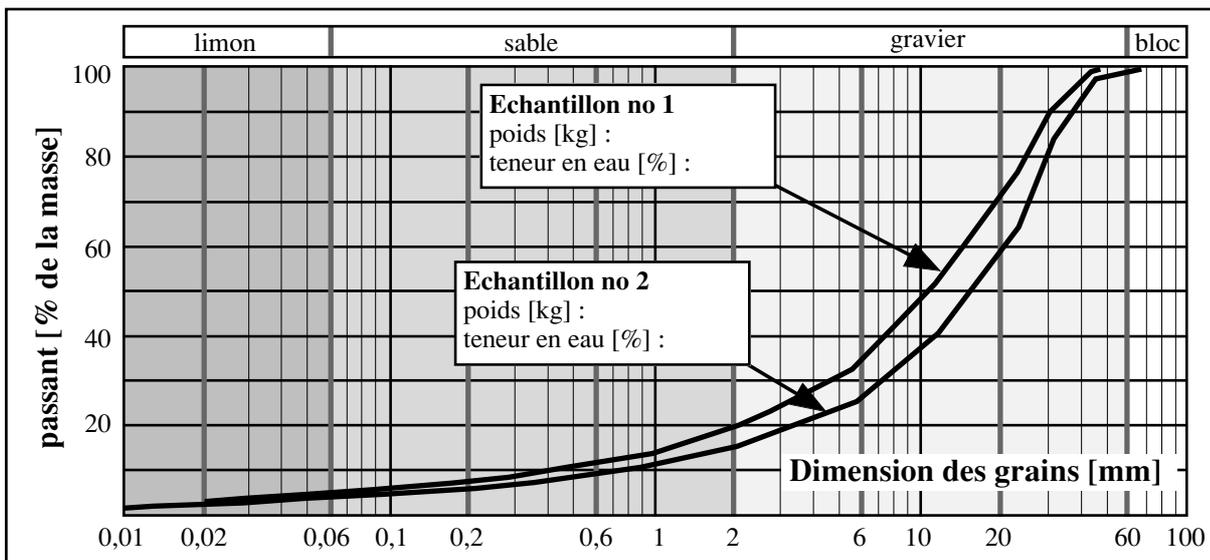
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-22

Lieu de l'essai: SN1aT01-4	Type du PDL: Panda 2 cm ²
But de l'essai: Contrôle compactage	Date: 1995-04-13
Matériau de remblayage: grave I	Ømax: 65 mm



Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$	Echant. prélevé dans la fouille: 3
Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$	Echant. prélevé au tas: 3

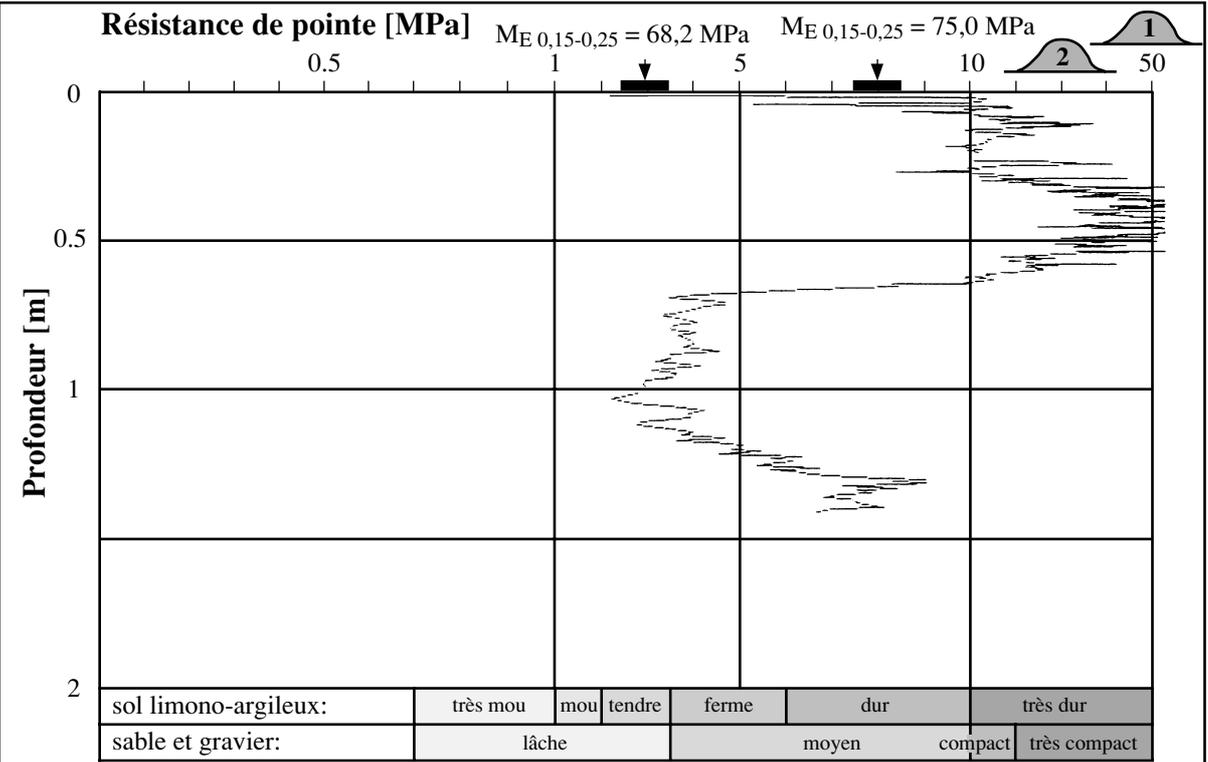


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-23

Lieu de l'essai: SN1aT01-5
But de l'essai: Contrôle compactage
Matériau de remblayage: grave I

Type du PDL: Panda 2 cm²
Date: 1995-04-13
Ømax: 65 mm

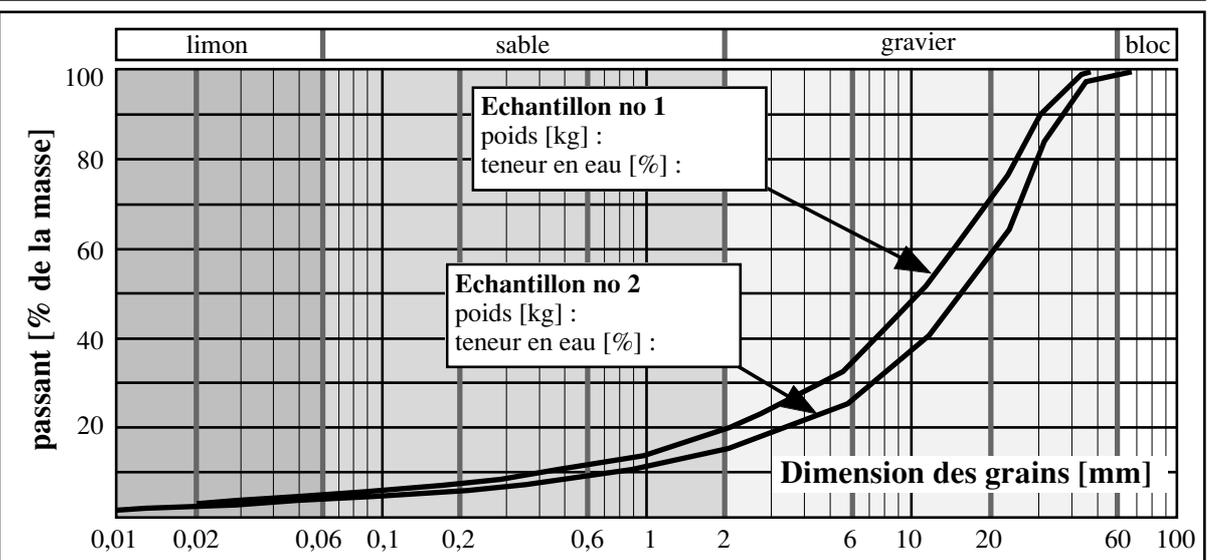


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$

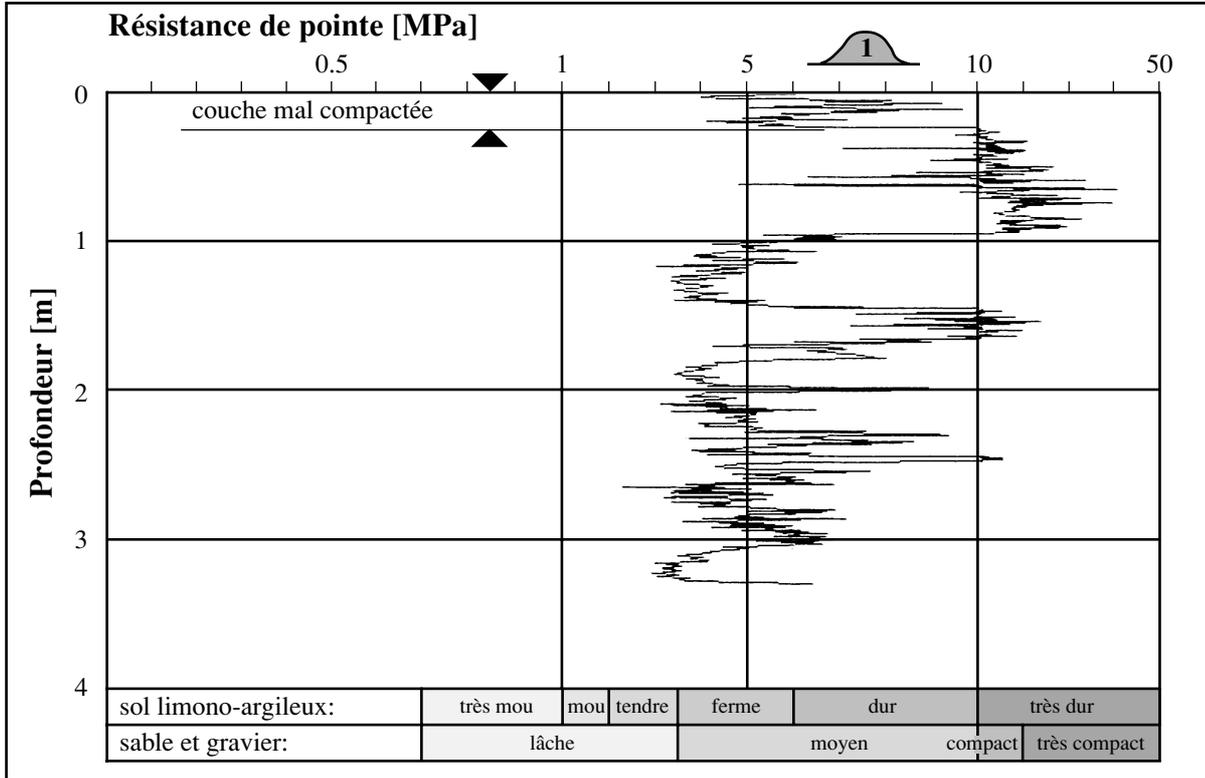
Echant. prélevé au tas: **3**



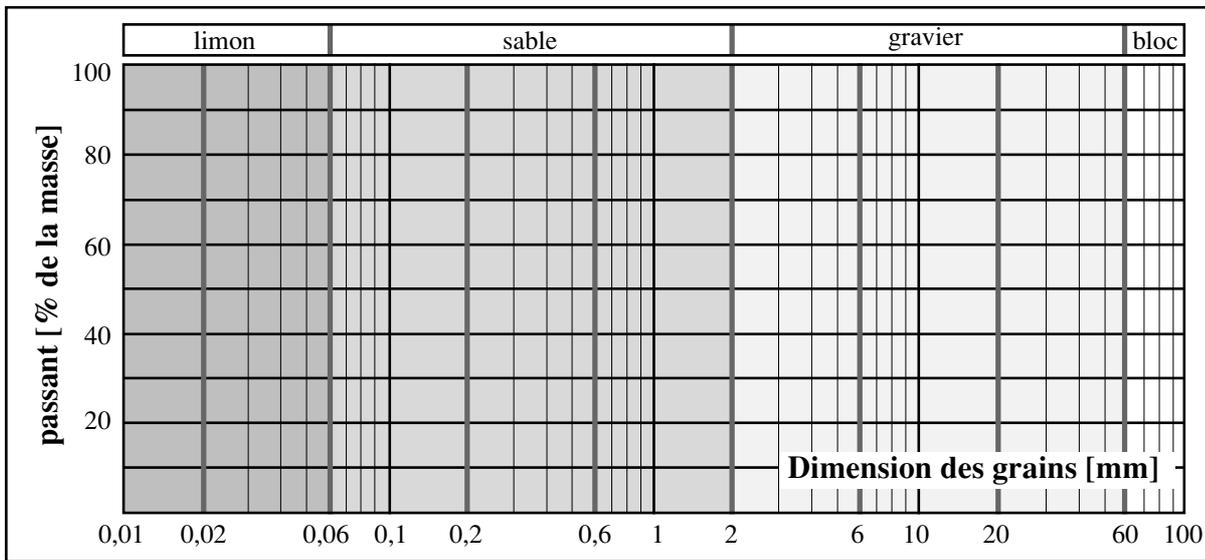
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-24

Lieu de l'essai: Sources-9 **Type du PDL:** Panda 2 cm²
But de l'essai: Contrôle compactage remblayage fouille en fendue **Date:** 1997-12-11
Matériau de remblayage: grave II **Ømax:** 100 mm



Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**
 Essai M_E : $M_{E,0,15-0,25} = 87,5$ MPa Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-25

Lieu de l'essai: EG-1

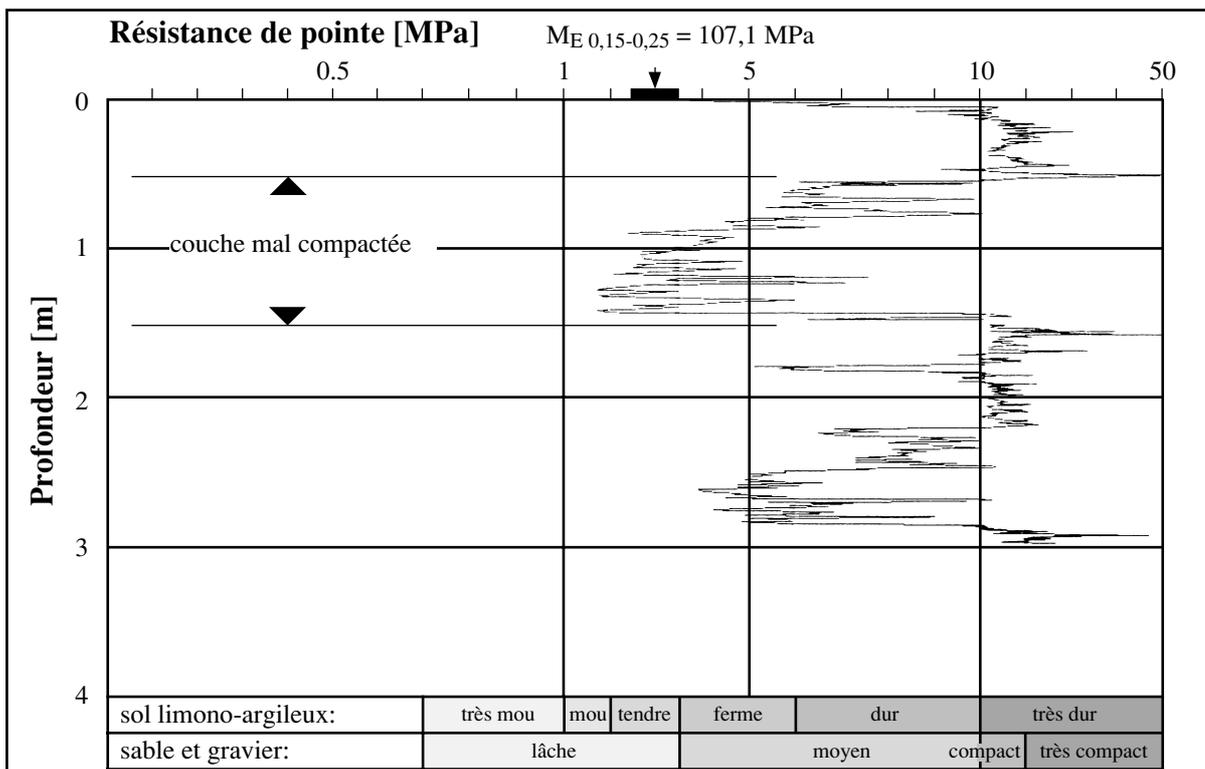
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille en tranchée

Date: 1995-04-24

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: 100 mm

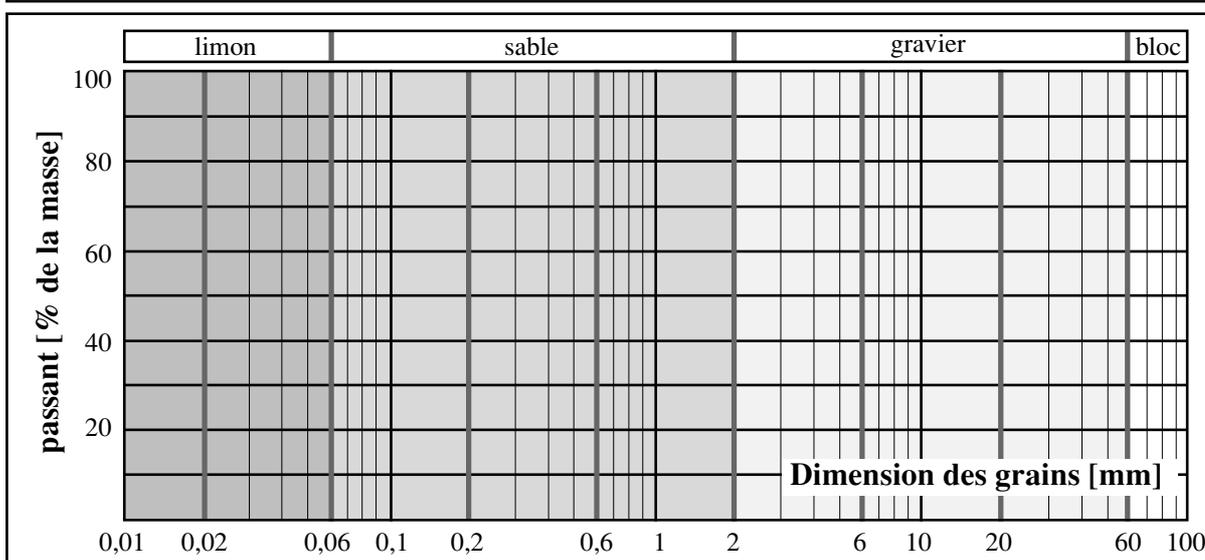


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

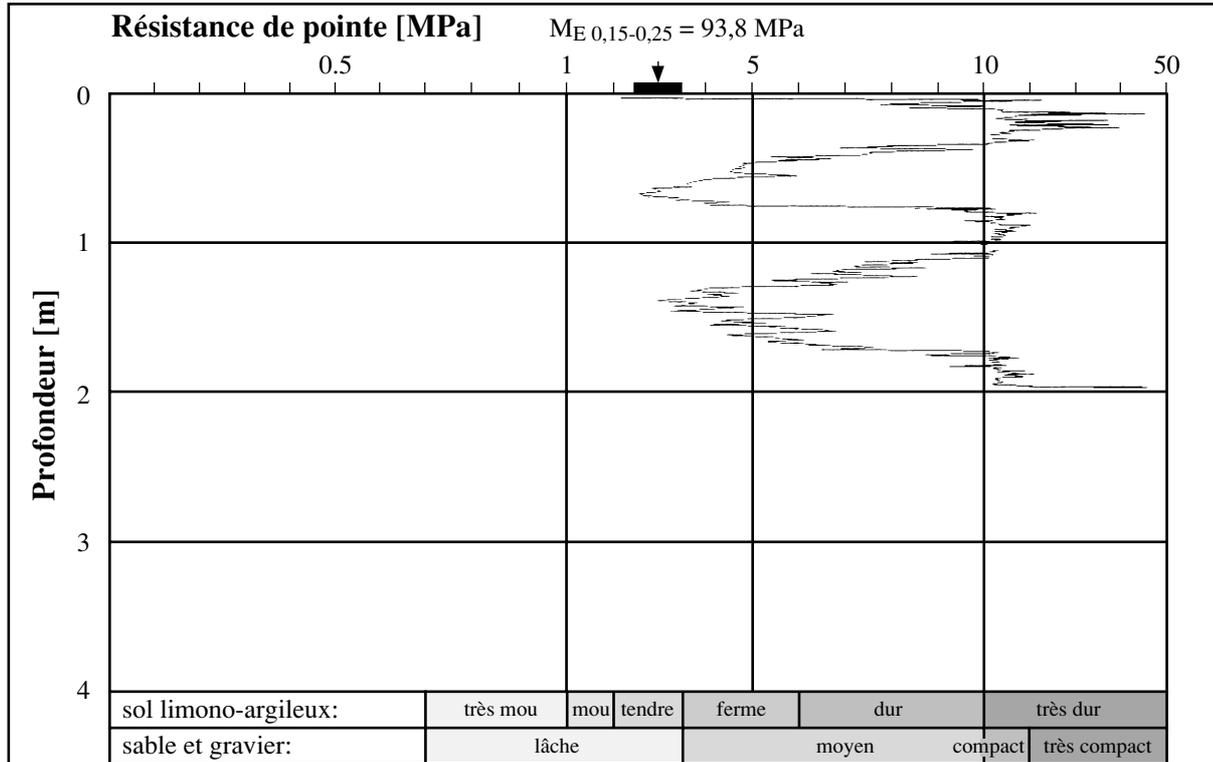
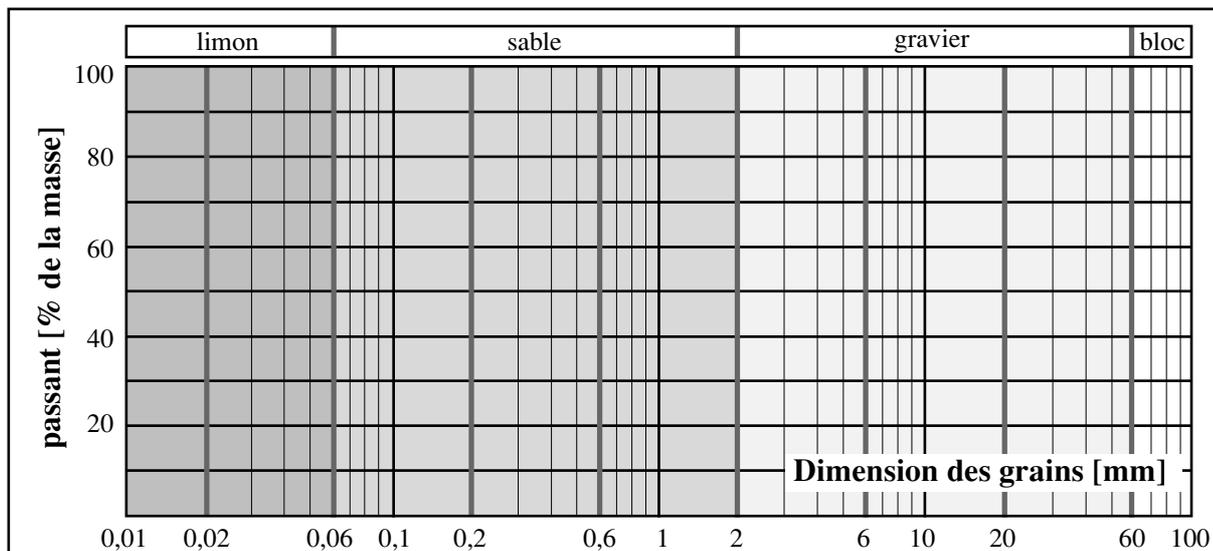
Essai M_E : $M_{E 0,15-0,25} = 87,5 \text{ MPa}$

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-26**Lieu de l'essai:** EG-2**Type du PDL:** Panda 2 cm²**But de l'essai:** Contrôle compactage fouille en tranchée**Date:** 1995-04-24**Matériau de remblayage:** grave II**Ømax:** 100 mmMasse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**Essai M_E : $M_{E0,15-0,25} = 87,5 \text{ MPa}$ Echant. prélevé au tas: **3**

Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-27

Lieu de l'essai: EG-3

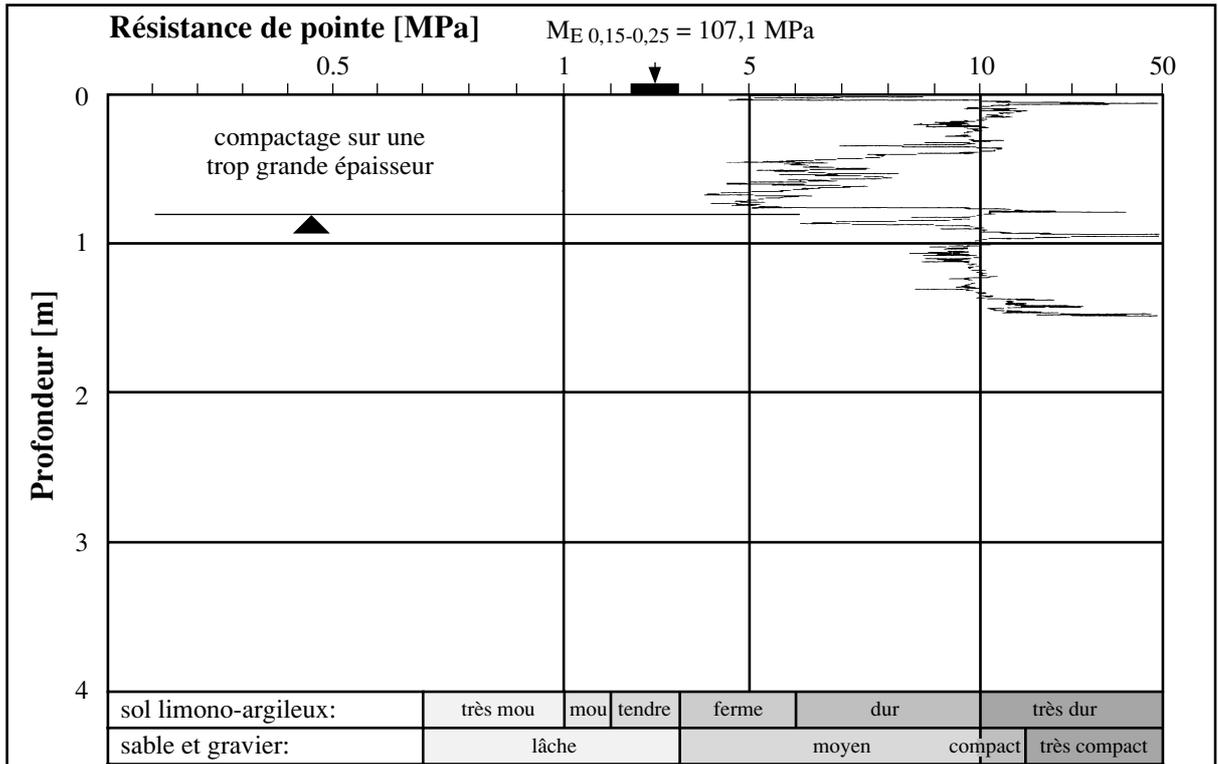
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille en tranchée

Date: 1995-04-24

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: 100 mm

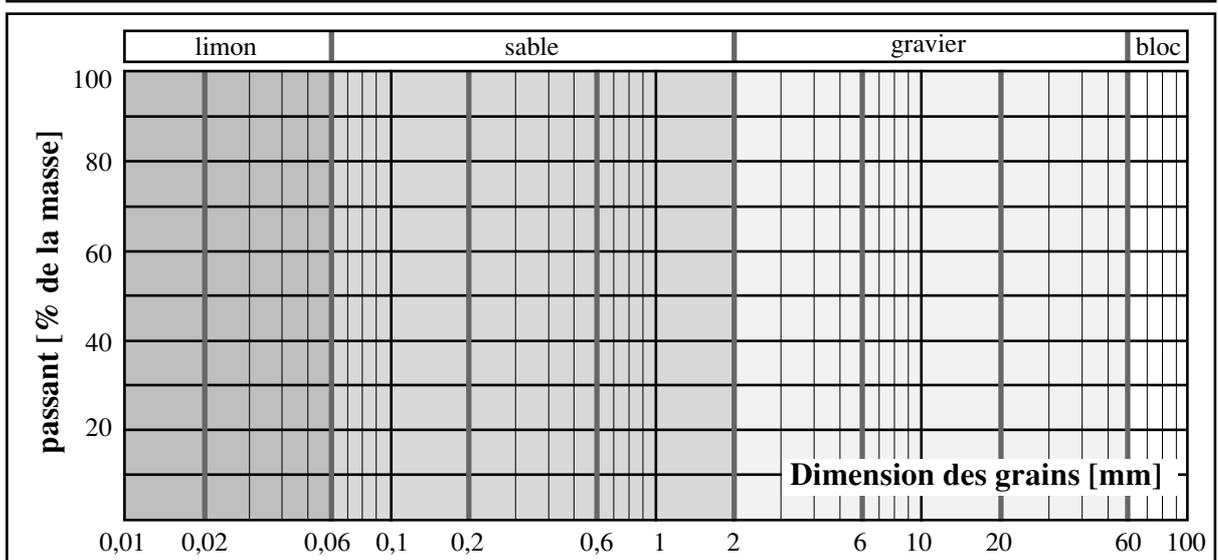


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

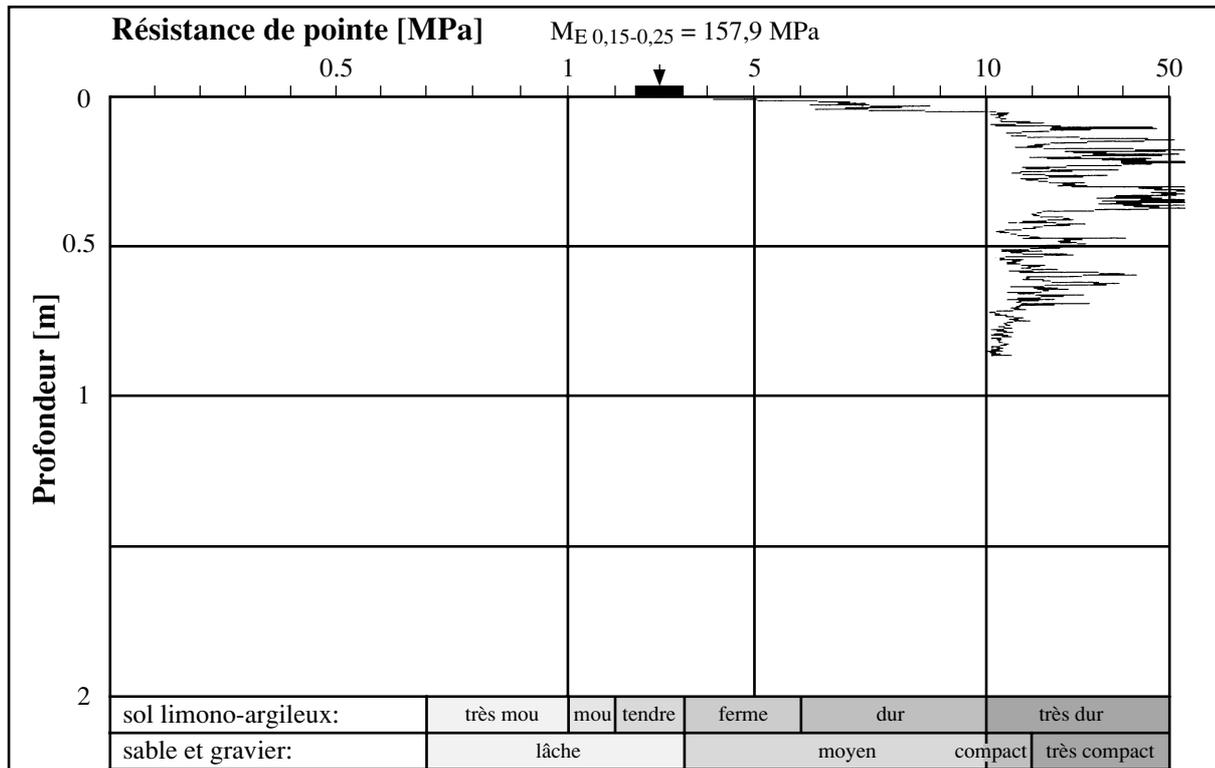
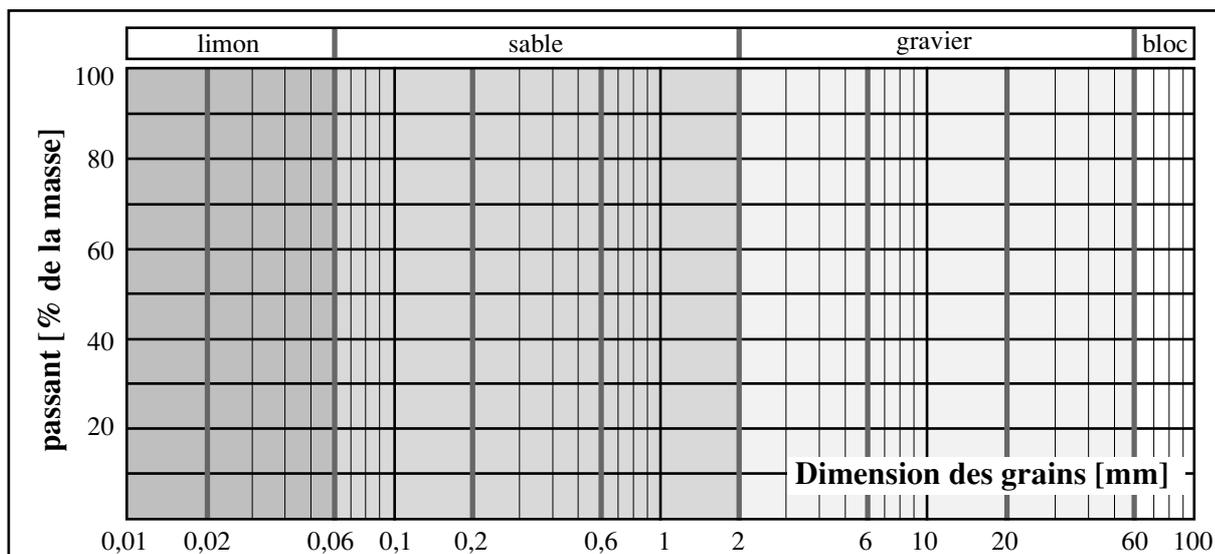
Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

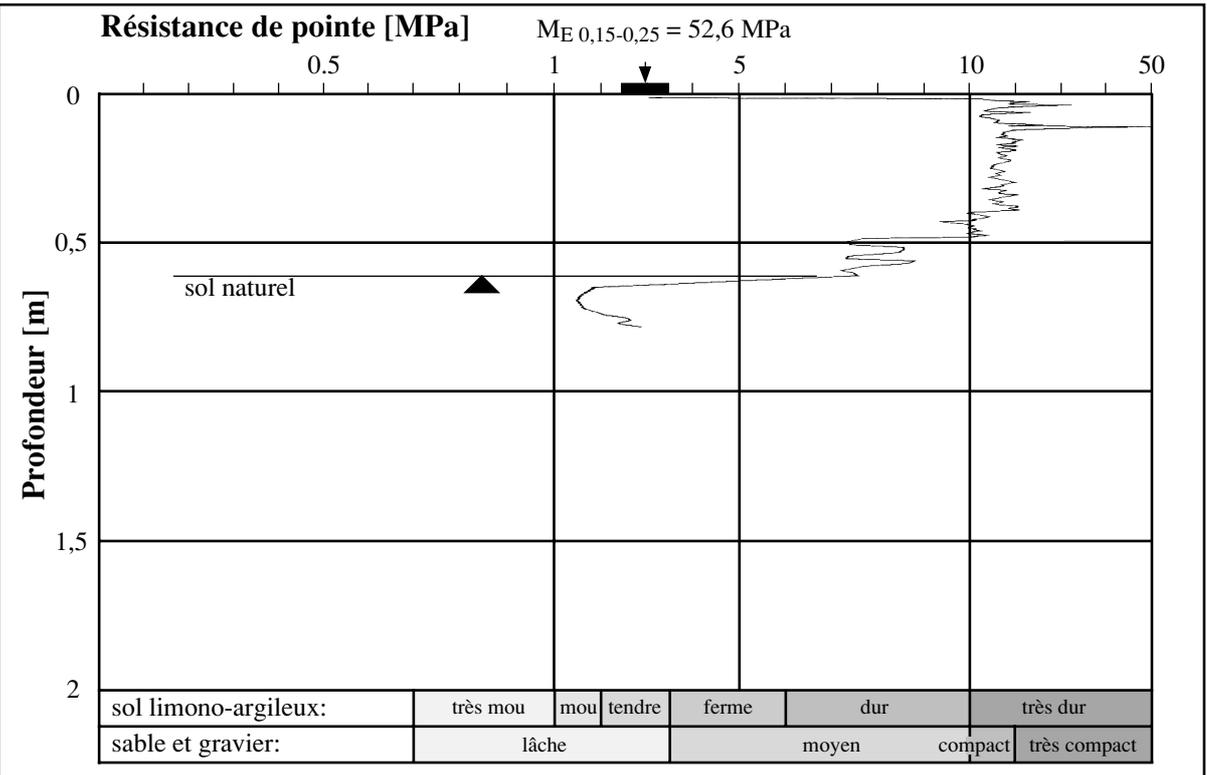
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-28**Lieu de l'essai:** AA**Type du PDL:** Panda 2 cm²**But de l'essai:** Contrôle compactage fouille en tranchée**Date:** 1994-04-12**Matériau de remblayage:** grave II**Ømax:** 100 mmMasse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**Essai M_E : $M_{E0,15-0,25} = 87,5$ MPaEchant. prélevé au tas: **3**

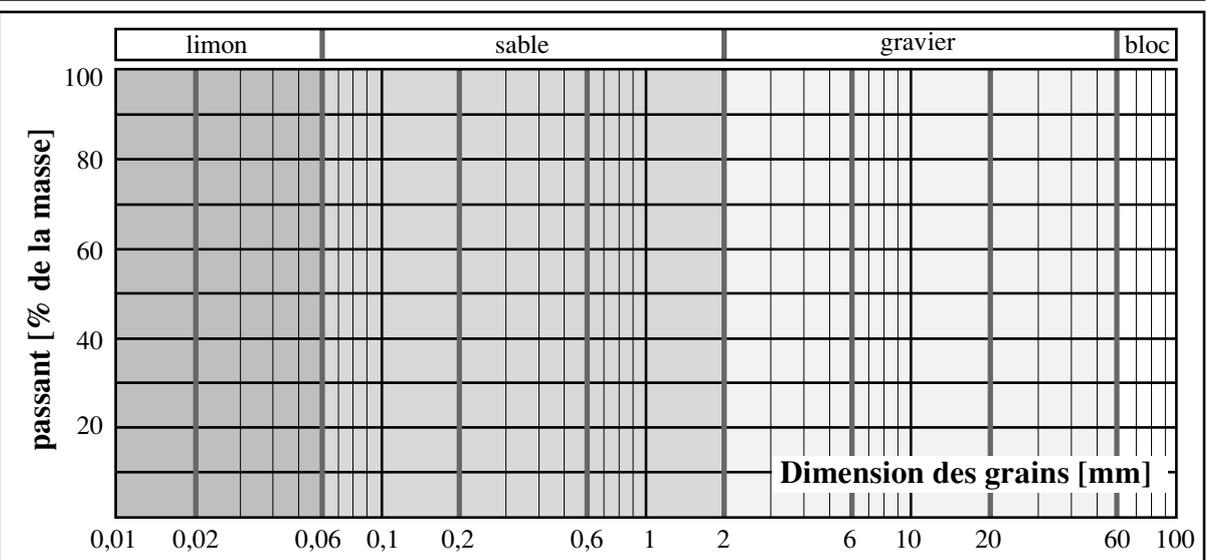
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-29

Lieu de l'essai: ESSOR-1 **Type du PDL:** Panda 2 cm²
But de l'essai: Contrôle compactage fondation route **Date:** 1996-05-21
Matériau de remblayage: grave I **Ømax:** 65 mm

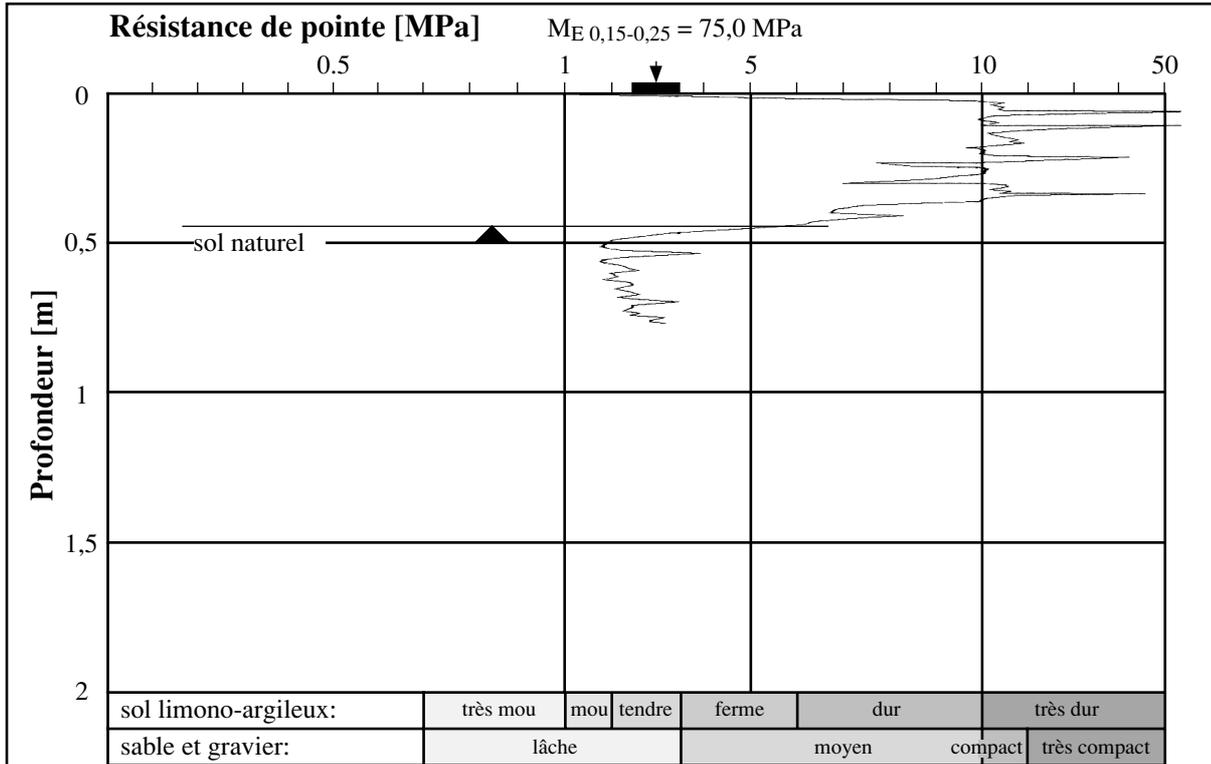
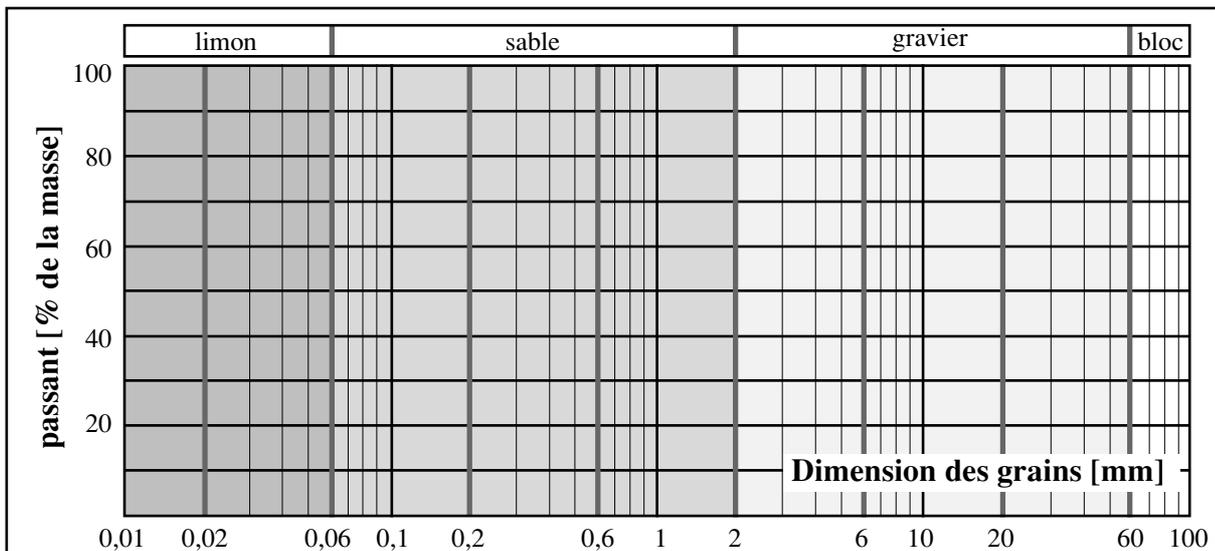


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**
 Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$ Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-30**Lieu de l'essai:** ESSOR-2**Type du PDL:** Panda 2 cm²**But de l'essai:** Contrôle compactage fondation route**Date:** 1996-05-21**Matériau de remblayage:** grave I**Ømax:** 65 mmMasse volumique par nucléomètre:  $\rho = 2,1$ Echant. prélevé dans la fouille: **3**Essai M_E :  $M_{E 0,15-0,25} = 87,5 \text{ MPa}$ Echant. prélevé au tas:  **3**

Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-31

Lieu de l'essai: ESSOR-4

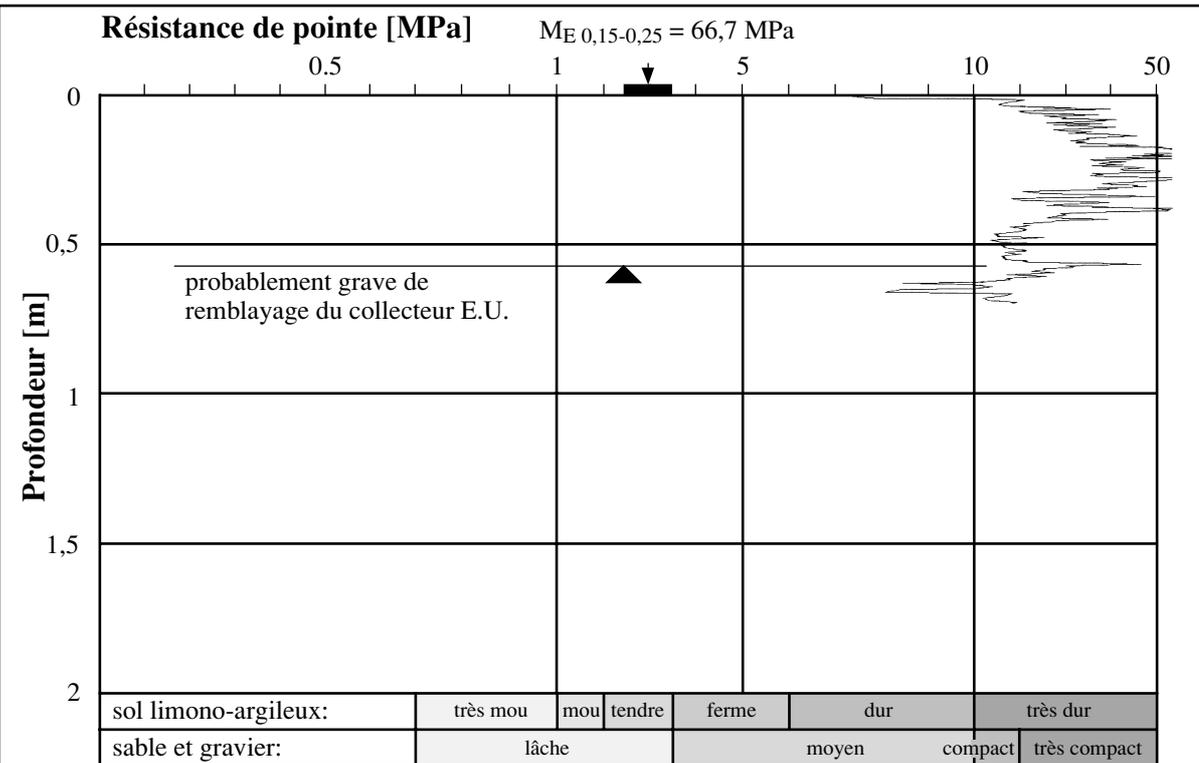
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fondation route

Date: 1996-05-21

Matériau de remblayage: grave I

Ømax: 65 mm

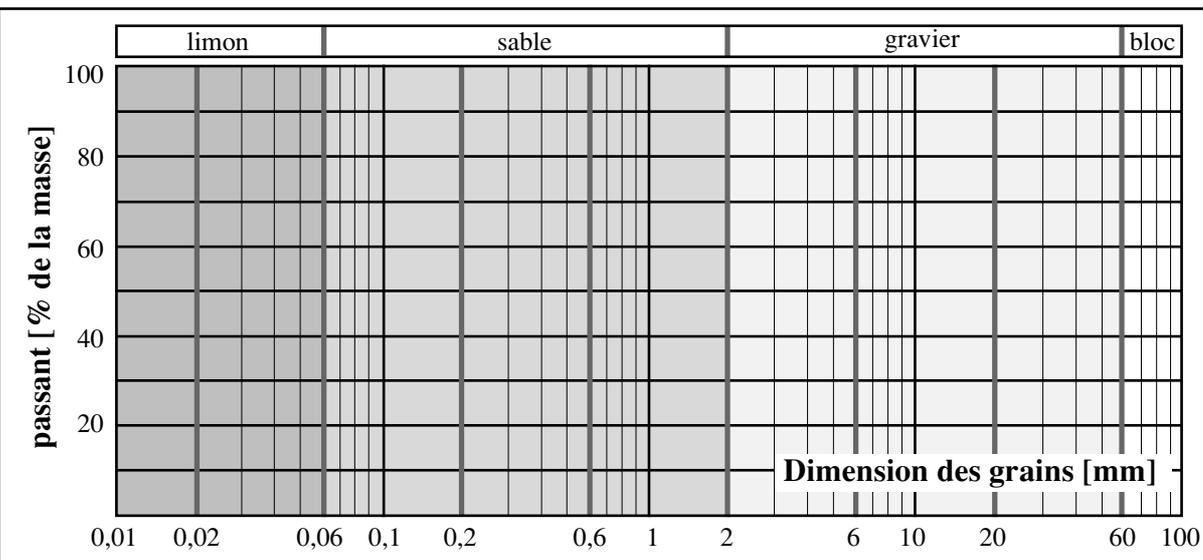


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5\ \text{MPa}$

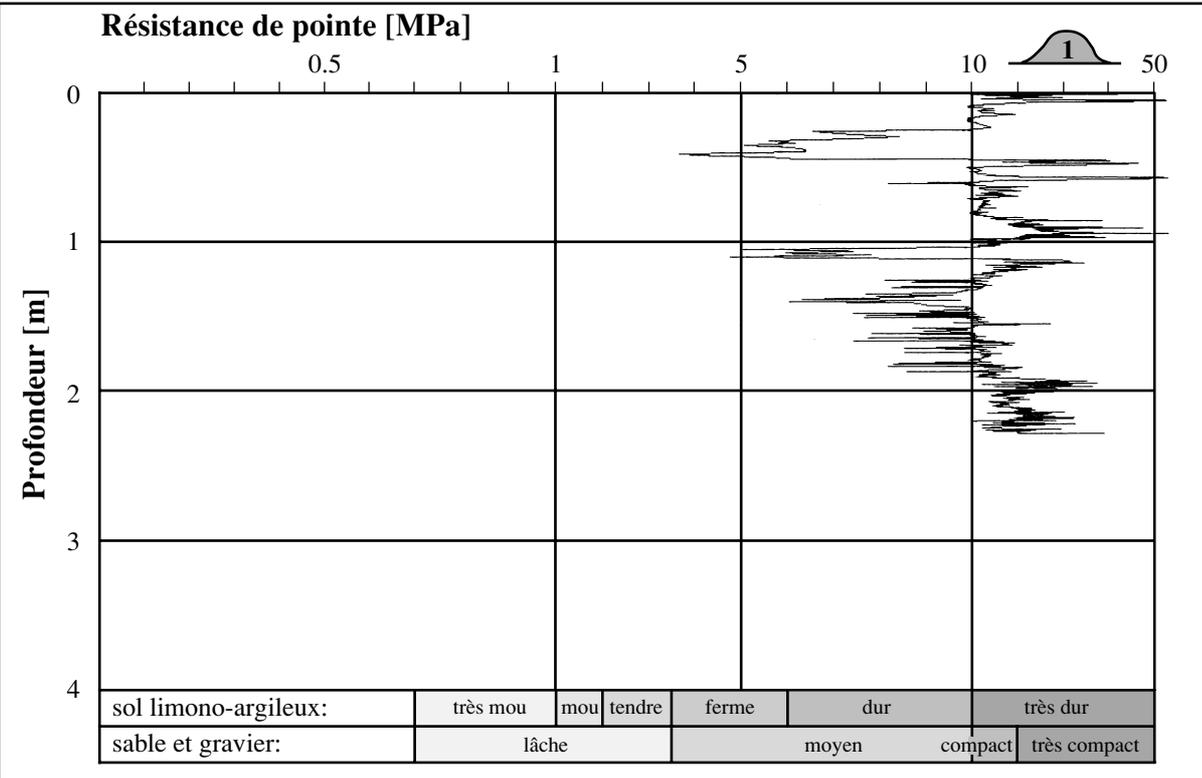
Echant. prélevé au tas: **3**



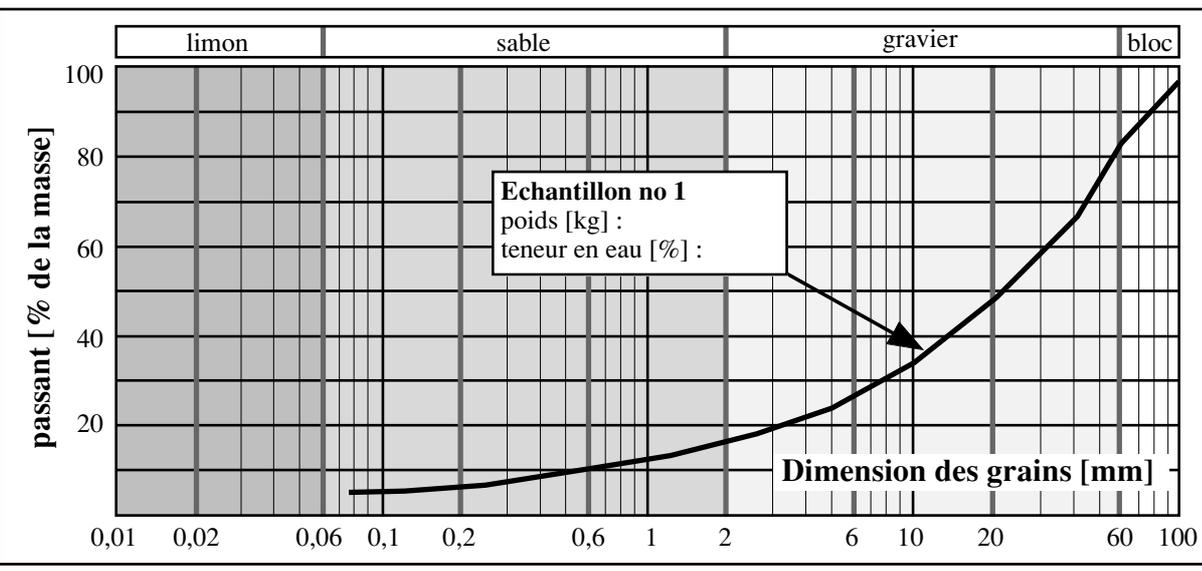
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-32

Lieu de l'essai: DHV-1	Type du PDL: Panda 2 cm ²
But de l'essai: Contrôle compactage fouille	Date: 1998-10-05
Matériau de remblayage: grave II	Ømax: >100 mm



Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$	Echant. prélevé dans la fouille: 3
Essai M_E : $M_{E,0,15-0,25} = 87,5$ MPa	Echant. prélevé au tas: 3



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-33

Lieu de l'essai: DHV-2

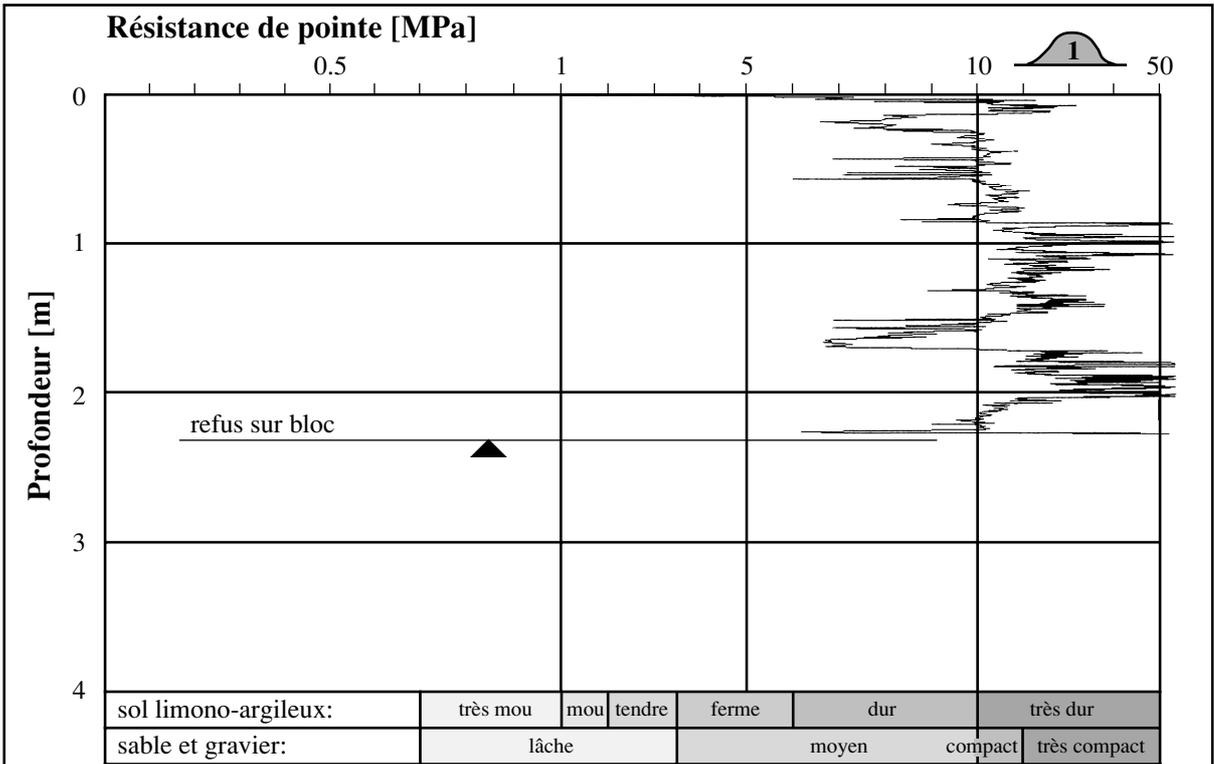
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille

Date: 1998-10-05

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: >100 mm

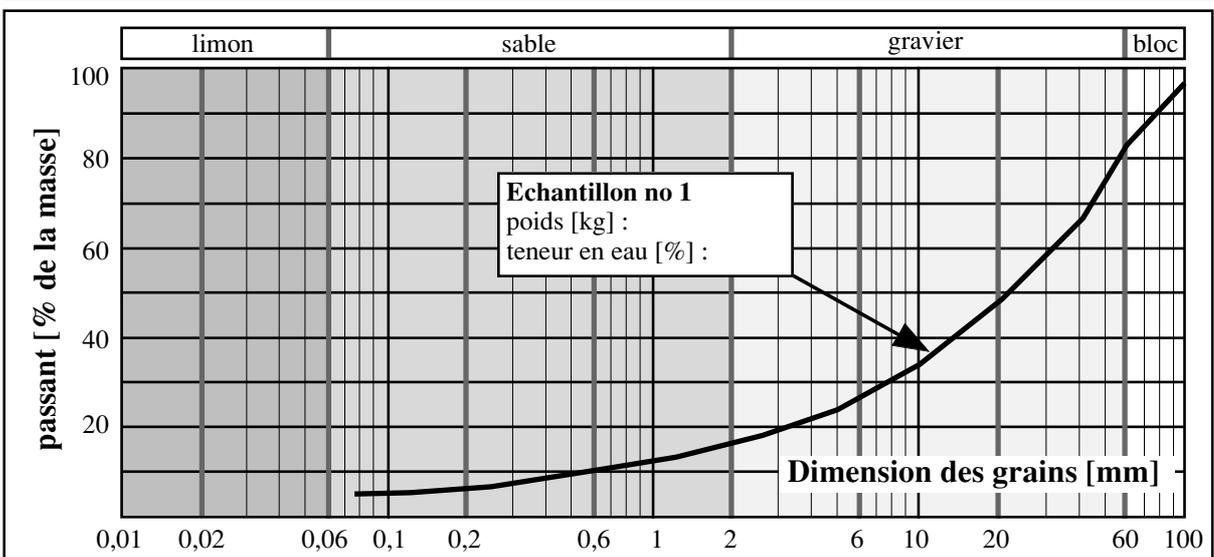


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E 0,15-0,25} = 87,5$ MPa

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-34

Lieu de l'essai: DHV-3

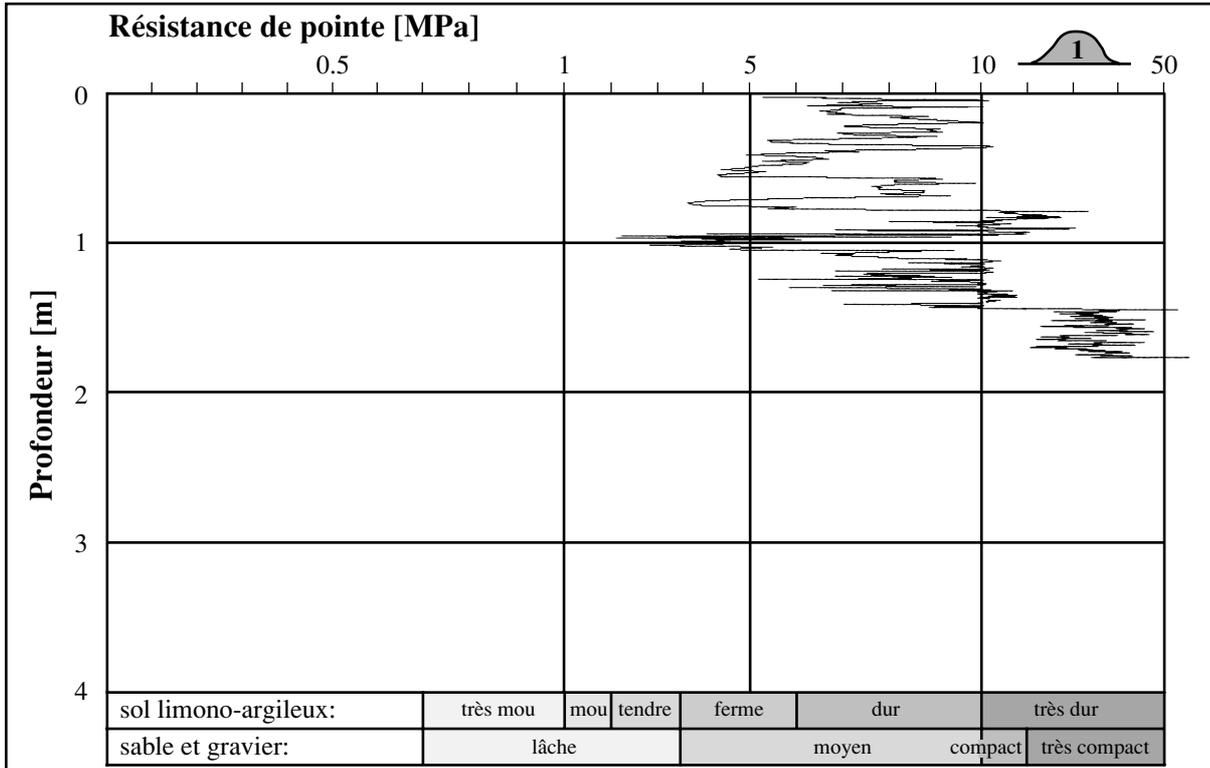
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille

Date: 1998-10-05

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: >100 mm

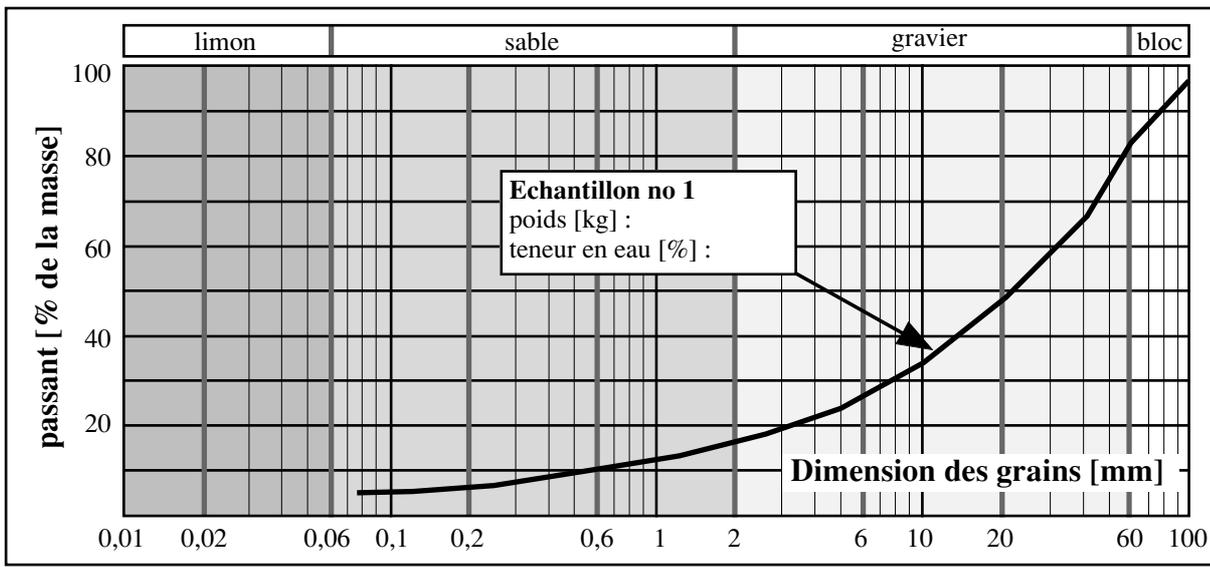


Masse volumique par nucléomètre: ρ = 2,1

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E: M_{E 0,15-0,25} = 87,5 MPa

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-35

Lieu de l'essai: DHV-4

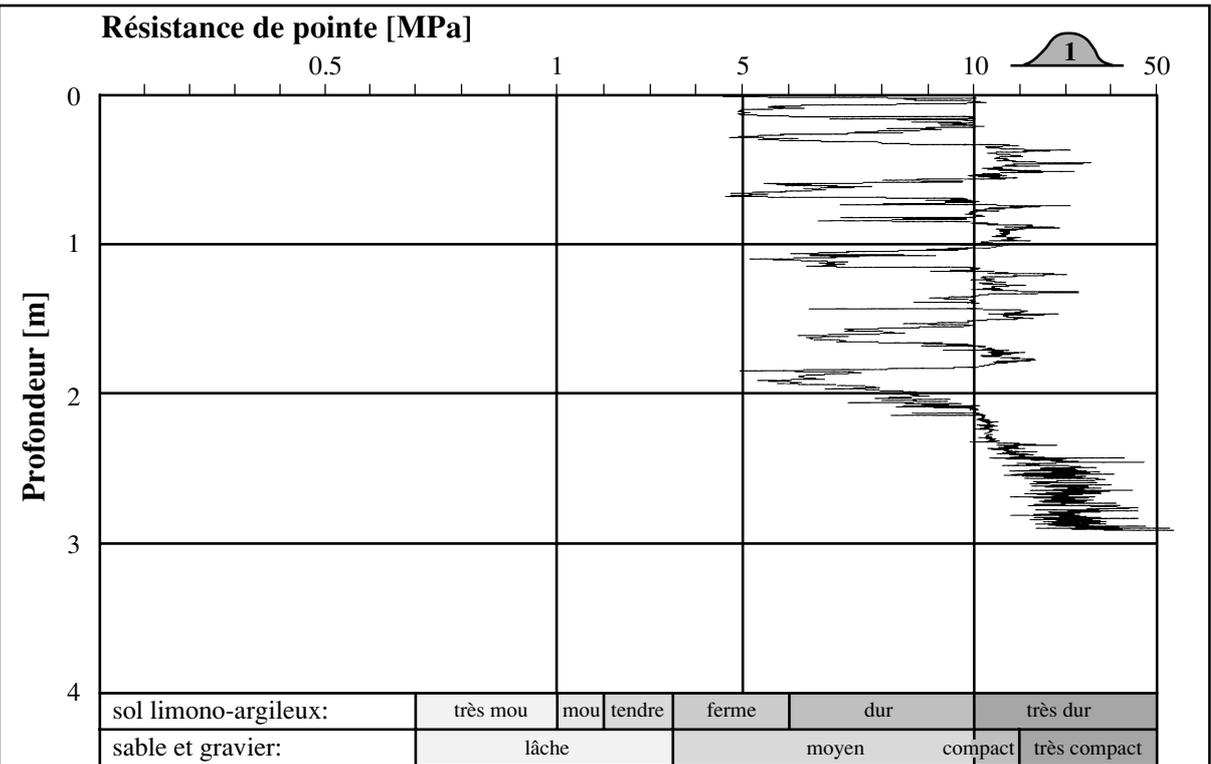
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille

Date: 1998-10-05

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: >100 mm

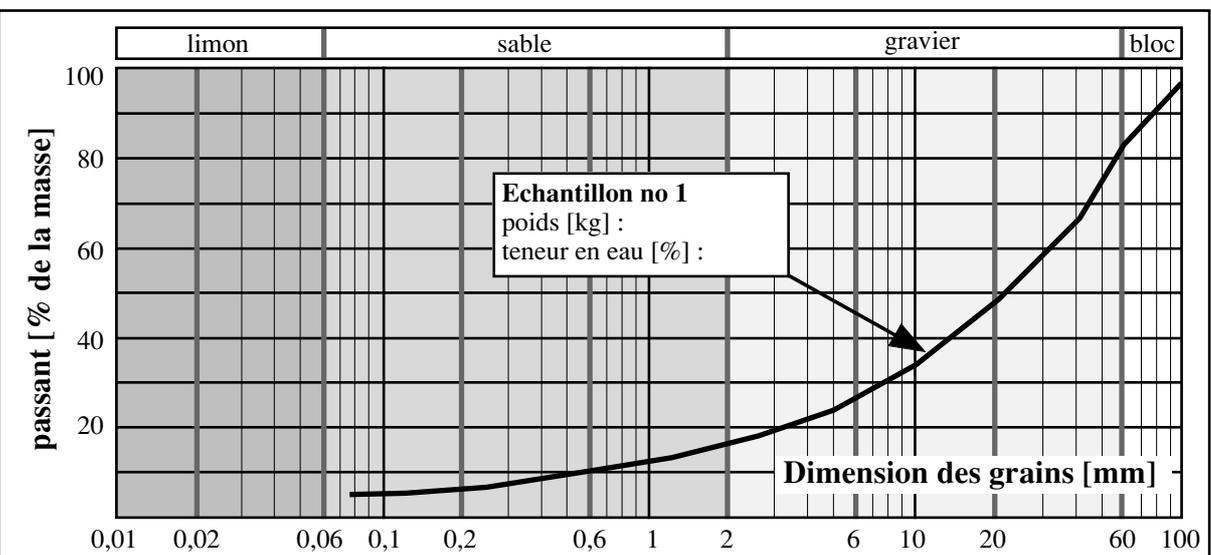


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E,0,15-0,25} = 87,5$ MPa

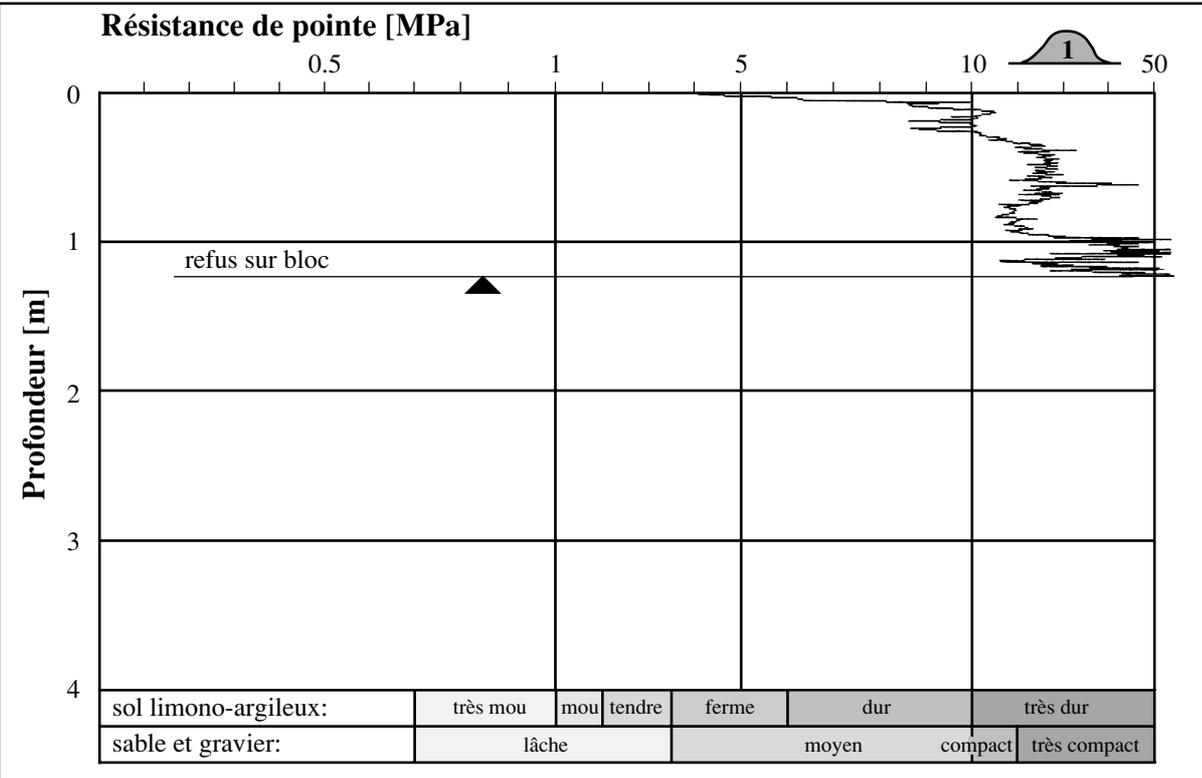
Echant. prélevé au tas: **3**



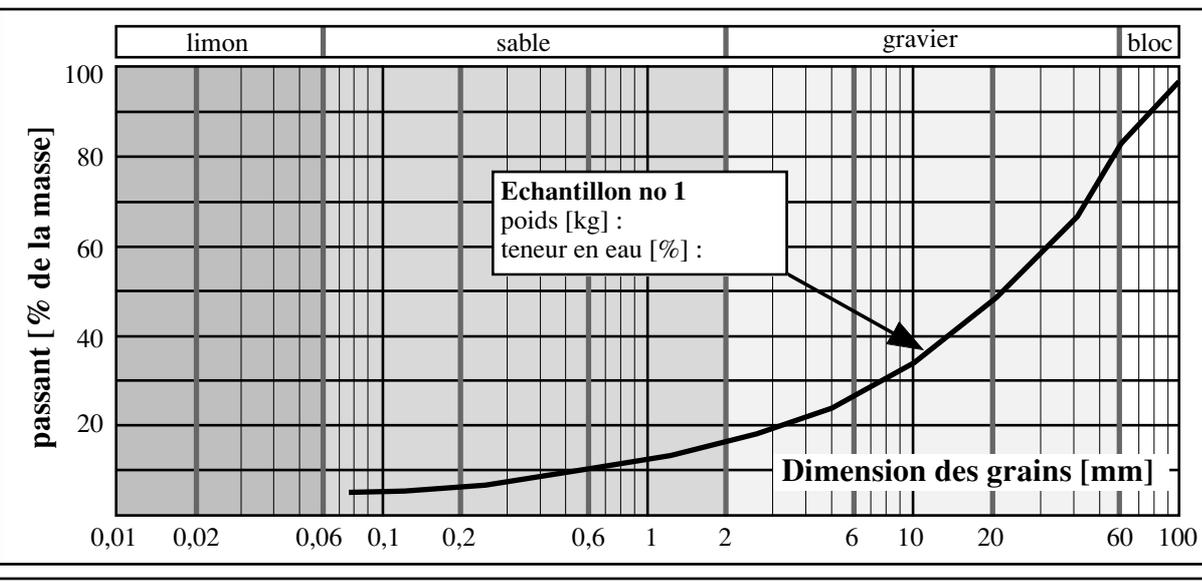
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-36

Lieu de l'essai: DHV-5	Type du PDL: Panda 2 cm ²
But de l'essai: Contrôle compactage fouille	Date: 1998-10-16
Matériau de remblayage: grave II	Ømax: >100 mm



Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$	Echant. prélevé dans la fouille: 3
Essai M_E : $M_{E,0,15-0,25} = 87,5$ MPa	Echant. prélevé au tas: 3



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-37

Lieu de l'essai: DHV-6

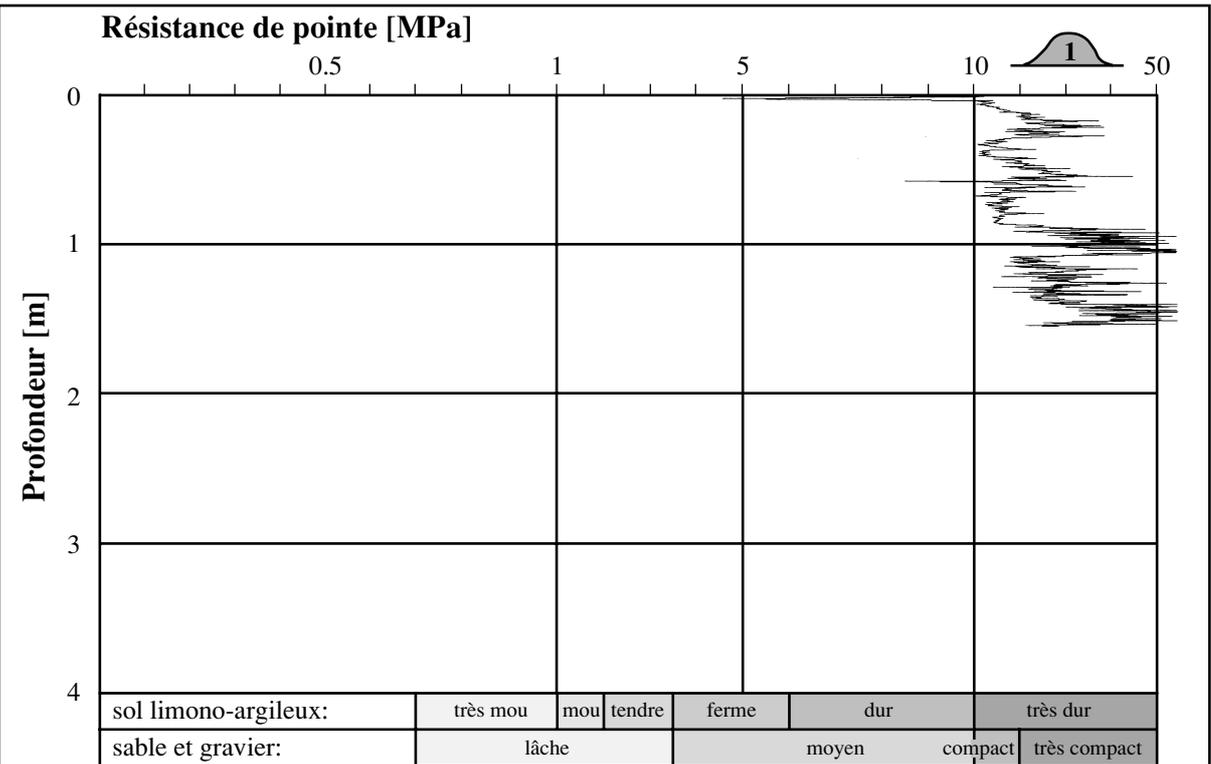
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille

Date: 1998-10-16

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: >100 mm

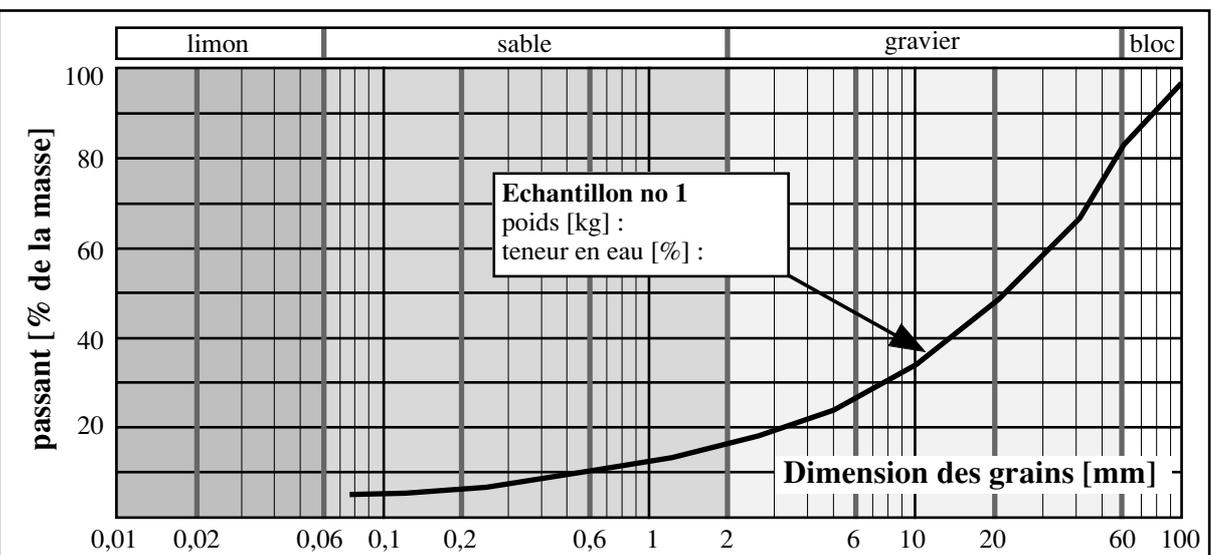


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E,0,15-0,25} = 87,5$ MPa

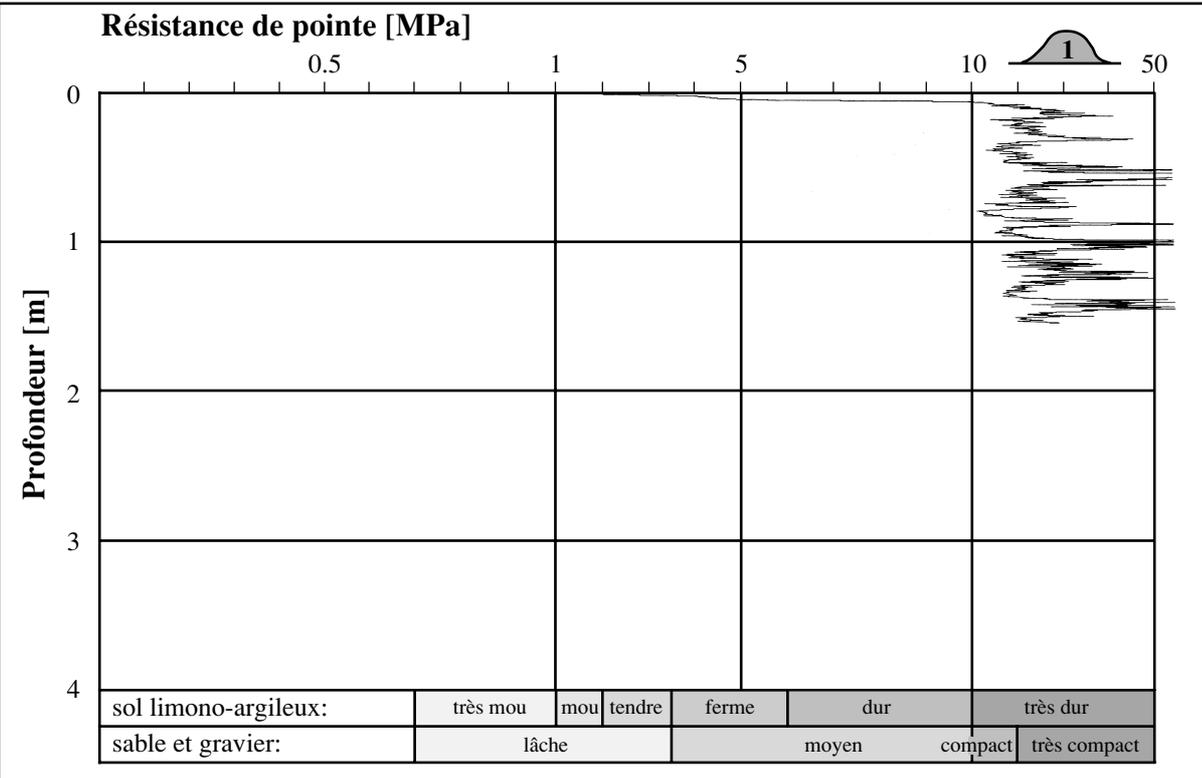
Echant. prélevé au tas: **3**



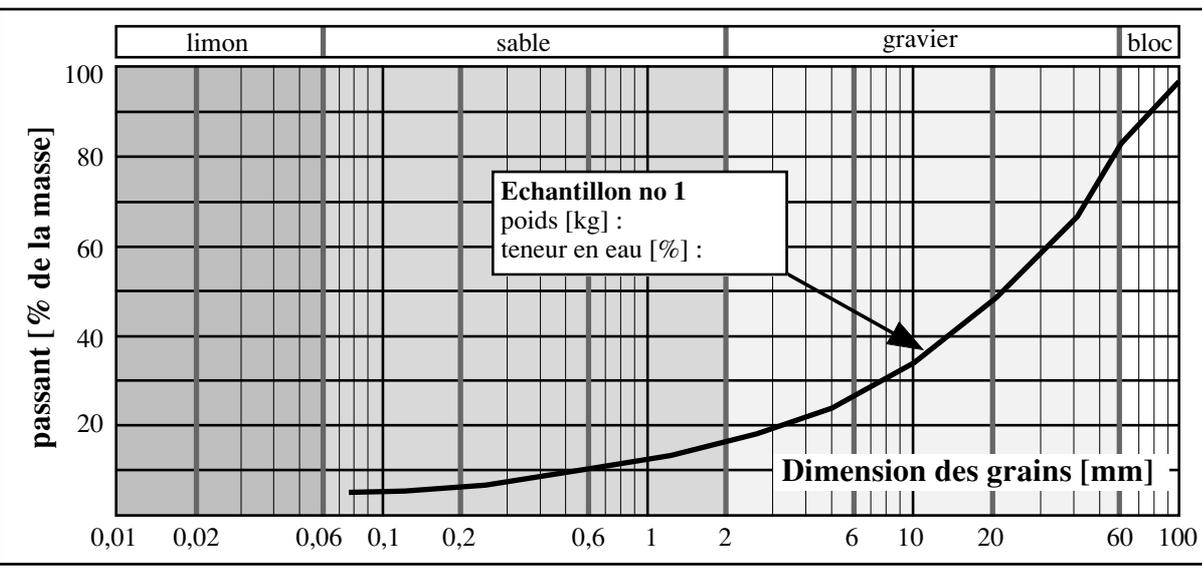
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-38

Lieu de l'essai: DHV-7	Type du PDL: Panda 2 cm ²
But de l'essai: Contrôle compactage fouille	Date: 1998-10-16
Matériau de remblayage: grave II	Ømax: >100 mm



Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$	Echant. prélevé dans la fouille: 3
Essai M_E : $M_{E,0,15-0,25} = 87,5$ MPa	Echant. prélevé au tas: 3



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-39

Lieu de l'essai: DHV-8

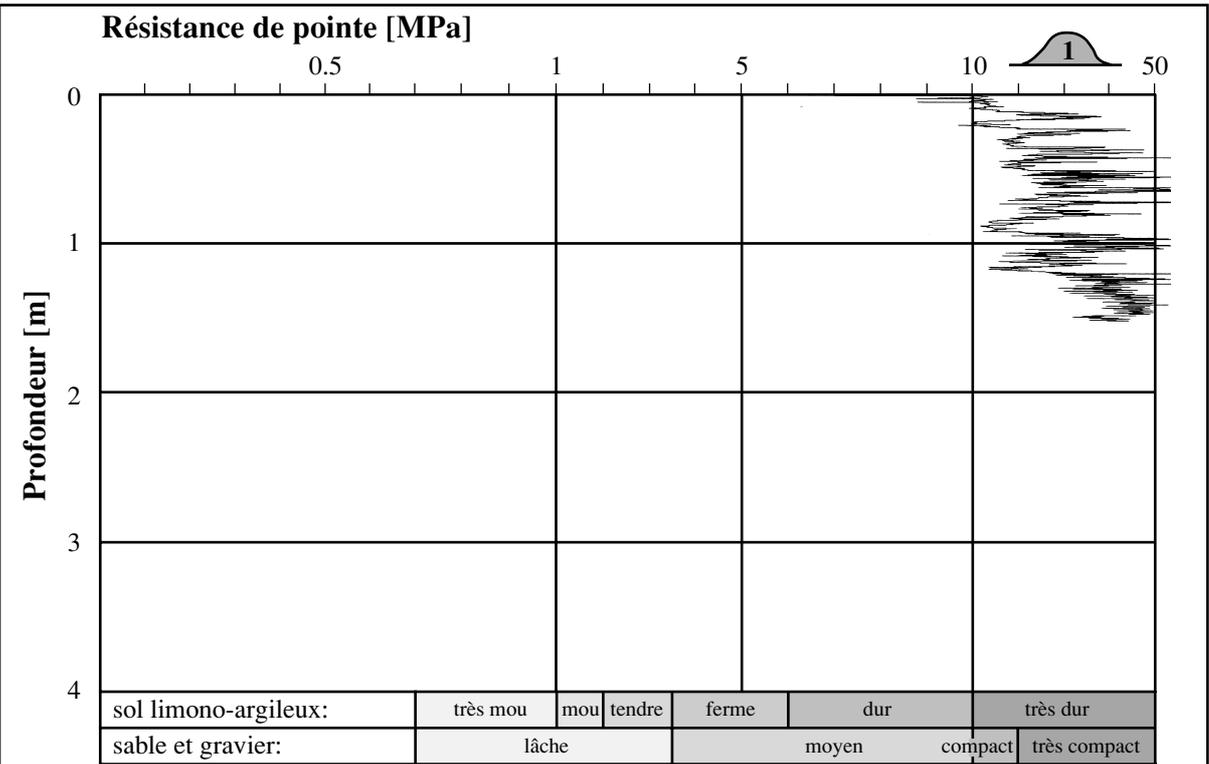
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille

Date: 1998-10-16

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: >100 mm

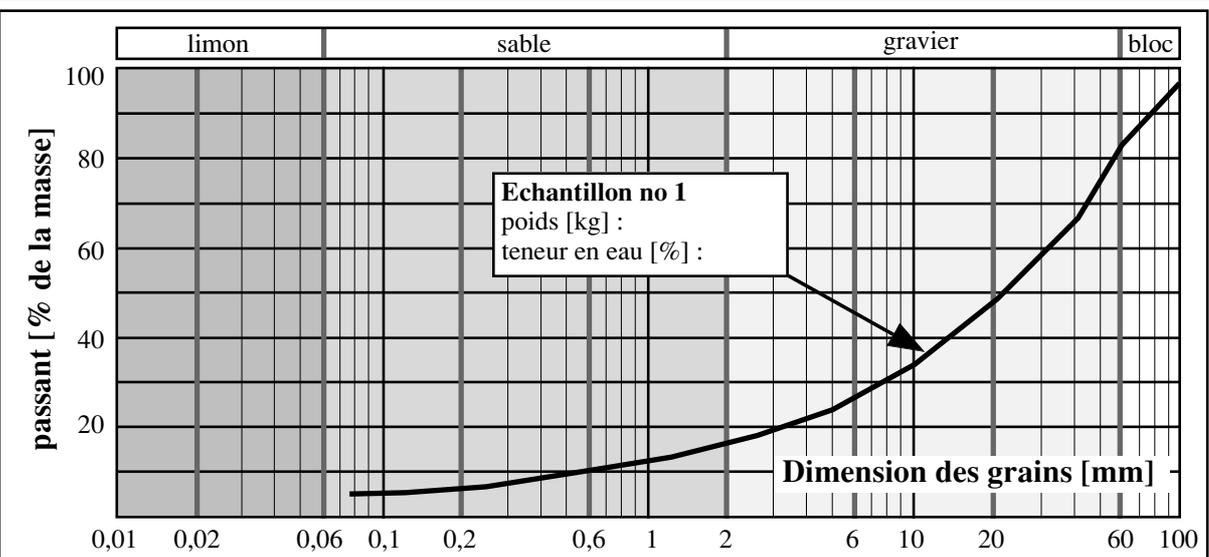


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E 0,15-0,25} = 87,5$ MPa

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-40

Lieu de l'essai: DHV-9

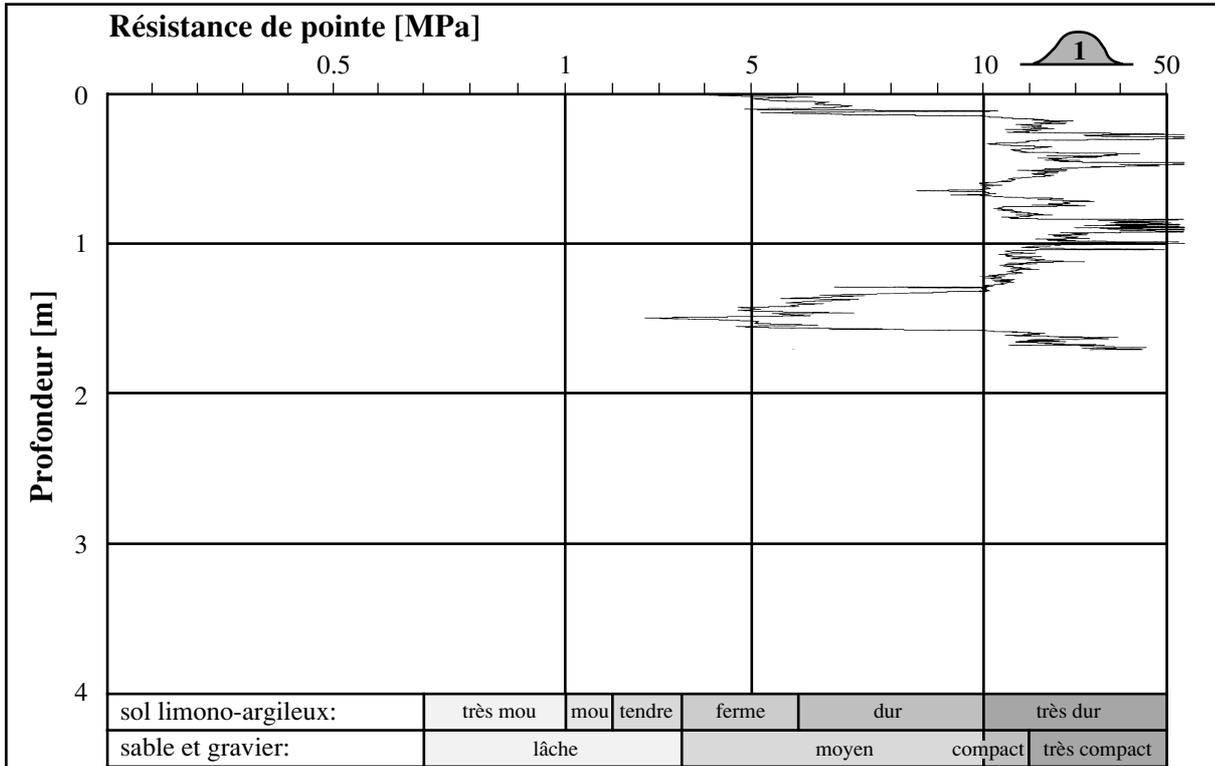
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille

Date: 1998-10-16

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: >100 mm

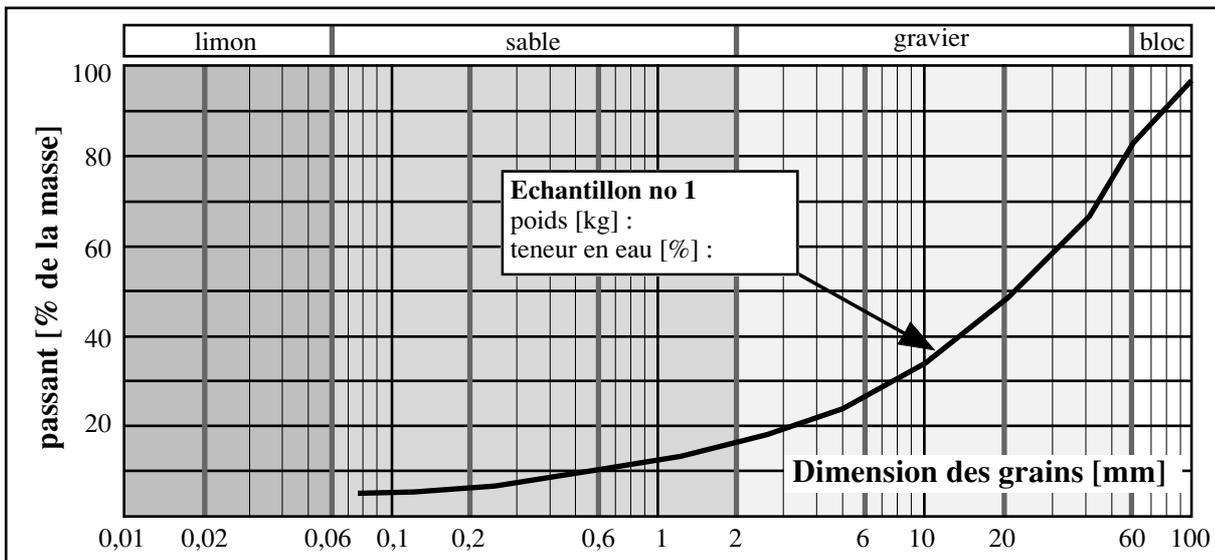


Masse volumique par nucléomètre: ρ = 2,1

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E: M_{E 0,15-0,25} = 87,5 MPa

Echant. prélevé au tas: **3**



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-41

Lieu de l'essai: DHV-10

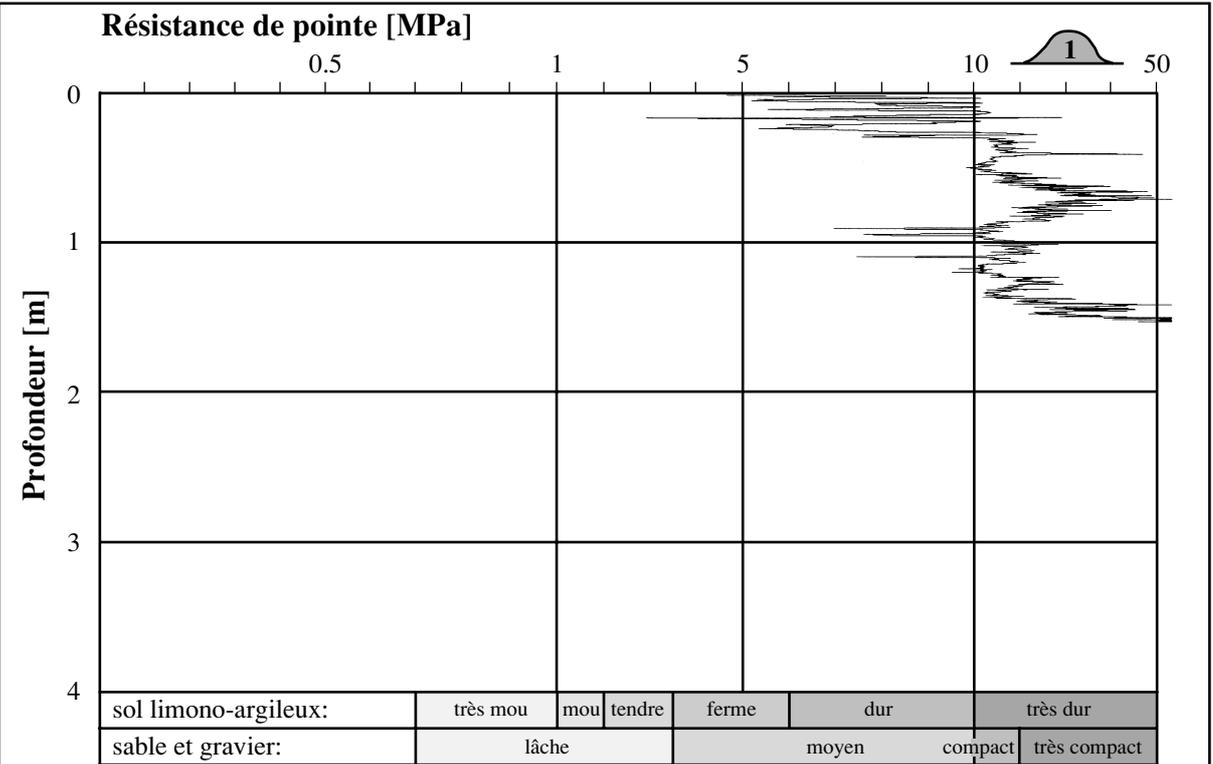
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille

Date: 1998-10-16

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: >100 mm

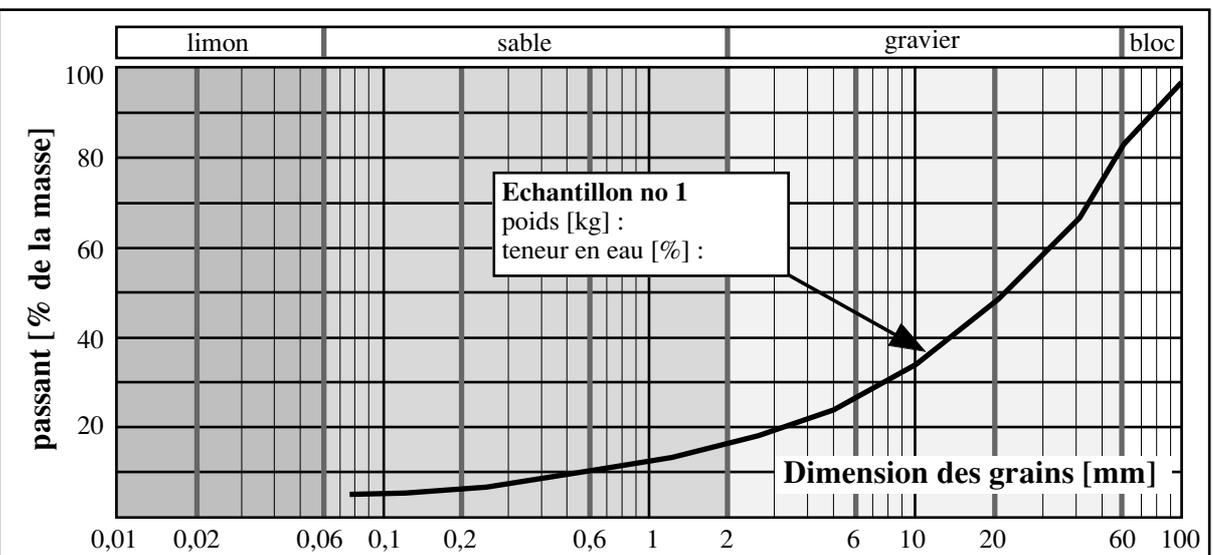


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai M_E : $M_{E,0,15-0,25} = 87,5$ MPa

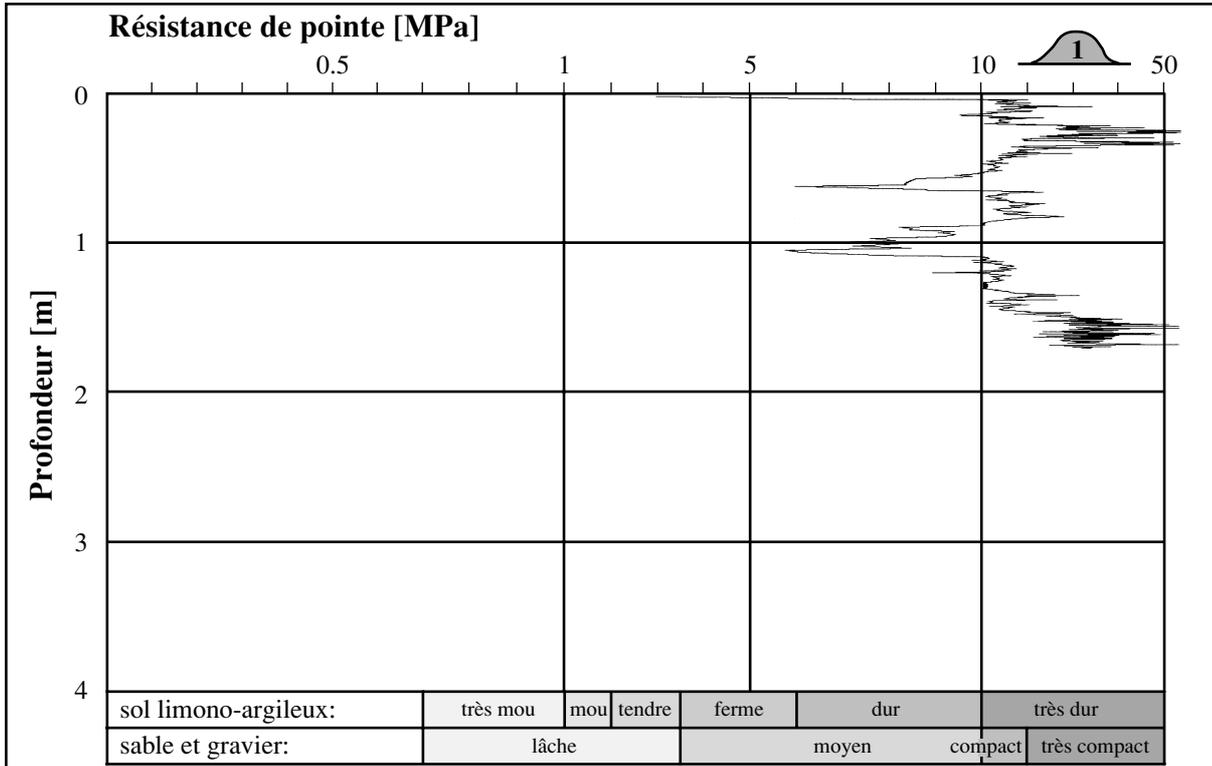
Echant. prélevé au tas: **3**



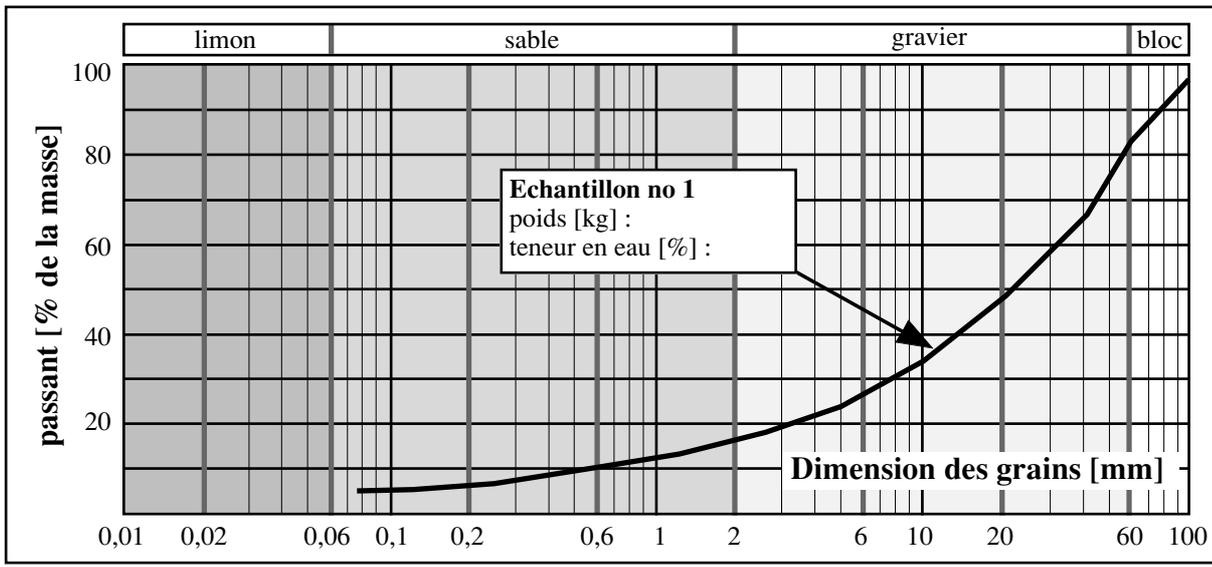
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-42

Lieu de l'essai: DHV-11	Type du PDL: Panda 2 cm ²
But de l'essai: Contrôle compactage fouille	Date: 1998-10-16
Matériau de remblayage: grave II	Ømax: >100 mm



Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$	Echant. prélevé dans la fouille: 3
Essai M_E : $M_{E\ 0,15-0,25} = 87,5$ MPa	Echant. prélevé au tas: 3



Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no A-43

Lieu de l'essai: DHV-12

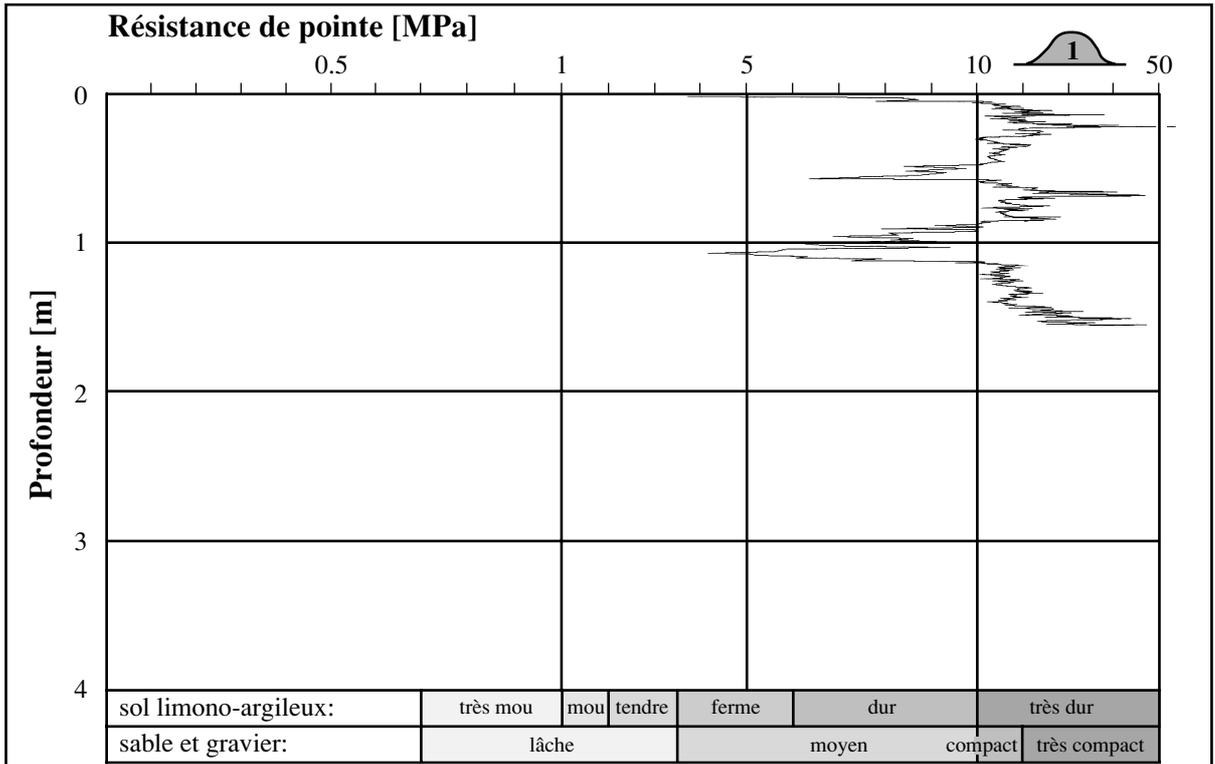
Type du PDL: Panda 2 cm²

But de l'essai: Contrôle compactage fouille

Date: 1998-10-16

Matériau de remblayage: grave II

Ømax: >100 mm

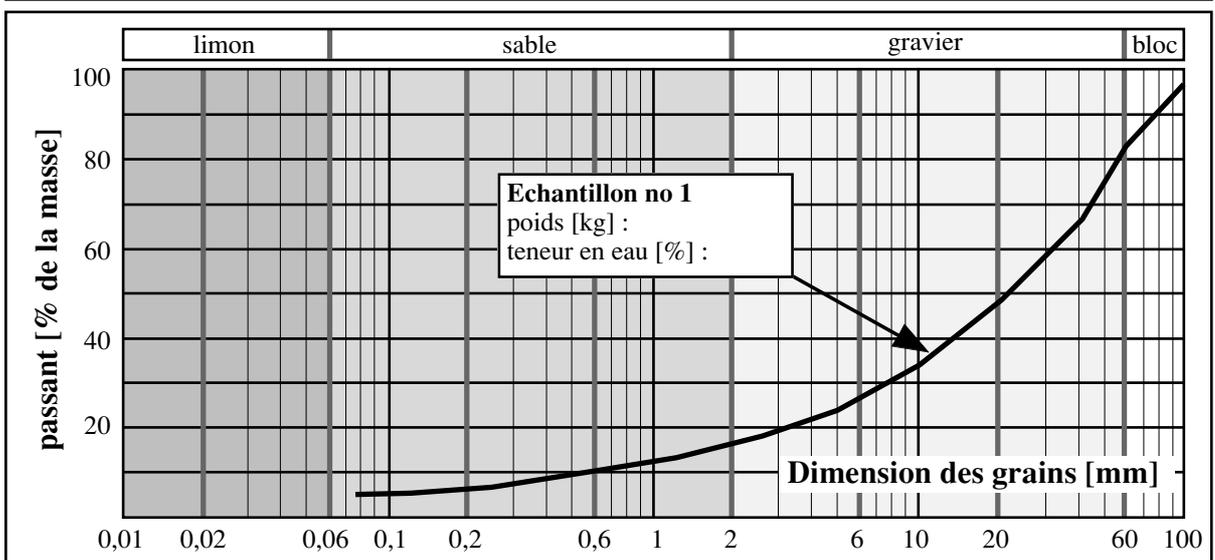


Masse volumique par nucléomètre: $\rho = 2,1$

Echant. prélevé dans la fouille: **3**

Essai ME: ME_{0,15-0,25} = 87,5 MPa

Echant. prélevé au tas: **3**



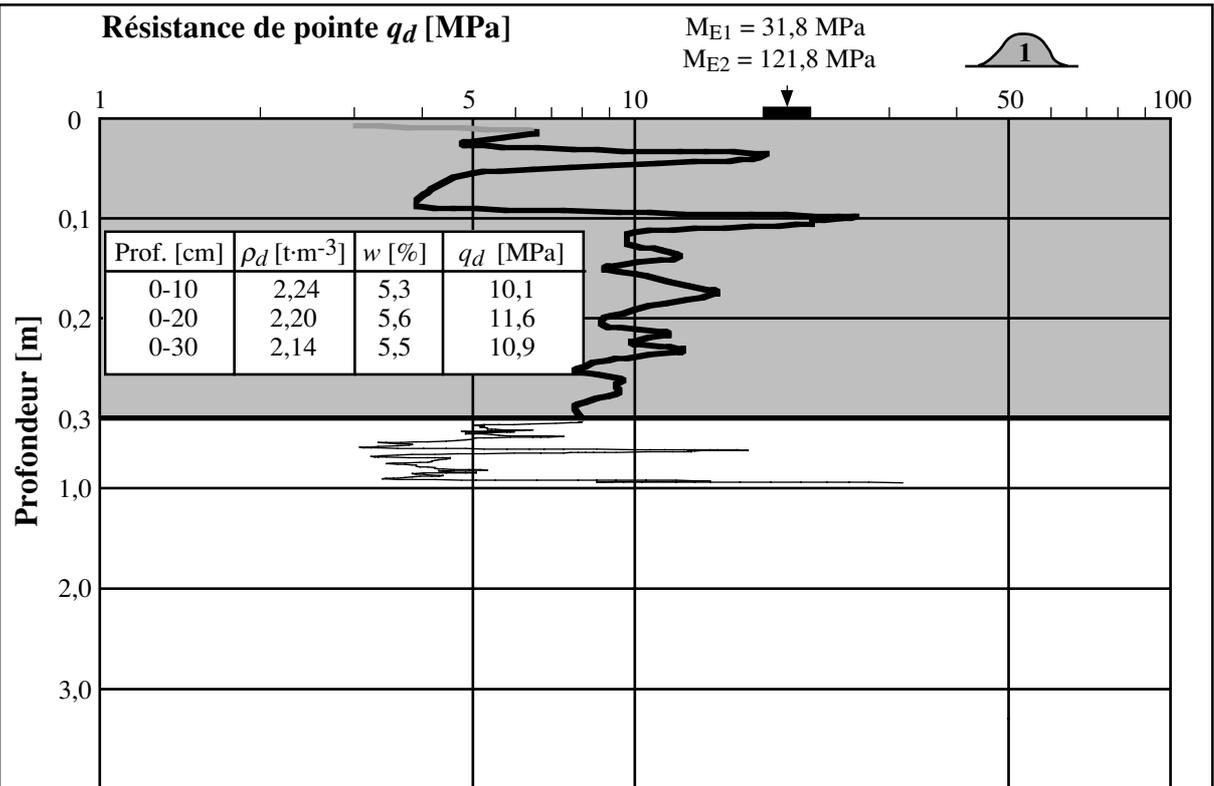
Annexes B : Fiches d'essais « Tentatives de corrélation »

Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

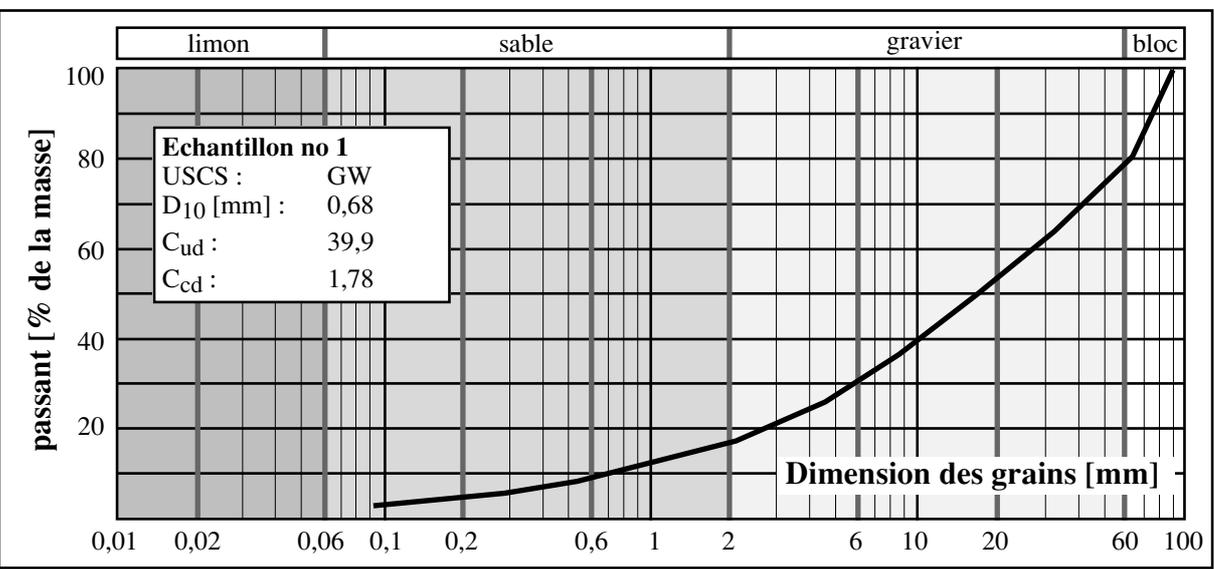
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-01

No de l'essai: 1303B-01 **Type du PDL:** Panda 2 cm²
Profondeur dans fouille [m]: - 0.90 **Date:** 2000-7-13
Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 150 mm **Ømax granul.:** 100 mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte Echant. prélevé au tas: 3

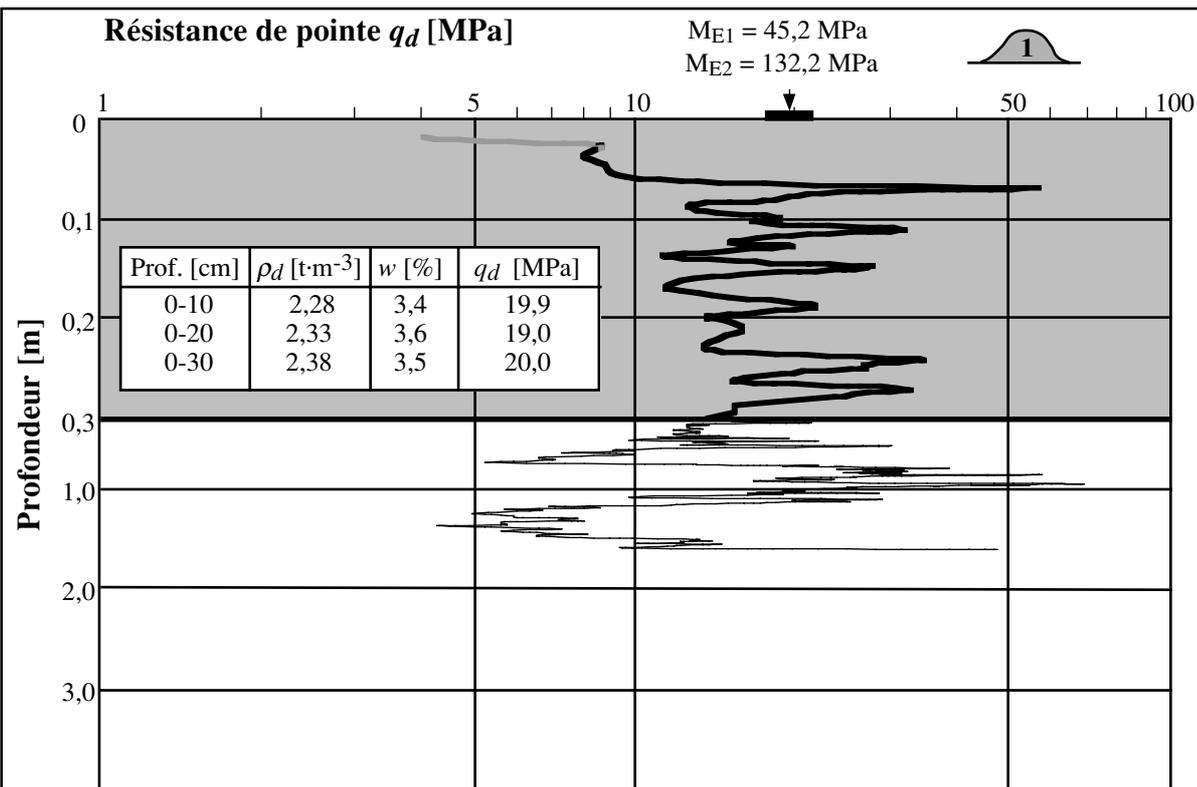


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-02

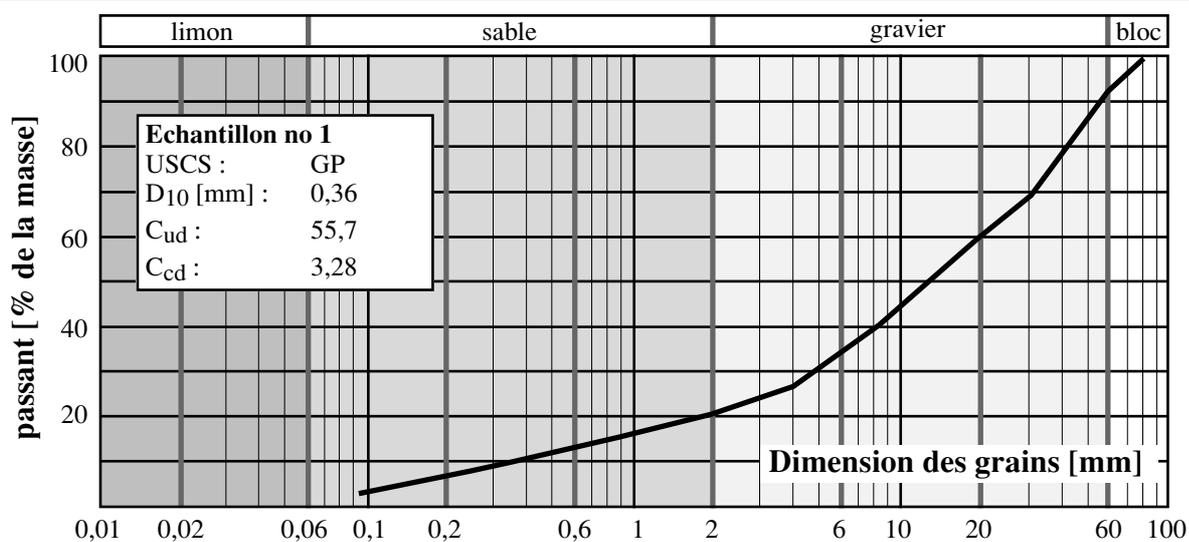
No de l'essai: 1303B-02 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0.10 Date: 2000-7-7
 Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 60 mm Ø_{max} granul.: 80 mm



Essai M_E :

Partie du pénétoграмme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

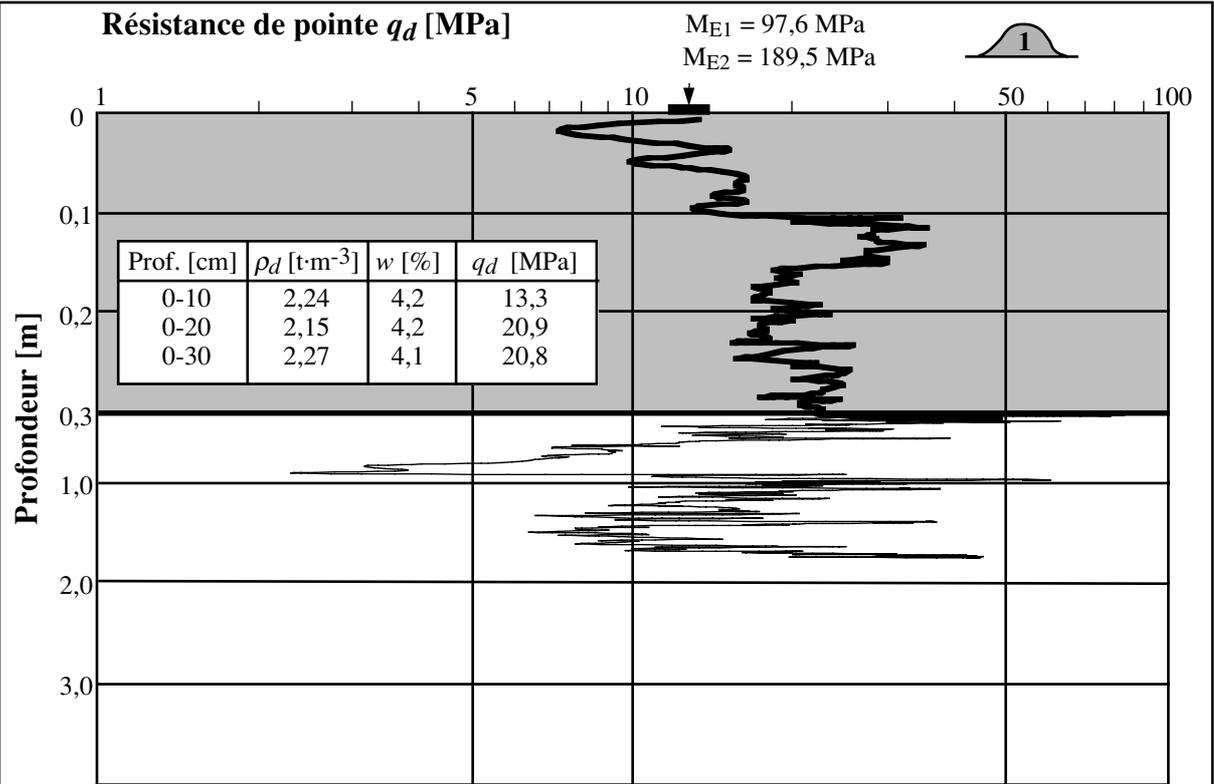


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

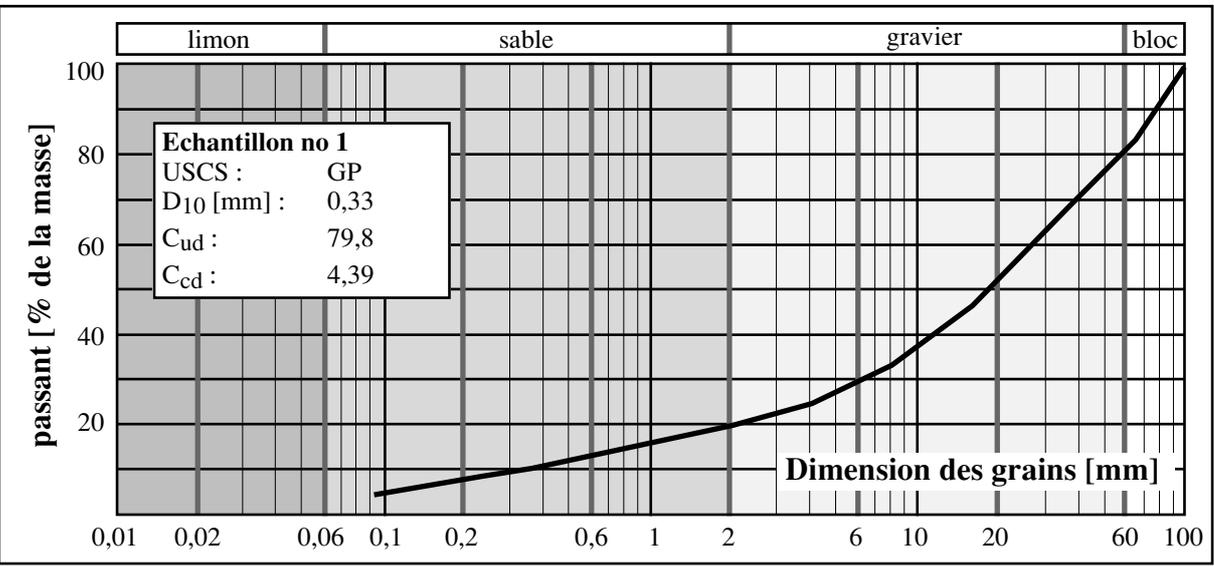
Fiche d'essai no B-03

No de l'essai: 1303c-01 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 2,65 Date: 2000-9-27
 Matériau de remblayage: grave 0 - 150 mm Ømax granul.: 100 mm



Essai M_E :

Echant. prélevé au tas:

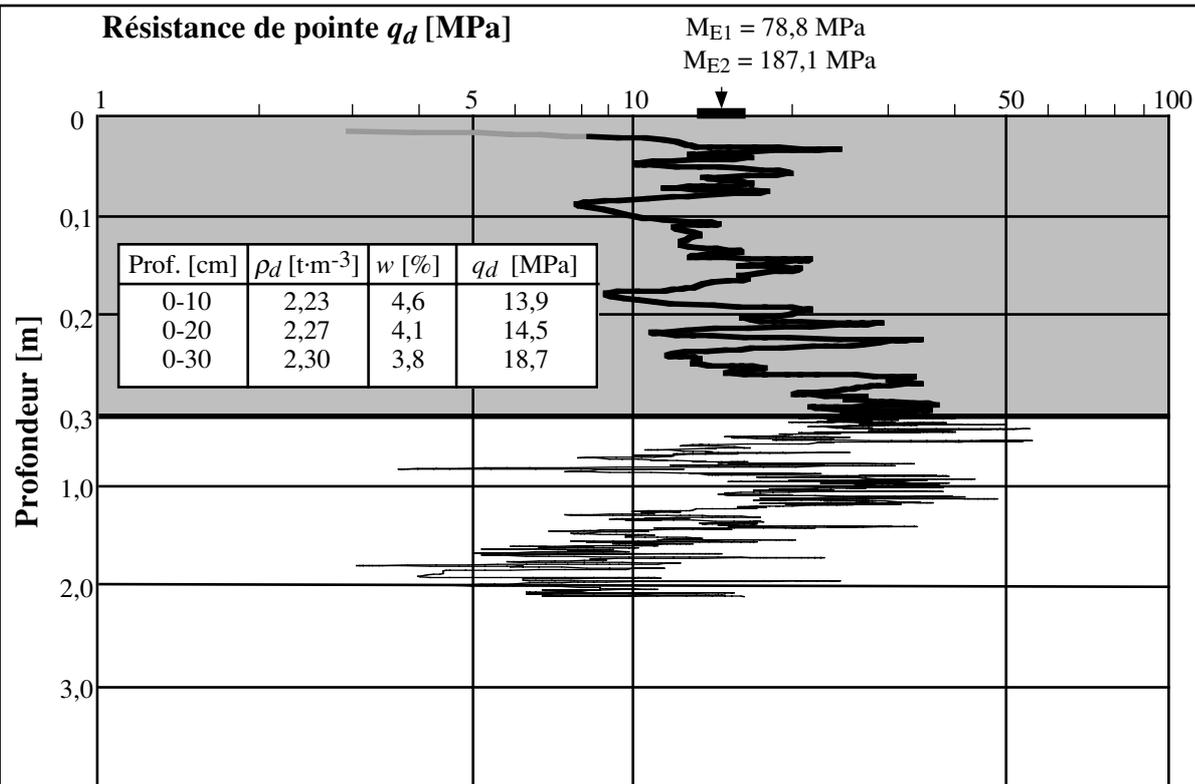


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

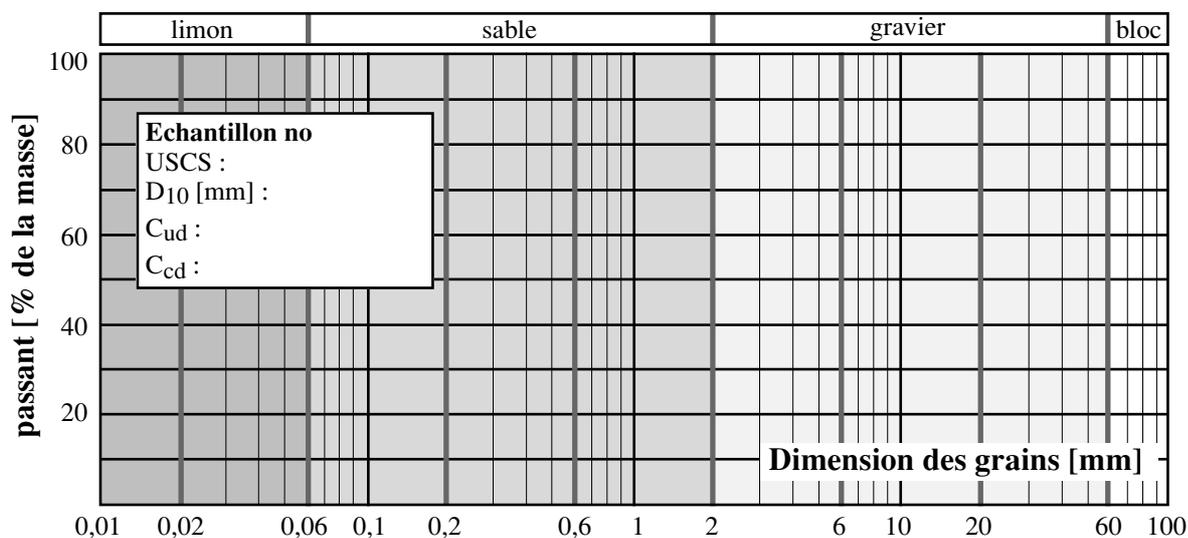
Fiche d'essai no B-04

No de l'essai: 1303c-02	Type du PDL: Panda 2 cm ²
Profondeur dans fouille [m]: - 2,65	Date: 2000-9-27
Matériau de remblayage: grave 0 - 150 mm	Ømax granul.: mm

Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

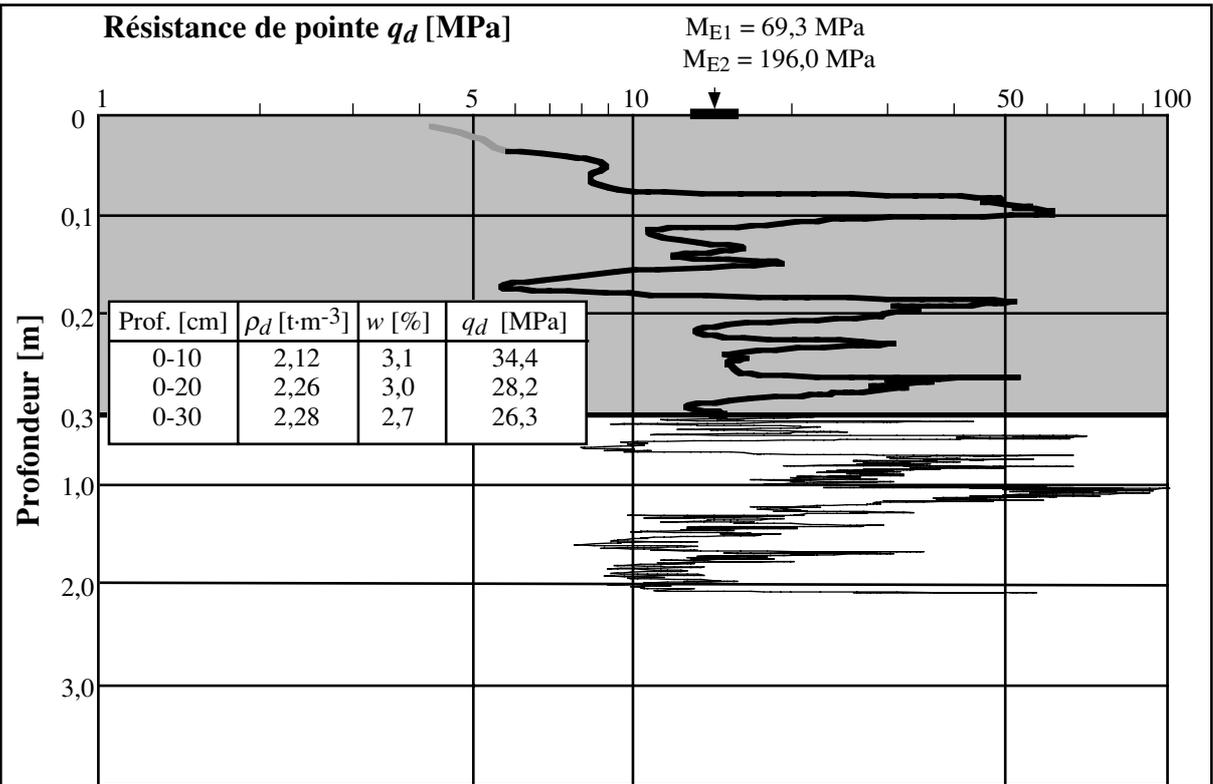
Echant. prélevé au tas:



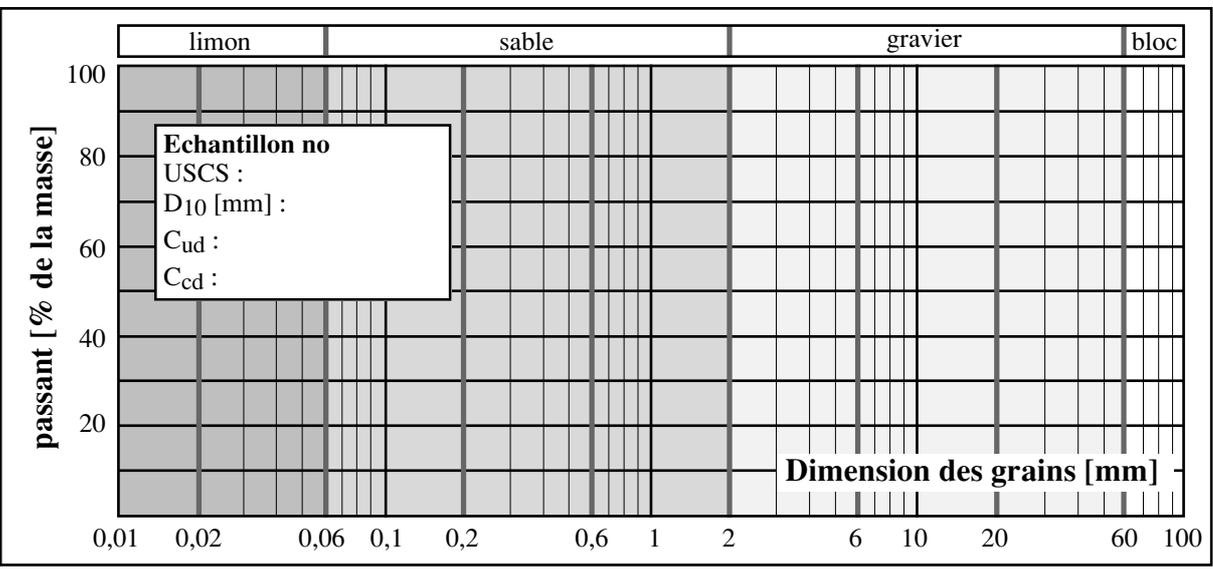
Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-05

No de l'essai: 1303c-03 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 1,65 Date: 2000-9-28
 Matériau de remblayage: grave 0 - 150 mm Ømax granul.: mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte Echant. prélevé au tas: 3

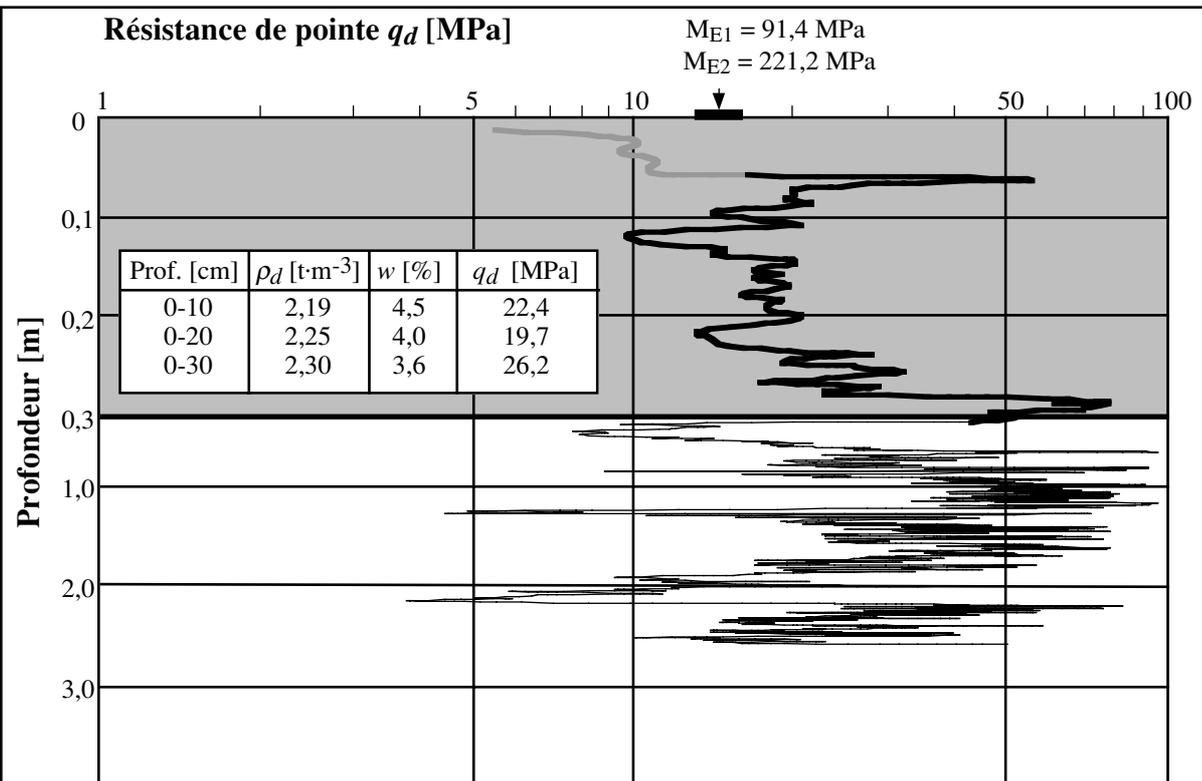


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

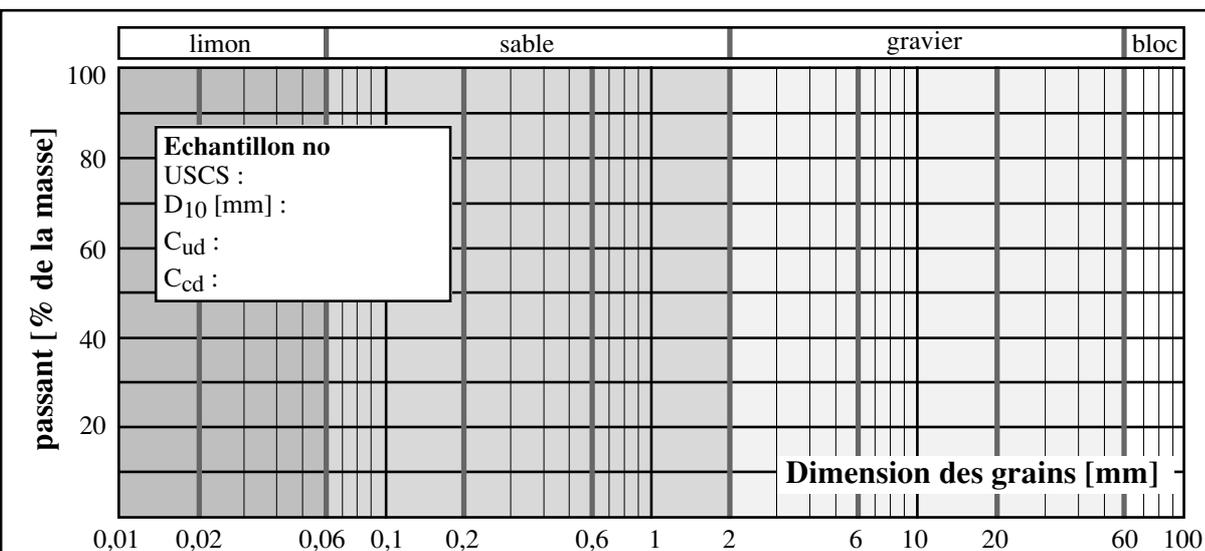
Fiche d'essai no B-06

No de l'essai: 1303c-04	Type du PDL: Panda 2 cm ²
Profondeur dans fouille [m]: - 1,65	Date: 2000-9-28
Matériau de remblayage: grave 0 - 150 mm	Ø_{max} granul.: mm

Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

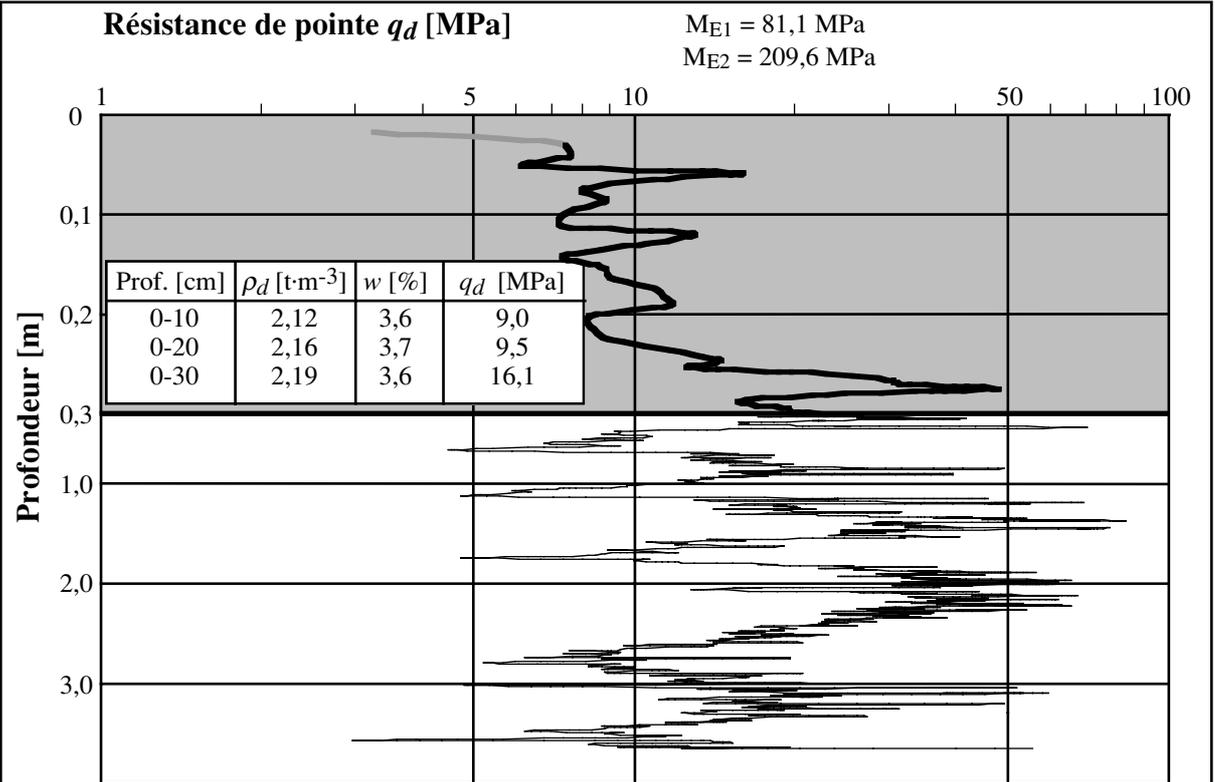


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-07

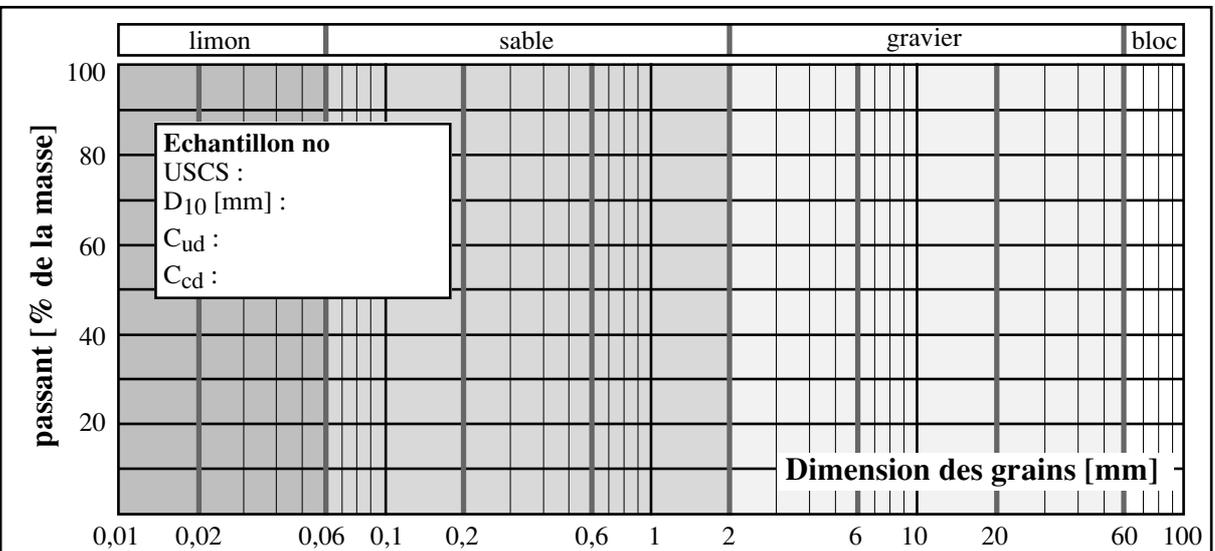
No de l'essai: 1303c-05 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0,50 Date: 2000-10-3
 Matériau de remblayage: grave 0 - 150 mm Ø_{max} granul.: mm



Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas: 3

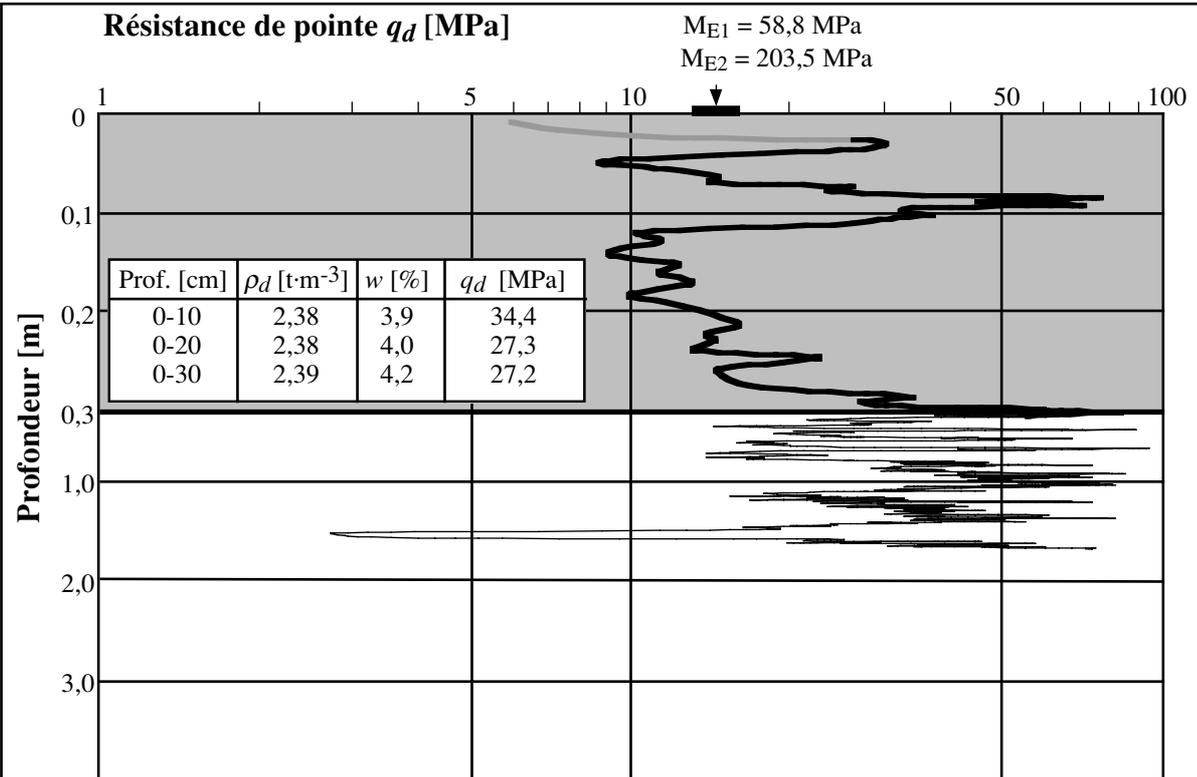


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-08

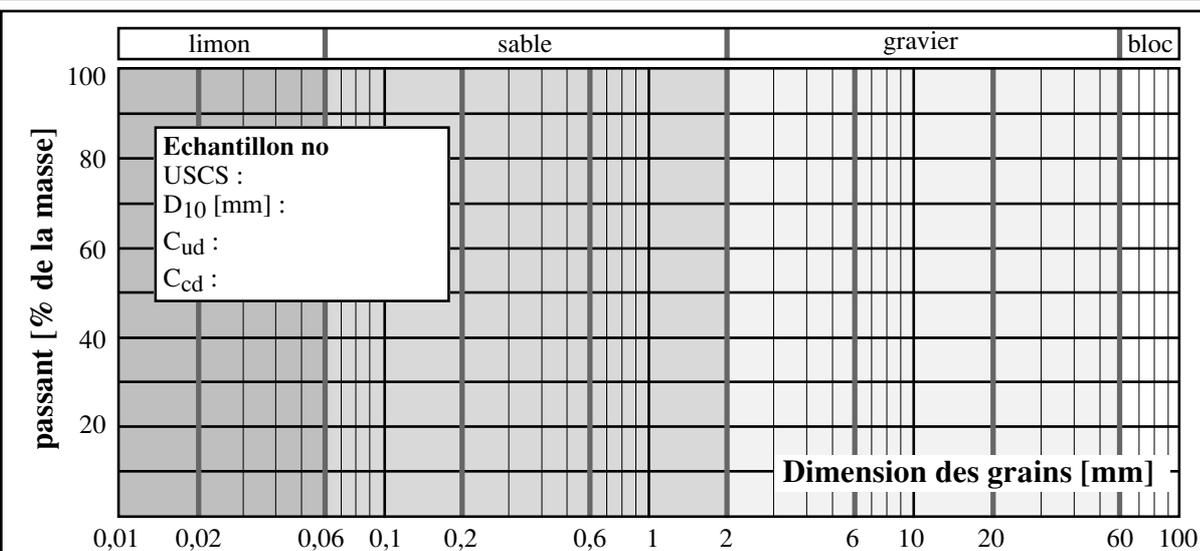
No de l'essai: 1303c-06 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0,80 Date: 2000-10-3
 Matériau de remblayage: grave 0 - 150 mm Ømax granul.: mm



Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

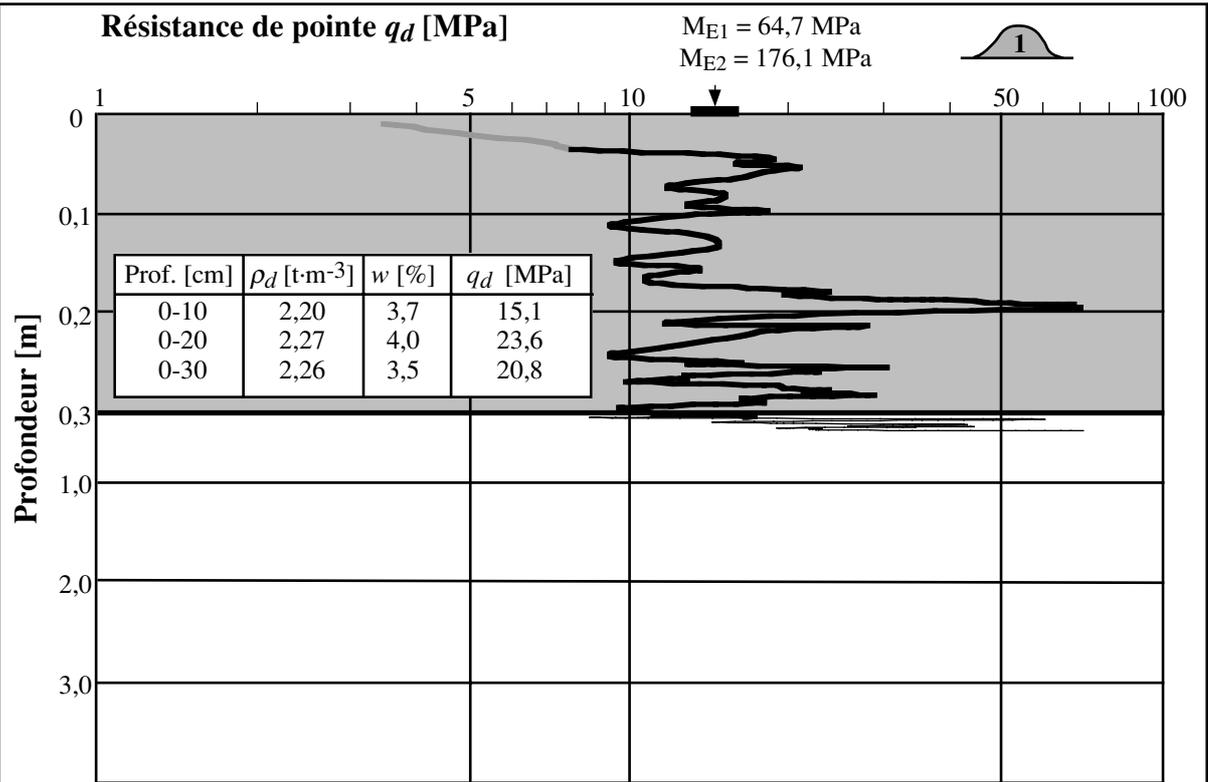


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

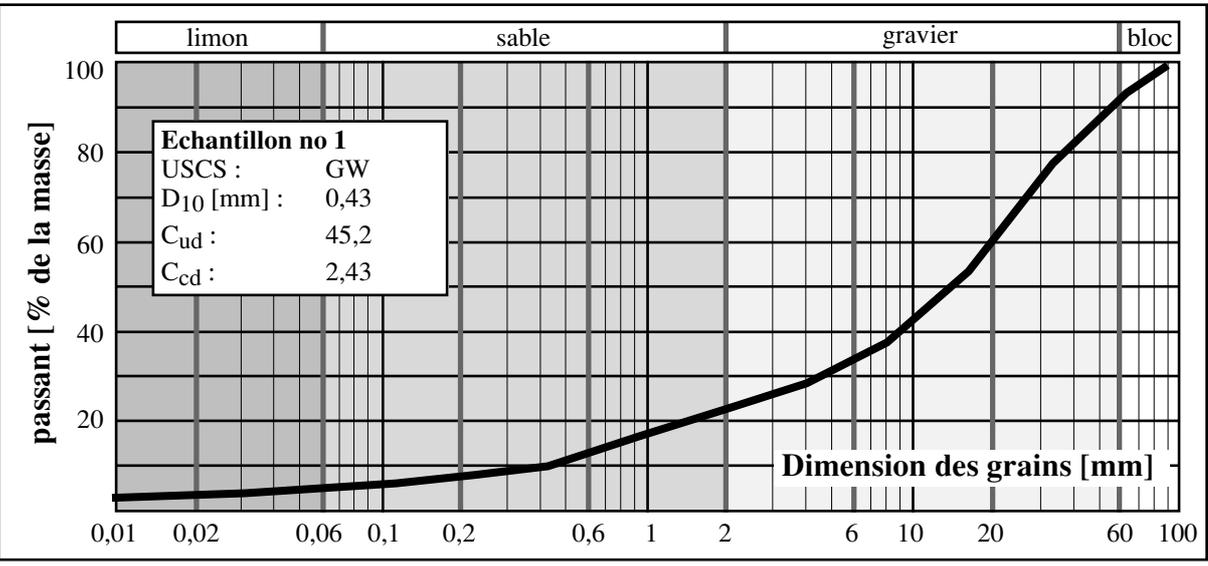
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-09

No de l'essai: 1303d-01 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 2,00 Date: 2000-9-26
 Matériau de remblayage: grave 0 - 100 mm Ø_{max} granul.: 90 mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte Echant. prélevé au tas:

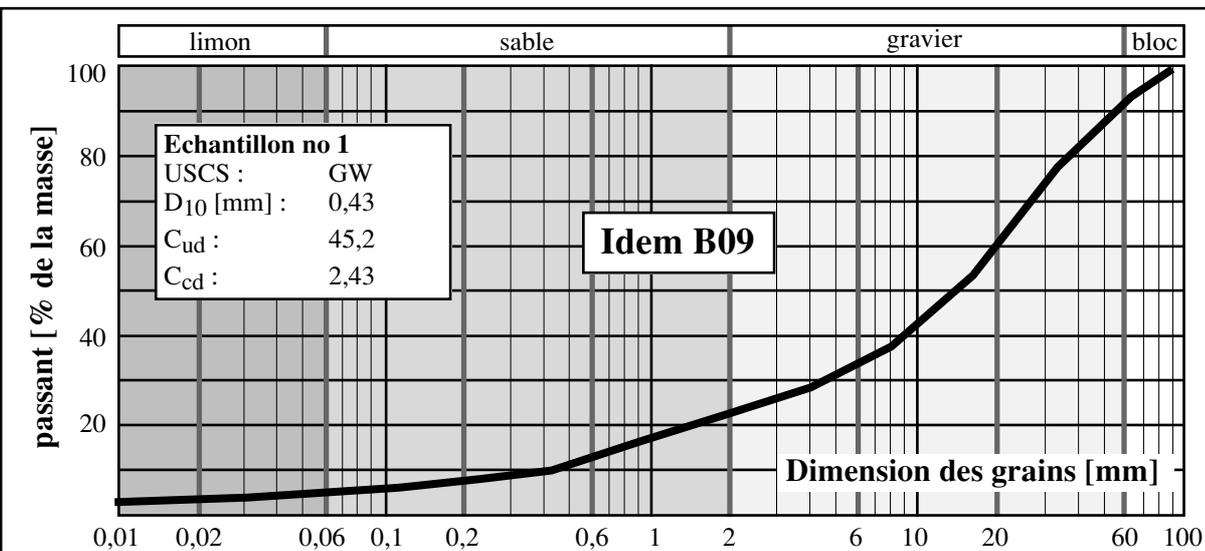
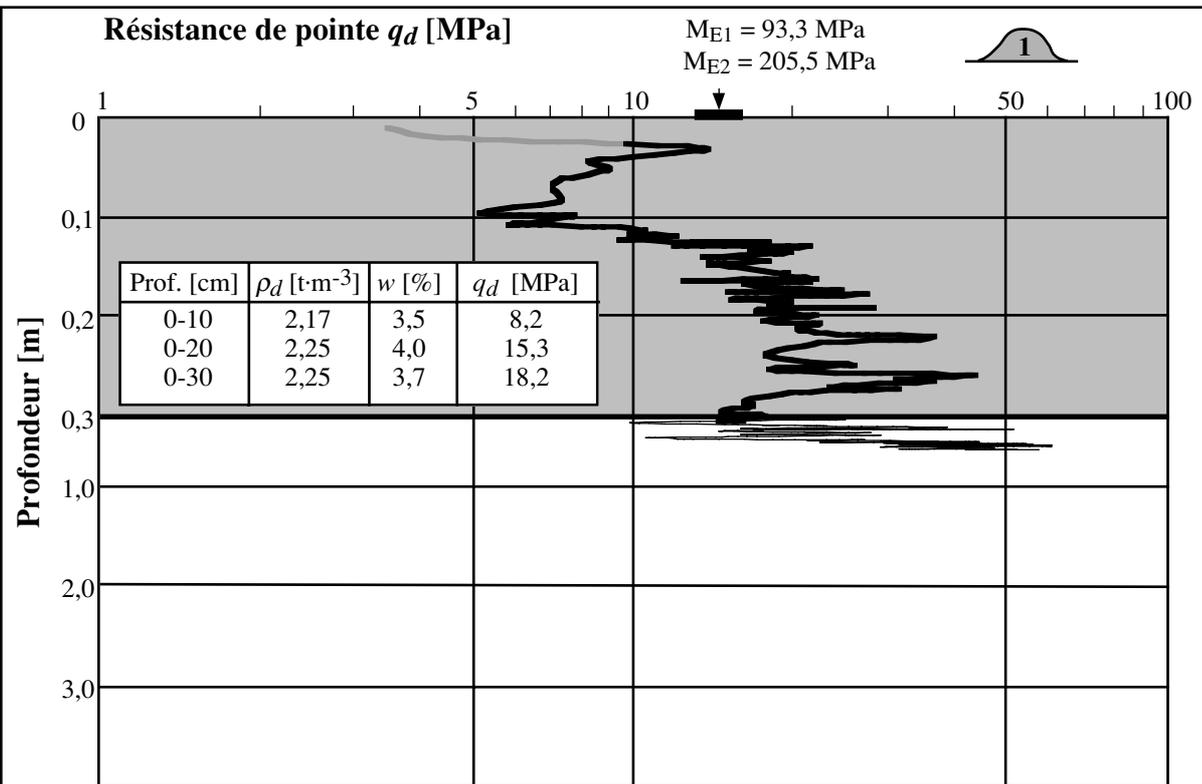


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-10

No de l'essai: 1303d-02	Type du PDL: Panda 2 cm ²
Profondeur dans fouille [m]: - 2,00	Date: 2000-9-26
Matériau de remblayage: grave 0 - 100 mm	Ø_{max} granul.: 90 mm

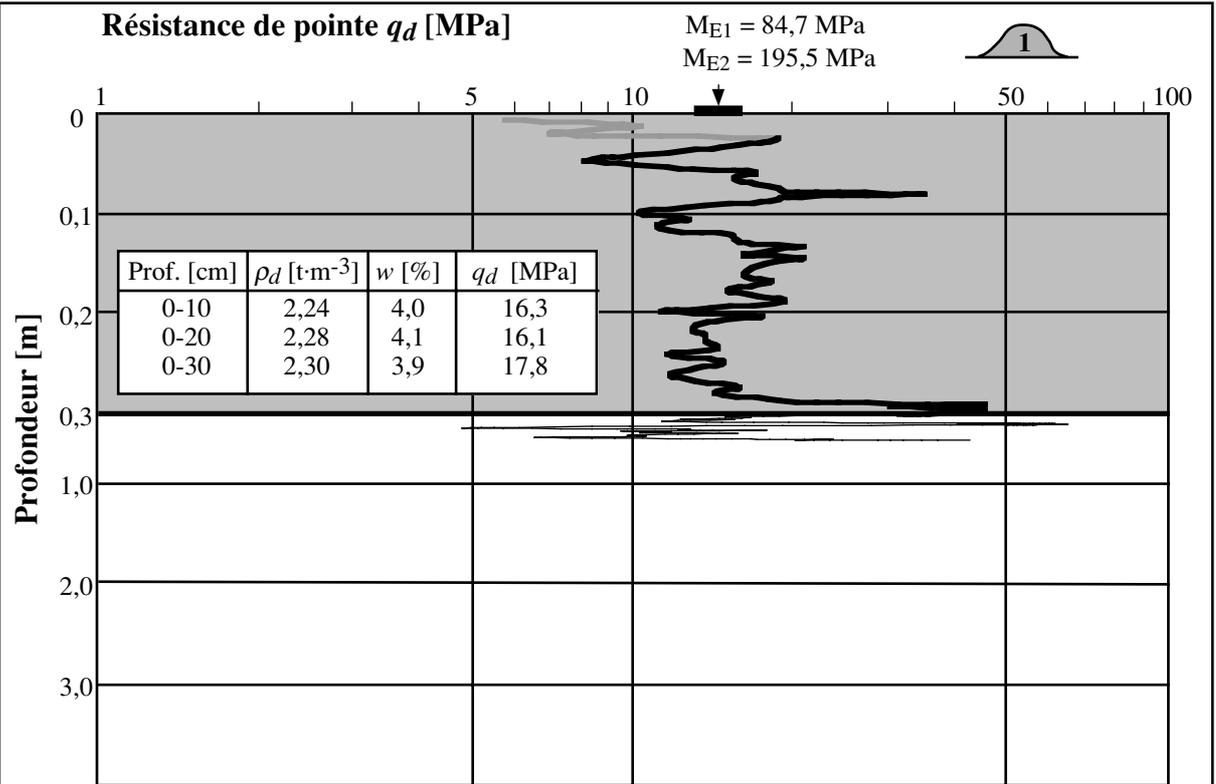


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

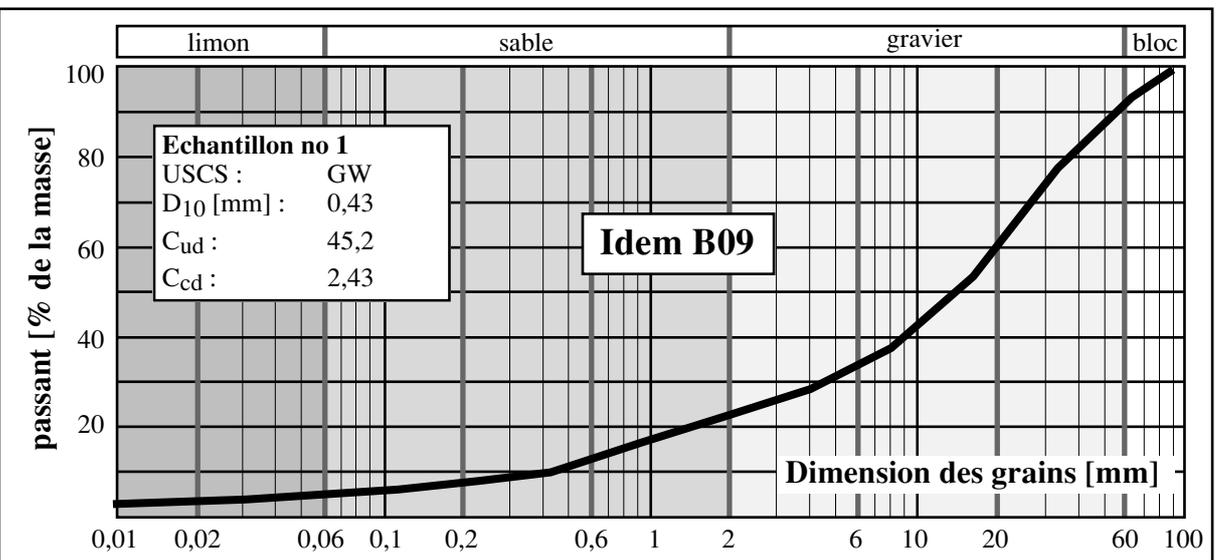
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-11

No de l'essai: 1303d-03 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 2,00 Date: 2000-9-26
 Matériau de remblayage: grave 0 - 100 mm Ø_{max} granul.: 90 mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte Echant. prélevé au tas:

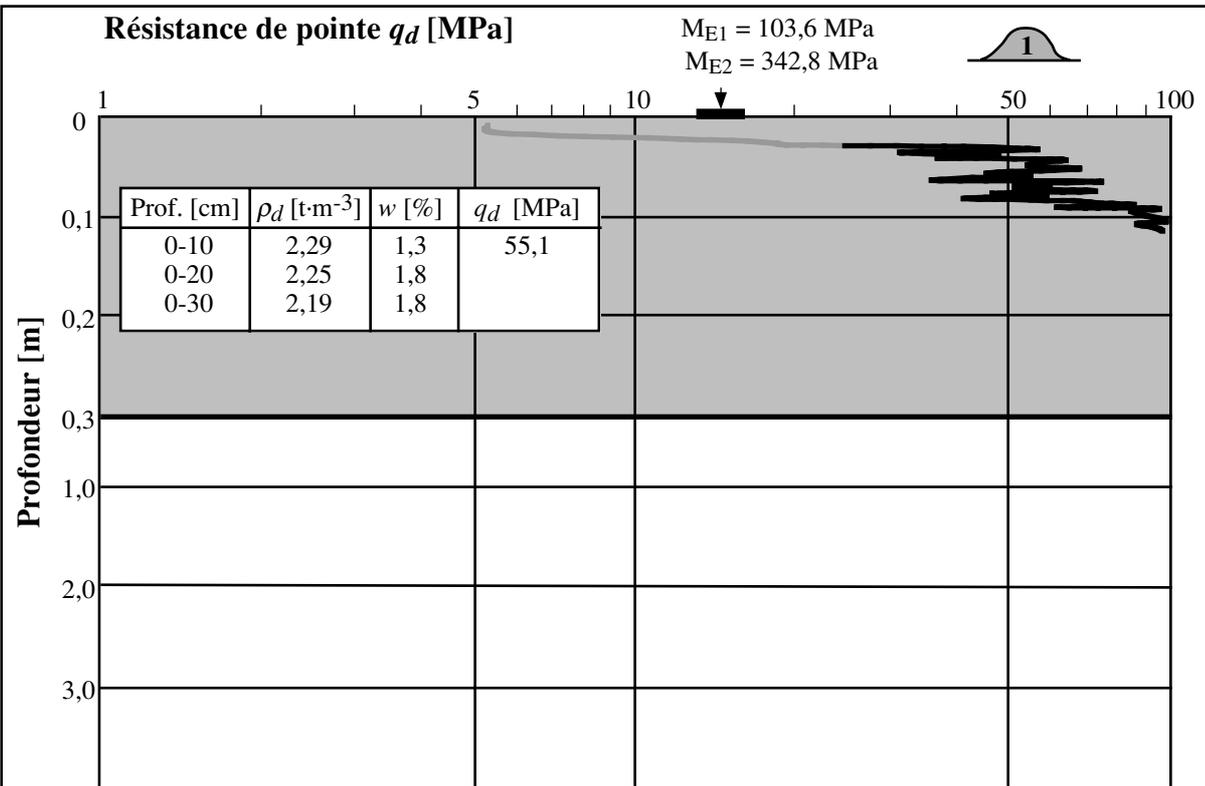


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

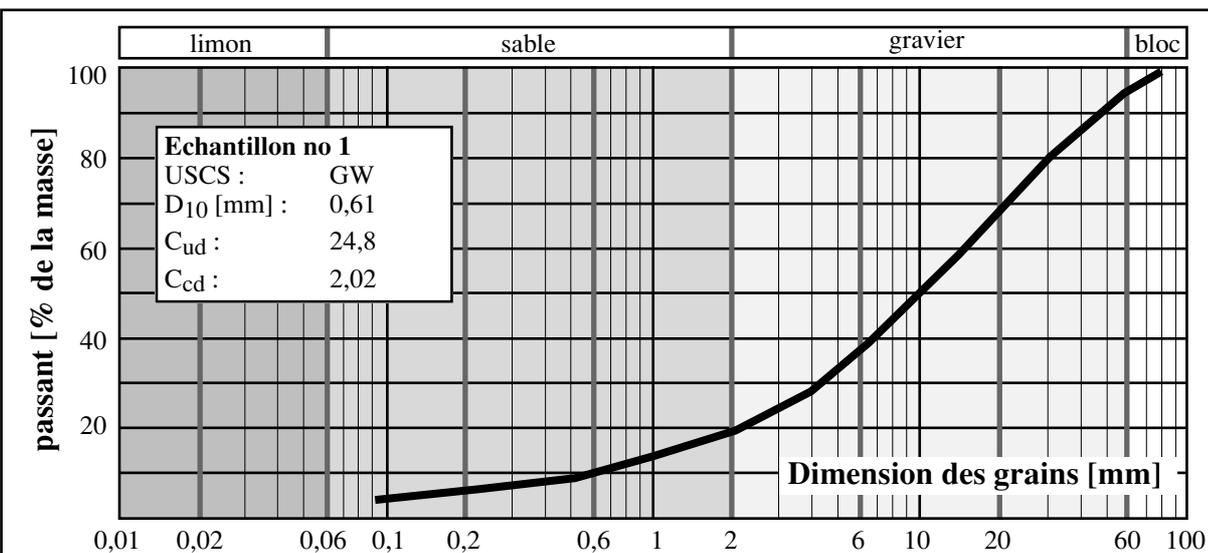
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-12

No de l'essai: 1713-10	Type du PDL: Panda 2 cm ²
Profondeur dans fouille [m]: - 1,10	Date: 2000-6-27
Matériau de remblayage: grave II 0 - 60 mm	Ø_{max} granul.: 80 mm

Essai M_E :
 Partie du pénétrogramme
non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

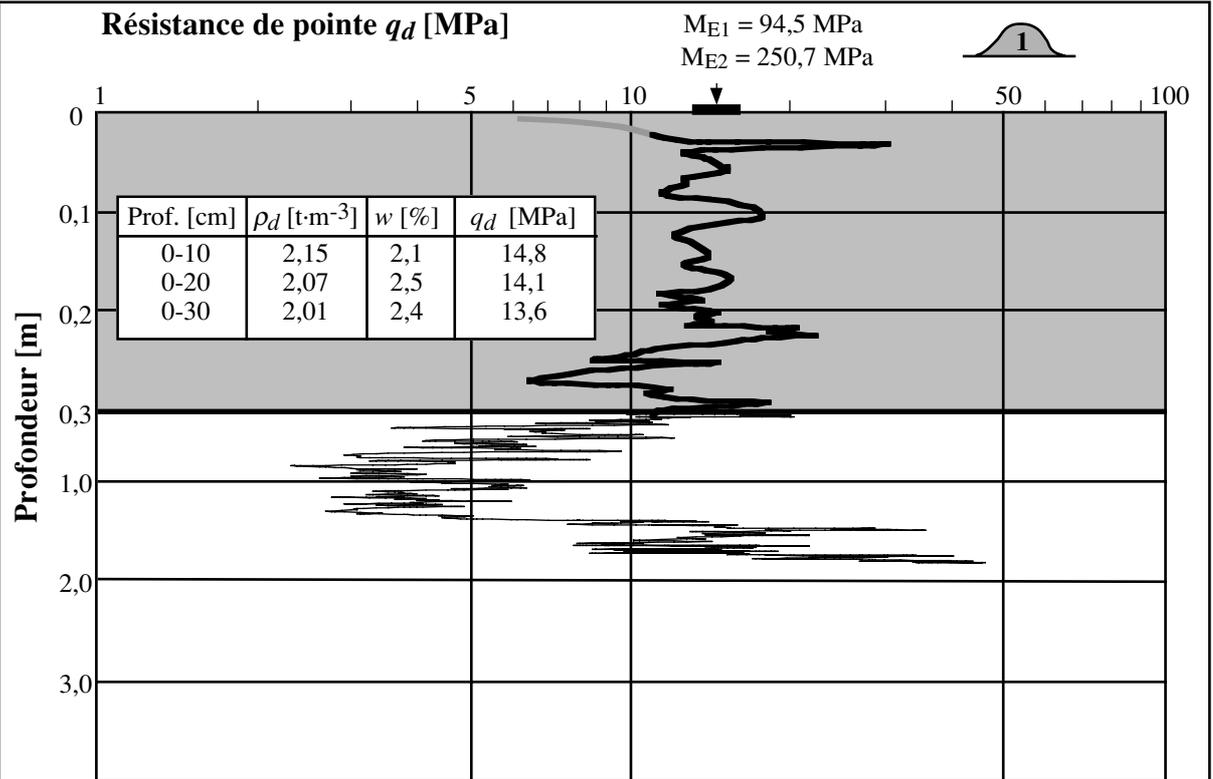


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

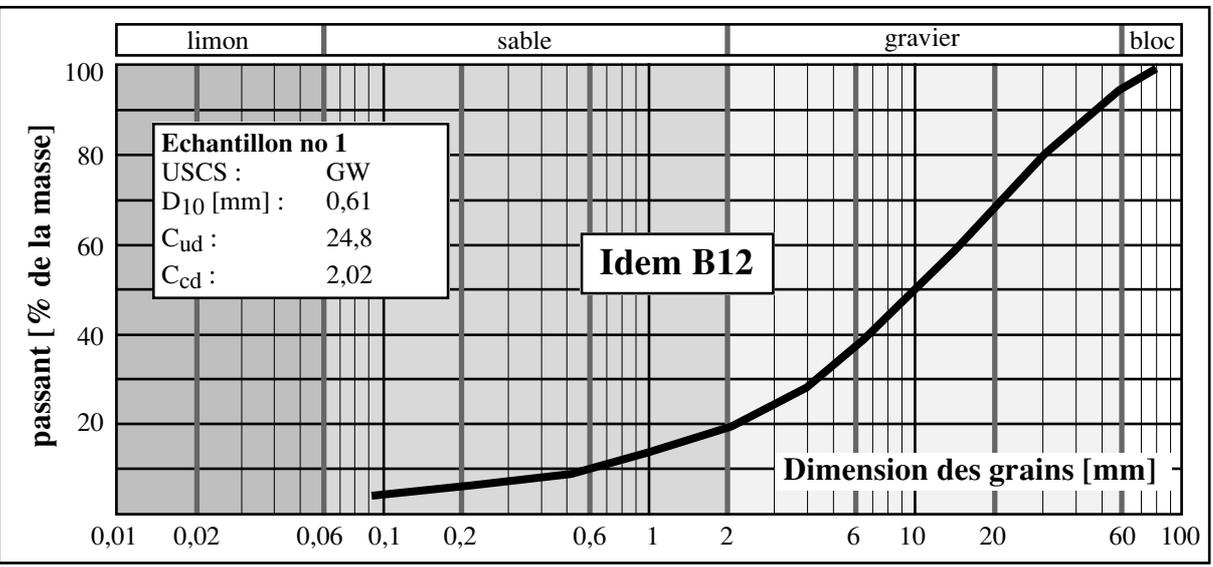
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-13

No de l'essai: 1713-11 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0,30 Date: 2000-6-27
 Matériau de remblayage: grave II 0 - 60 mm Ø_{max} granul.: 80 mm



Essai M_E : Partie du pénétoqramme non pris en compte Echant. prélevé au tas:

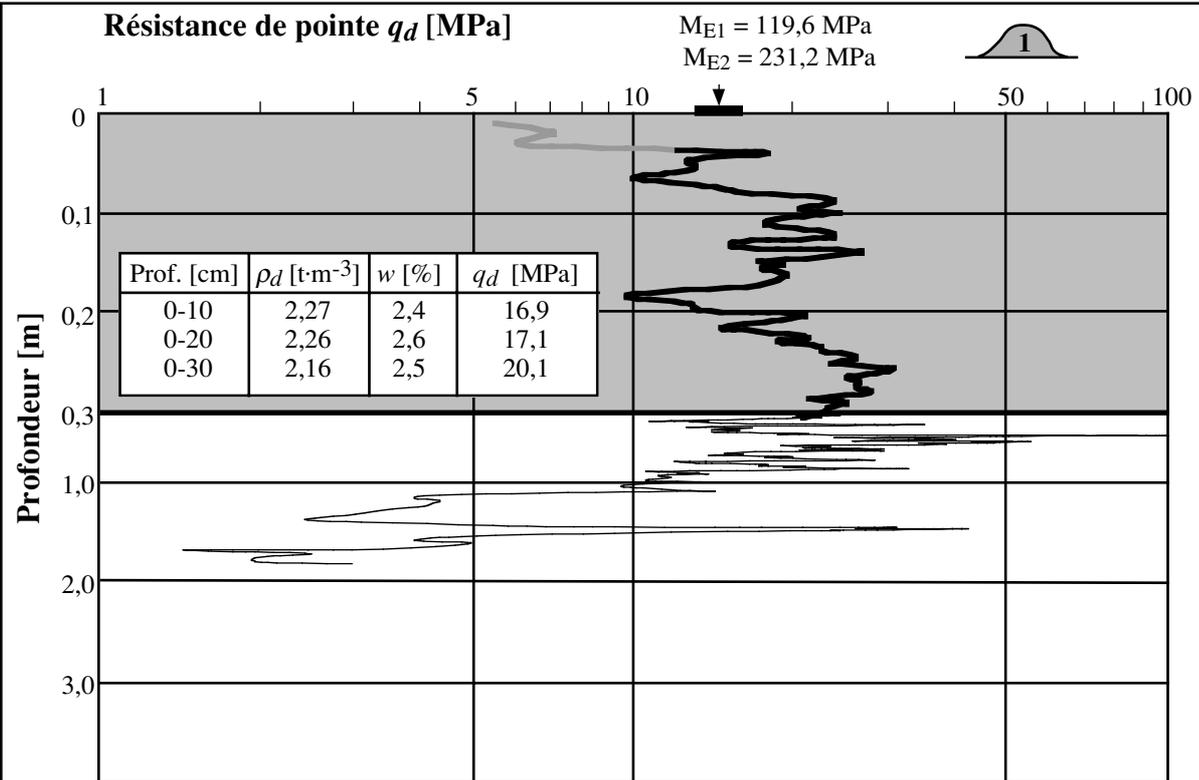


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

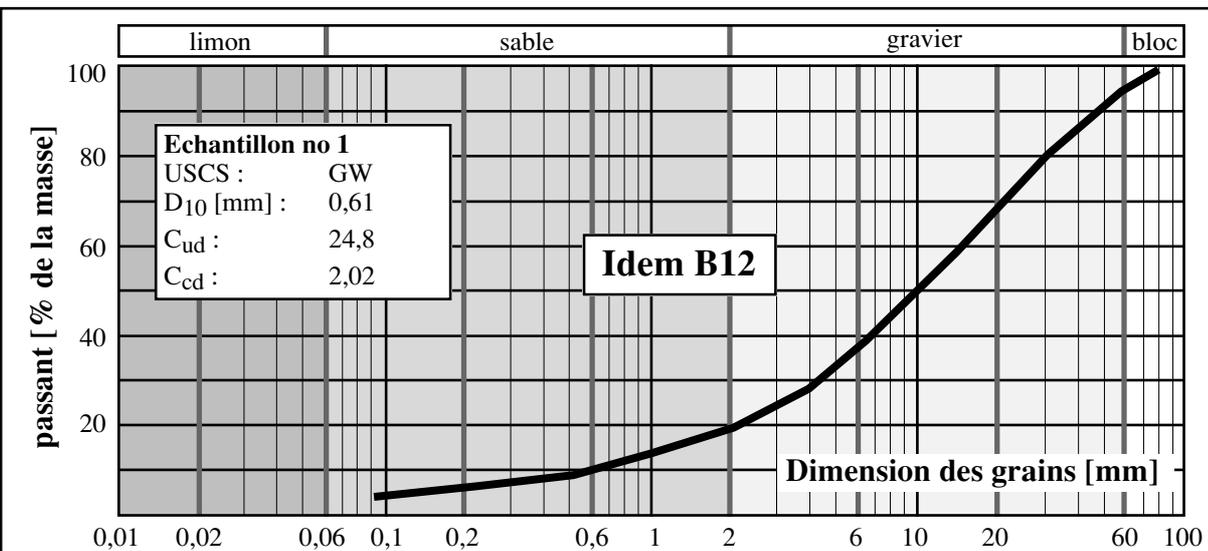
Fiche d'essai no B-14

No de l'essai: 1713-13	Type du PDL: Panda 2 cm ²
Profondeur dans fouille [m]: - 0,18	Date: 2000-7-13
Matériau de remblayage: grave II 0 - 60 mm	Ø_{max} granul.: 80 mm

Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

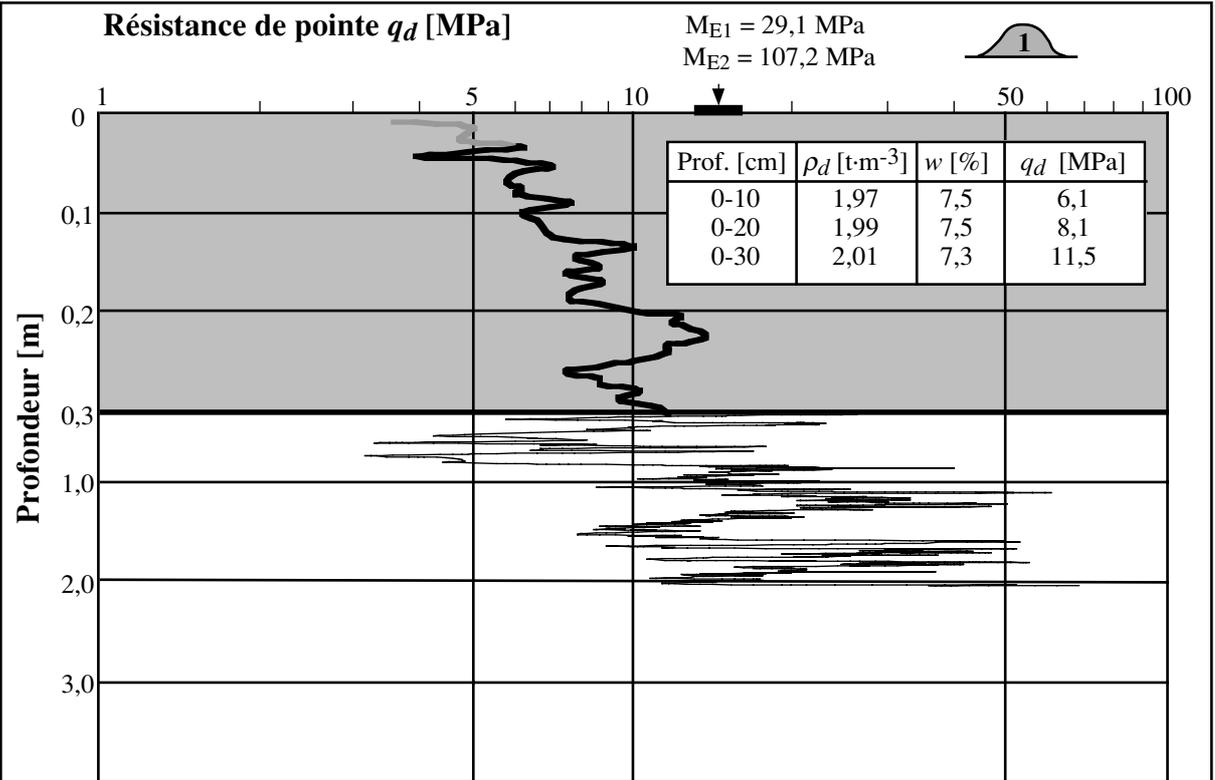


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-15

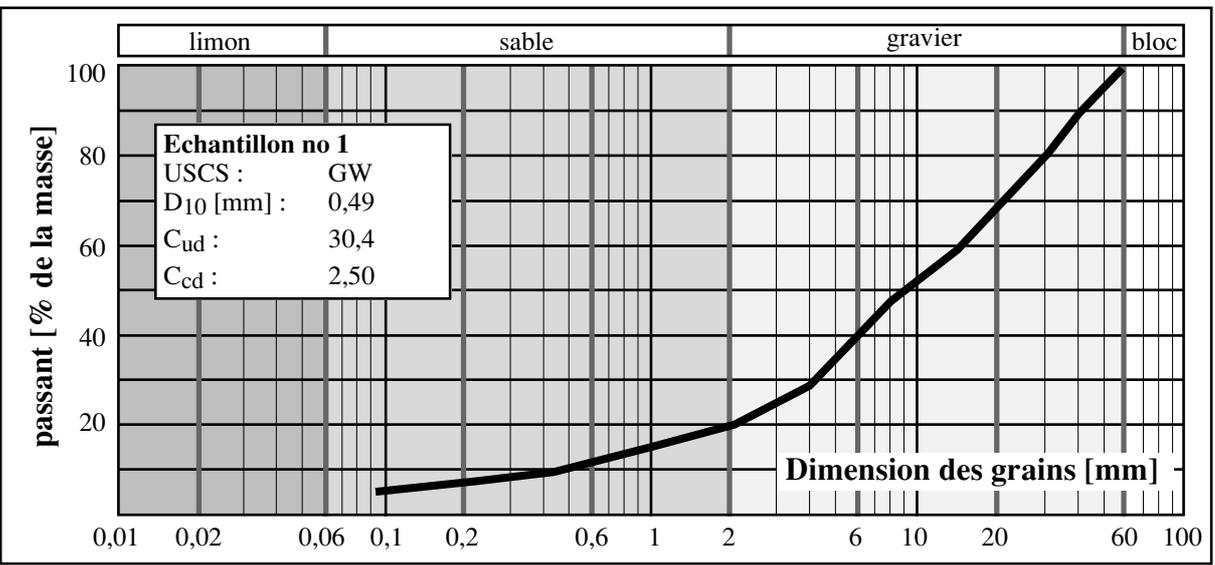
No de l'essai: 1867b-01 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0,65 Date: 2000-7-11
 Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 150 mm Ø_{max} granul.: 60 mm



Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

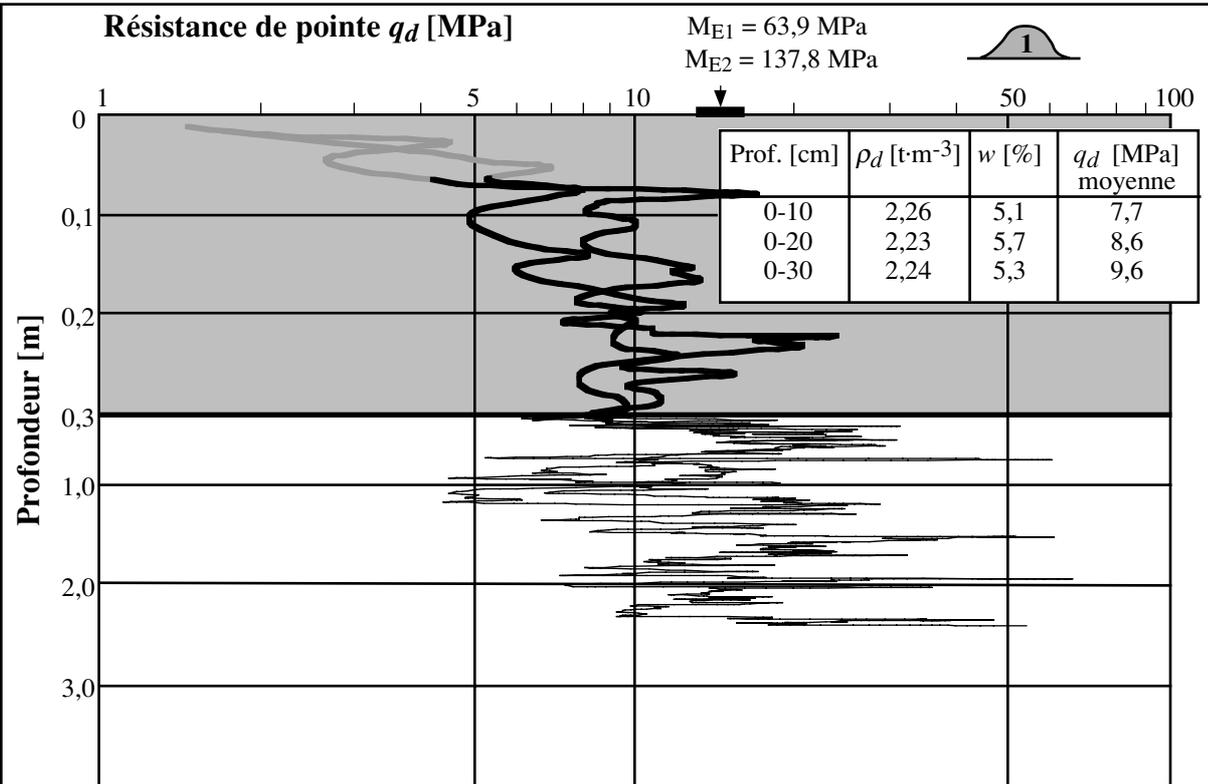


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-16

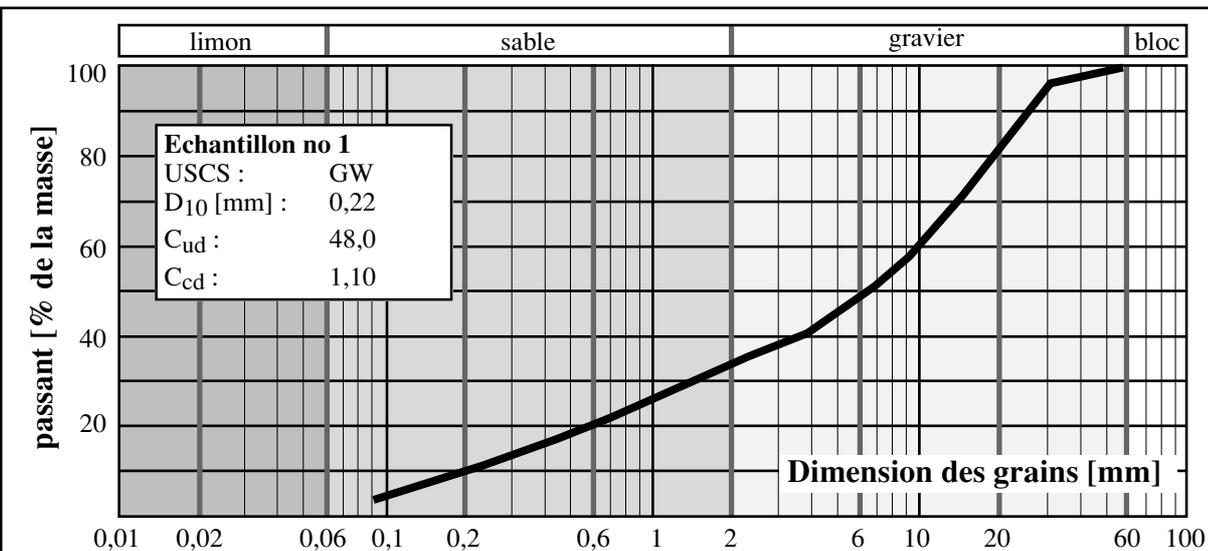
No de l'essai: 1867b-02 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0,20 Date: 2000-7-12
 Matériau de remblayage: grave I Ø_{max} granul.: 60 mm



Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

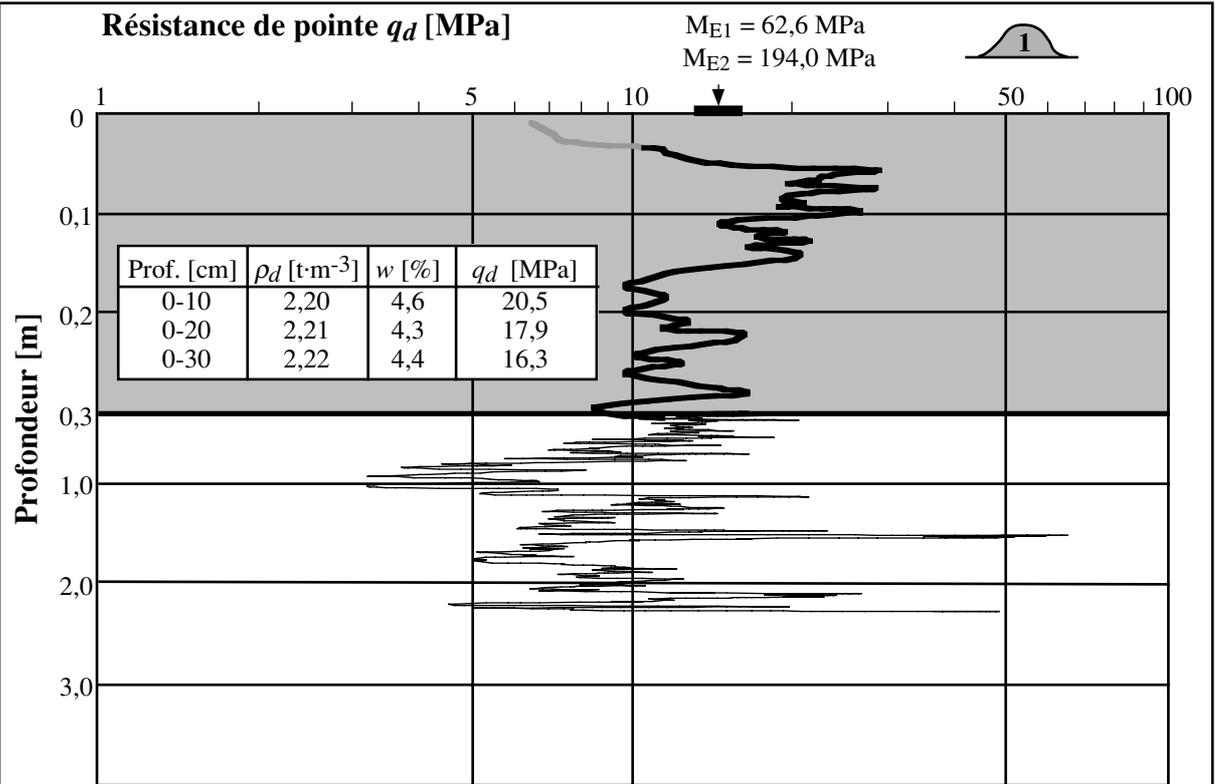


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

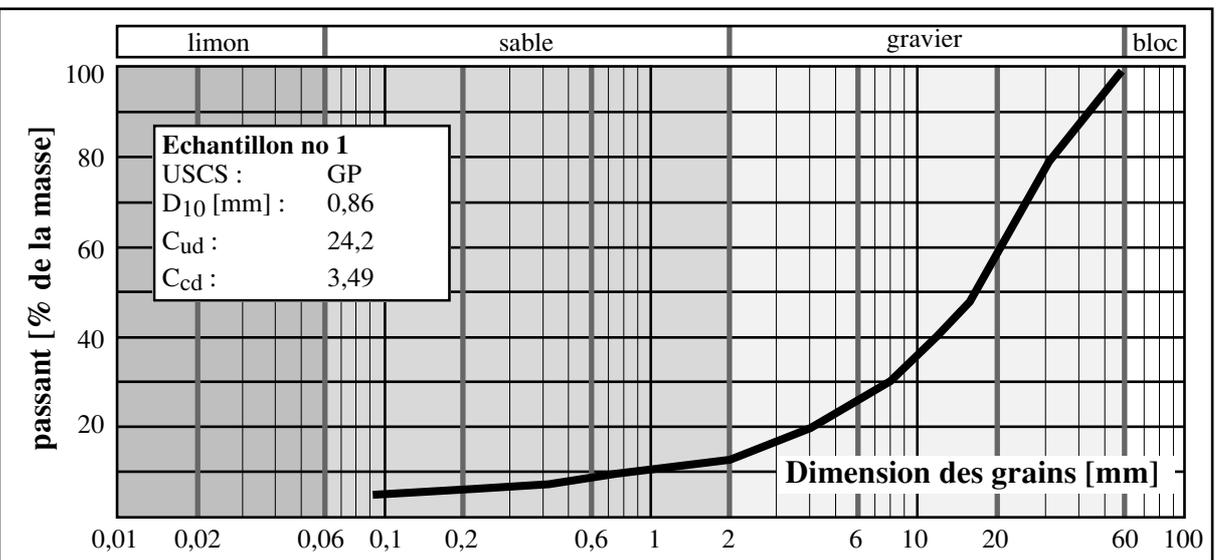
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-17

No de l'essai: 1867c-01 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0,10 Date: 2000-7-18
 Matériau de remblayage: grave calcaire 0 - 50 Ø_{max} granul.: 60 mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte Echant. prélevé au tas: 3

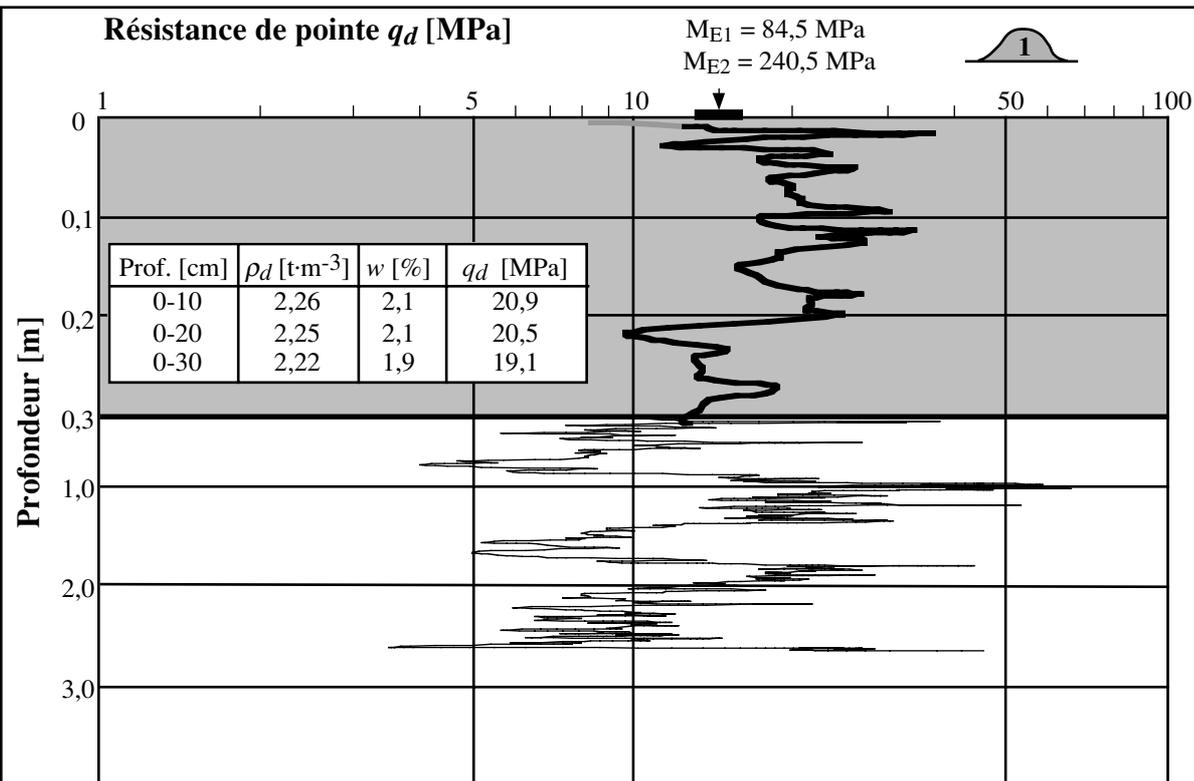


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

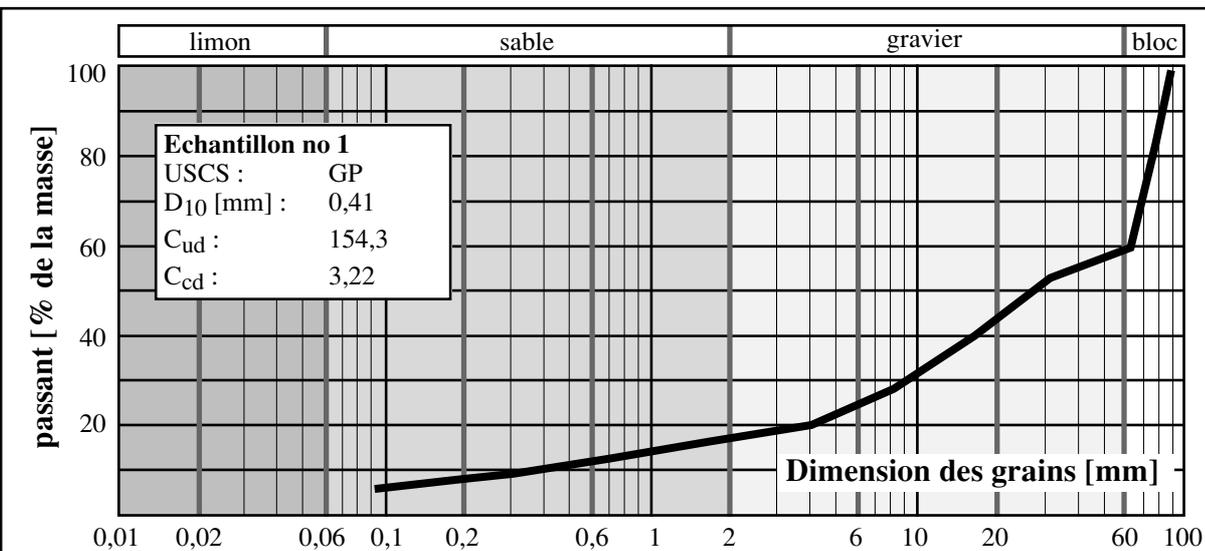
Fiche d'essai no B-18

No de l'essai: 1867c-02	Type du PDL: Panda 2 cm ²
Profondeur dans fouille [m]: - 0,10	Date: 2000-7-25
Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 100	Ø_{max} granul.: 90 mm



Essai M_E : ——— Partie du pénétoграмme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

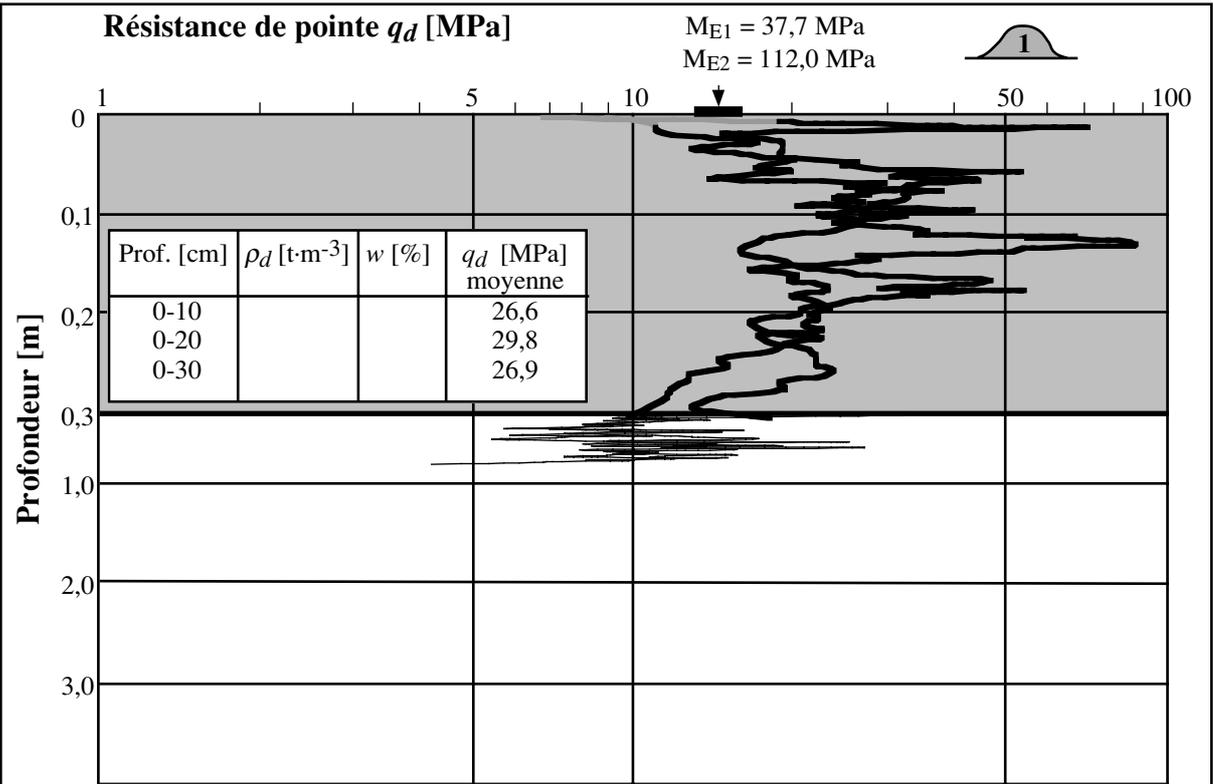


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

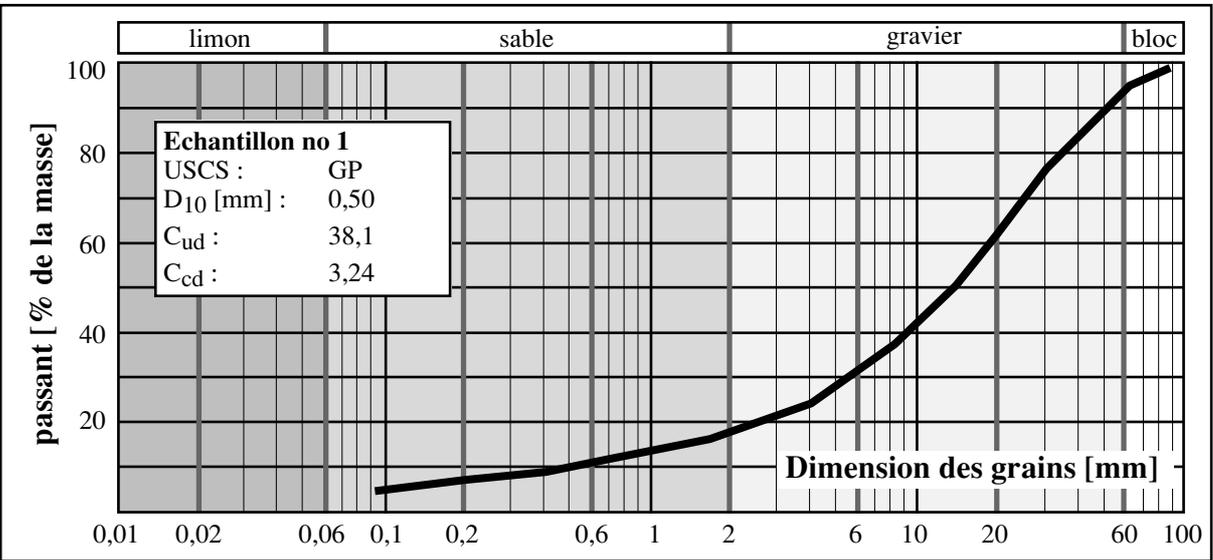
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-19

No de l'essai: 1881-04 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0,22 Date: 2000-6-26
 Matériau de remblayage: grave recyclée Ø_{max} granul.: 90 mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte Echant. prélevé au tas:

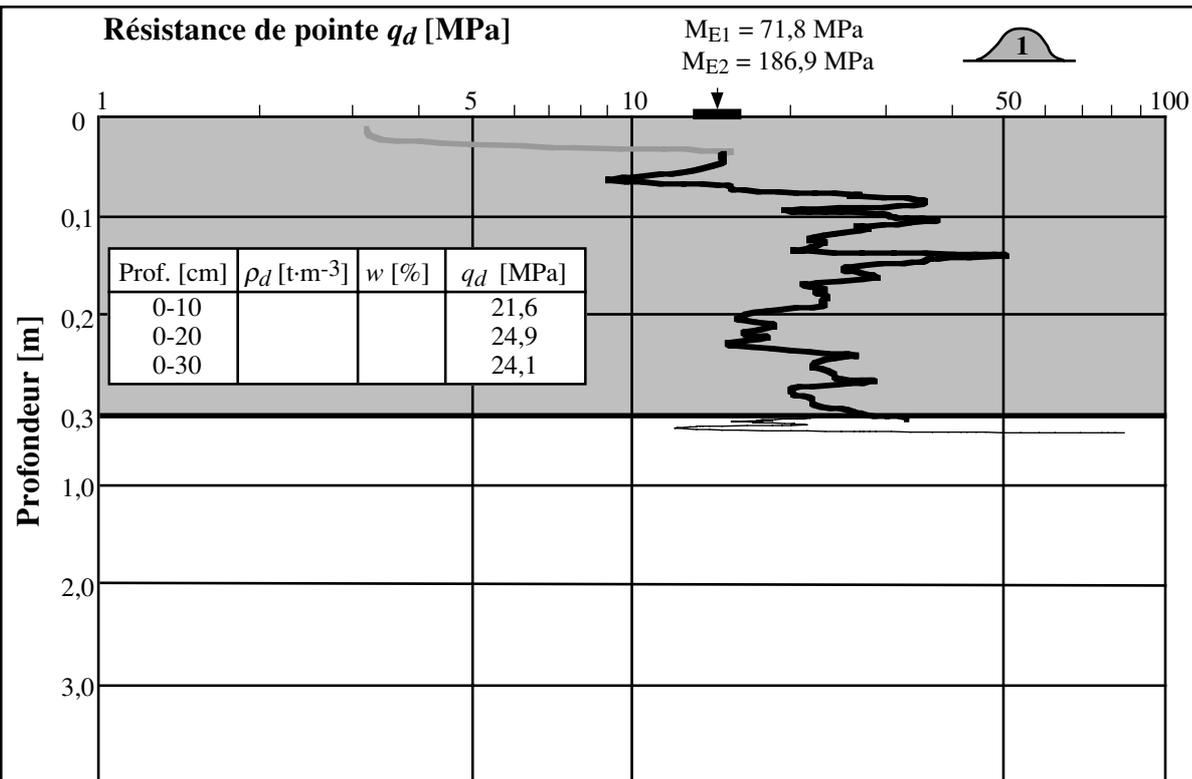


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-20

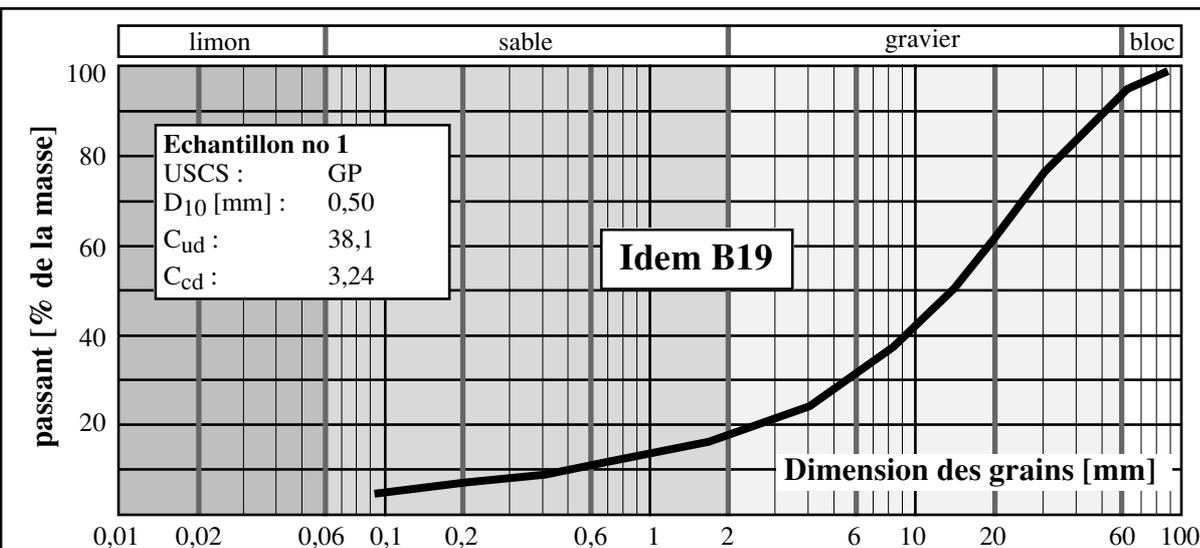
No de l'essai: 1881-06	Type du PDL: Panda 2 cm ²
Profondeur dans fouille [m]: - 0,22	Date: 2000-6-26
Matériau de remblayage: grave recyclée	Ø_{max} granul.: 90 mm

Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

3

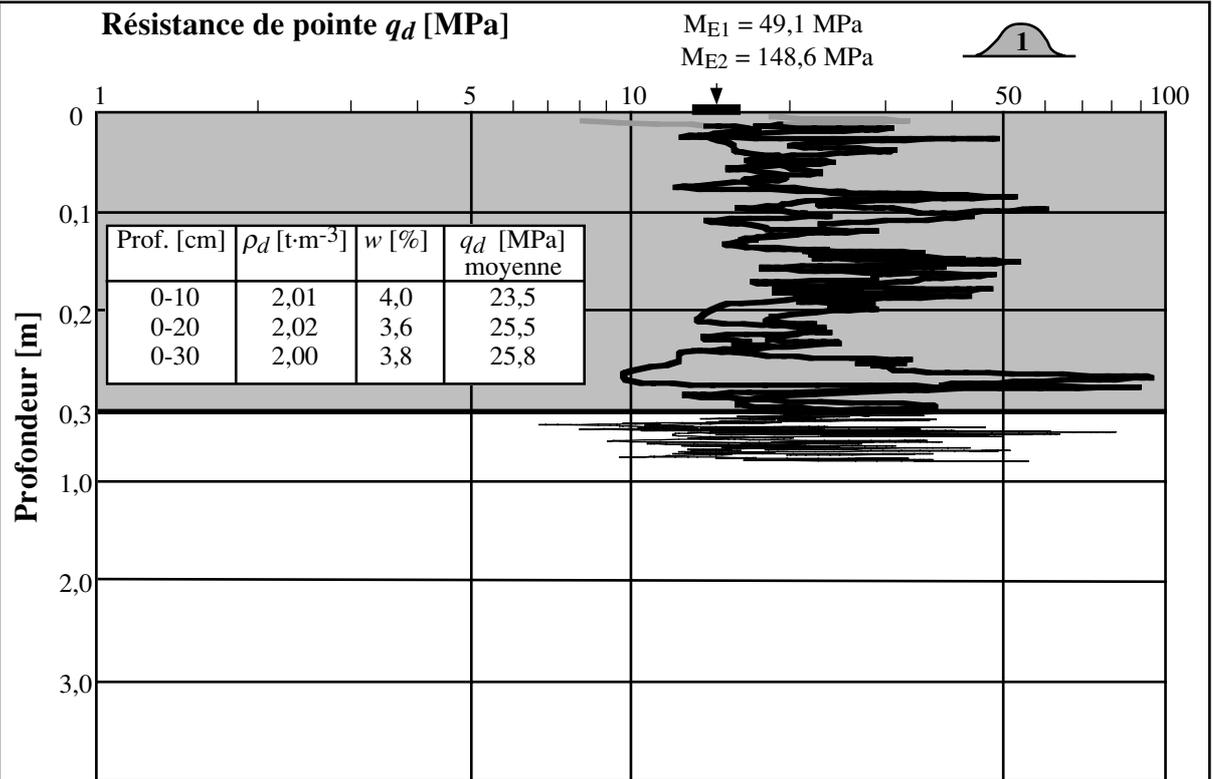


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

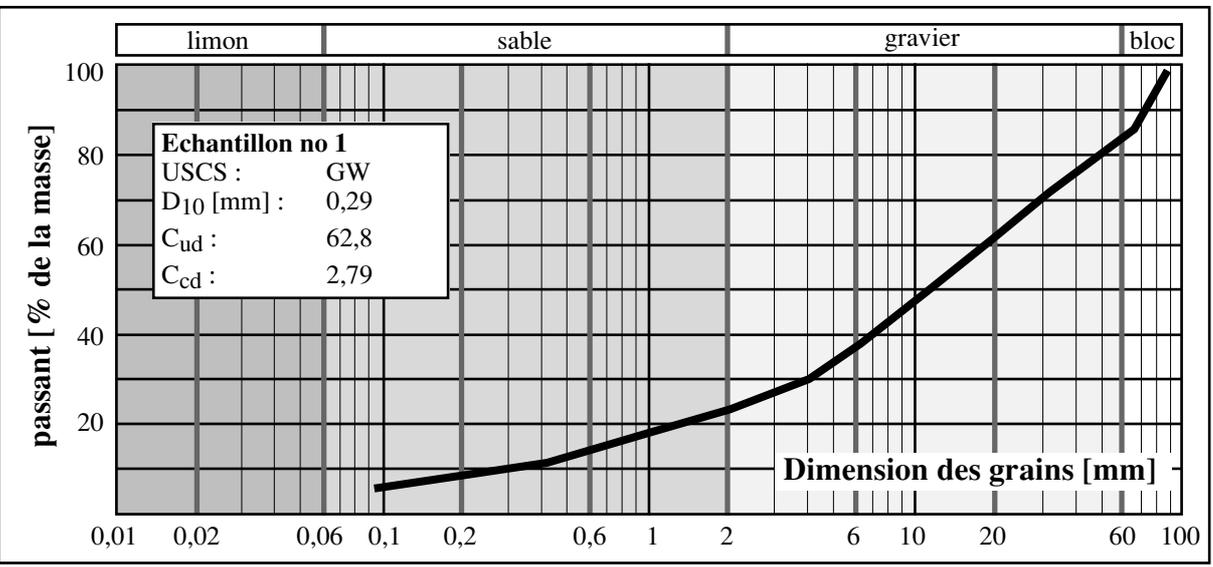
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-21

No de l'essai: 1885-06 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 2,65 Date: 2000-6-20
 Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 100 Ø_{max} granul.: 90 mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte Echant. prélevé au tas: 3

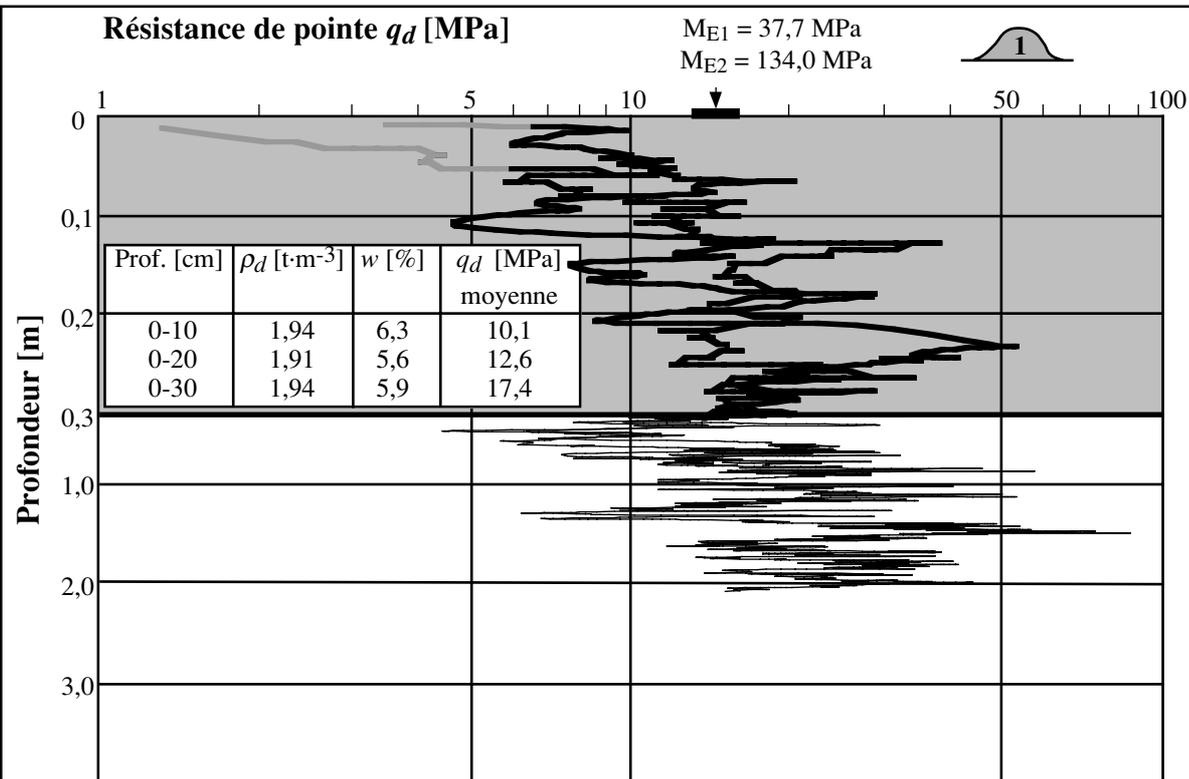


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-22

No de l'essai: 1885-07 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0,80 Date: 2000-6-27
 Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 100 Ø_{max} granul.: 90 mm

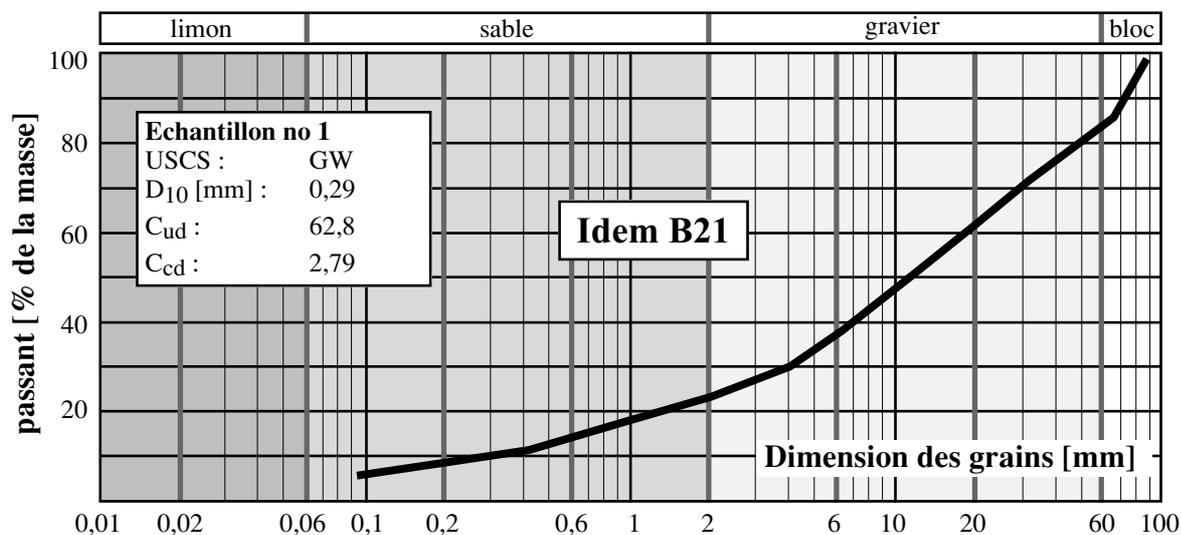


Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

3

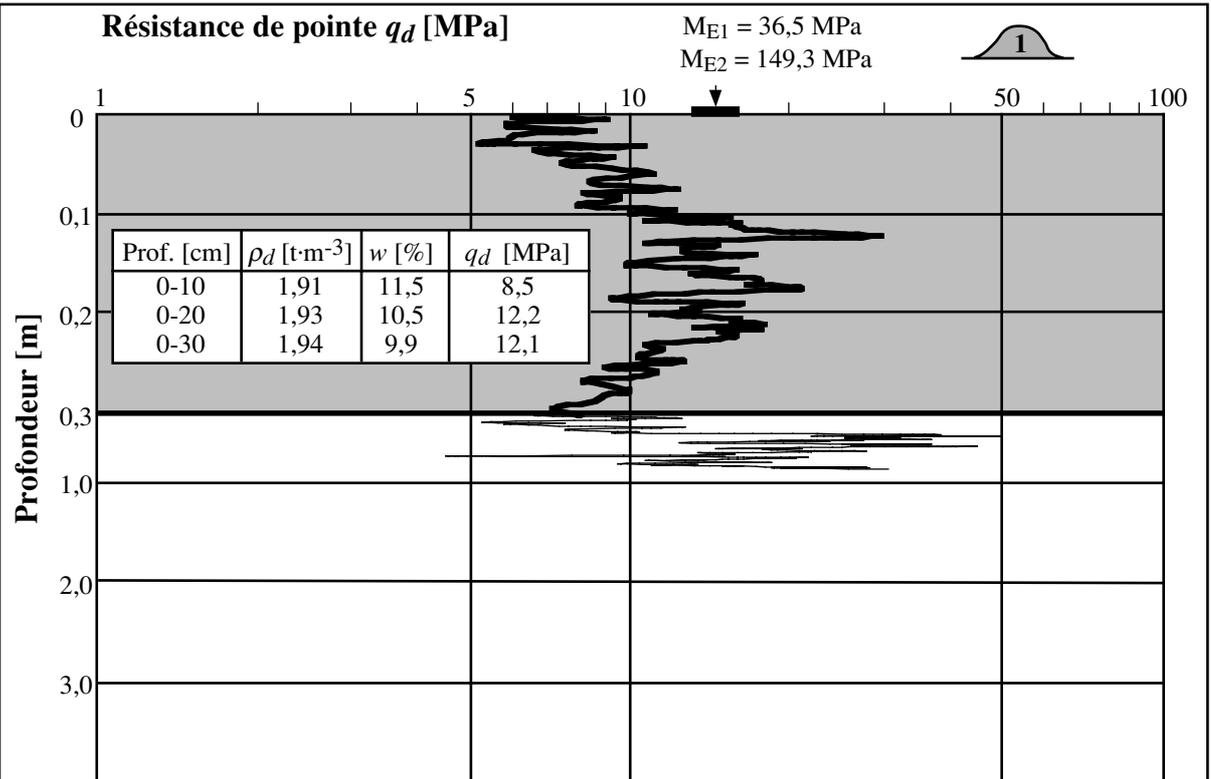


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-23

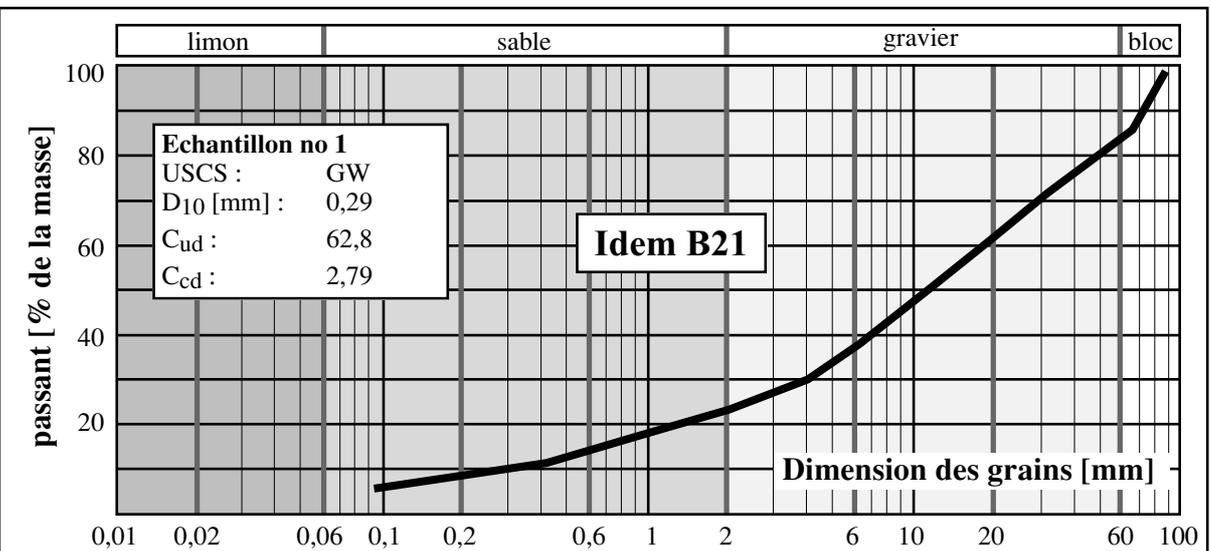
No de l'essai: 1885-08 **Type du PDL:** Panda 2 cm²
Profondeur dans fouille [m]: - 2,50 **Date:** 2000-7-11
Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 100 **Ø_{max} granul.:** 90 mm



Essai M_E :

Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas: 3

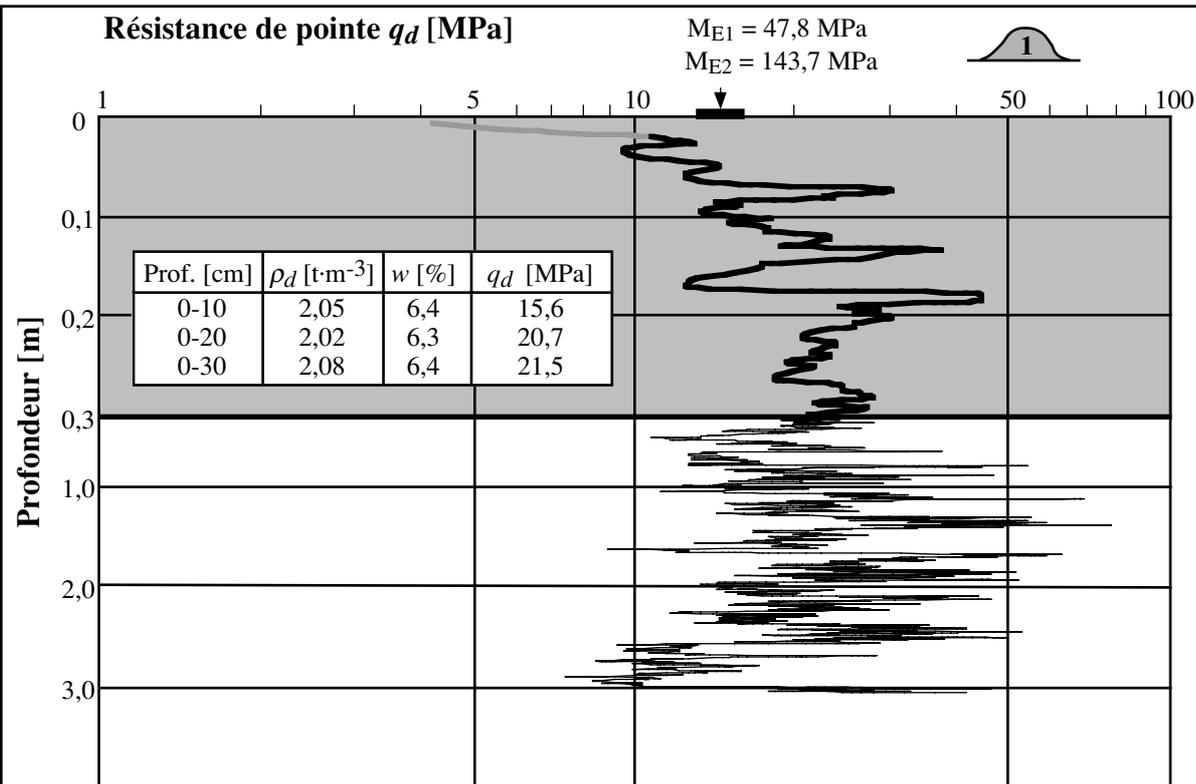


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

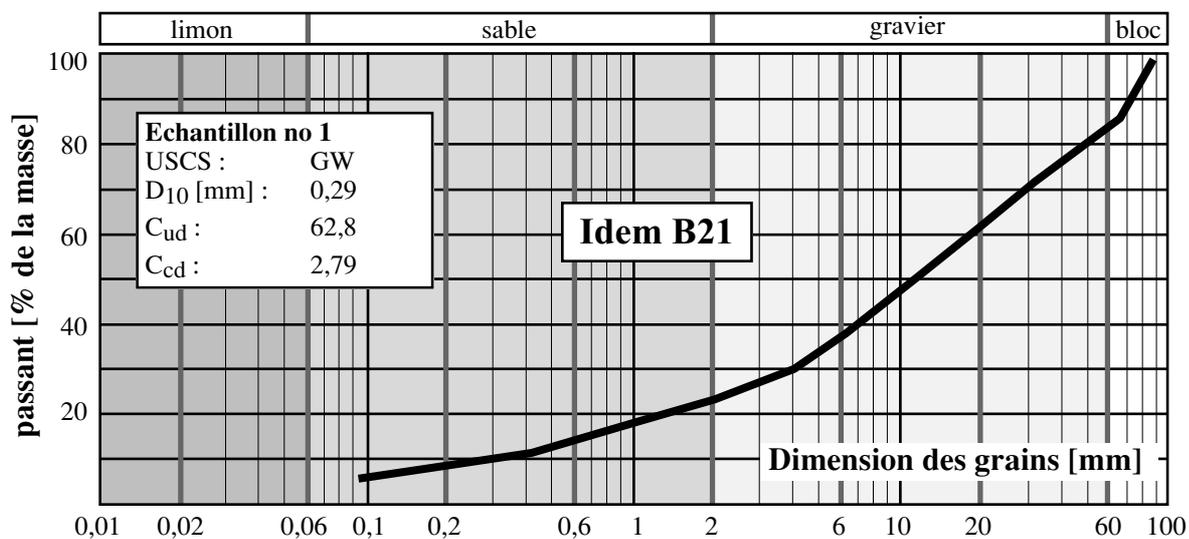
Fiche d'essai no B-24

No de l'essai: 1885-09		Type du PDL: Panda 2 cm ²	
Profondeur dans fouille [m]: - 0,80		Date: 2000-7-17	
Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 100		Ømax granul.: 90 mm	



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

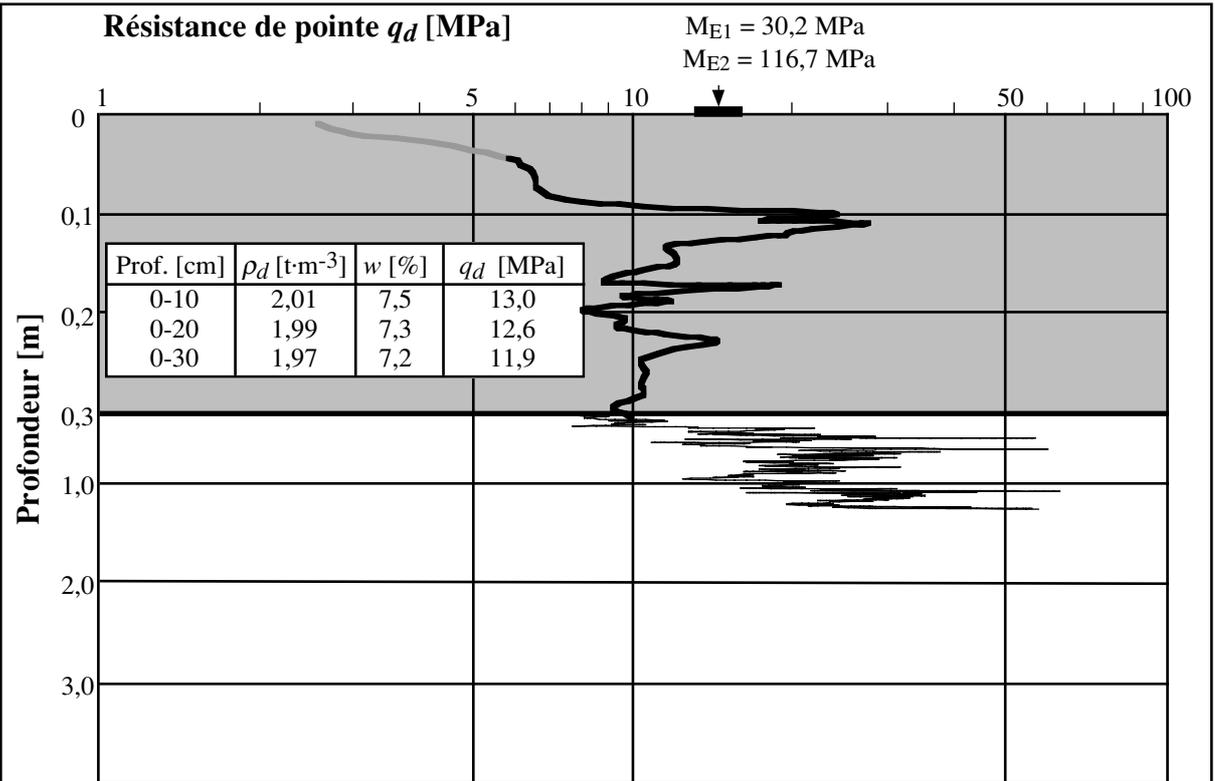


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

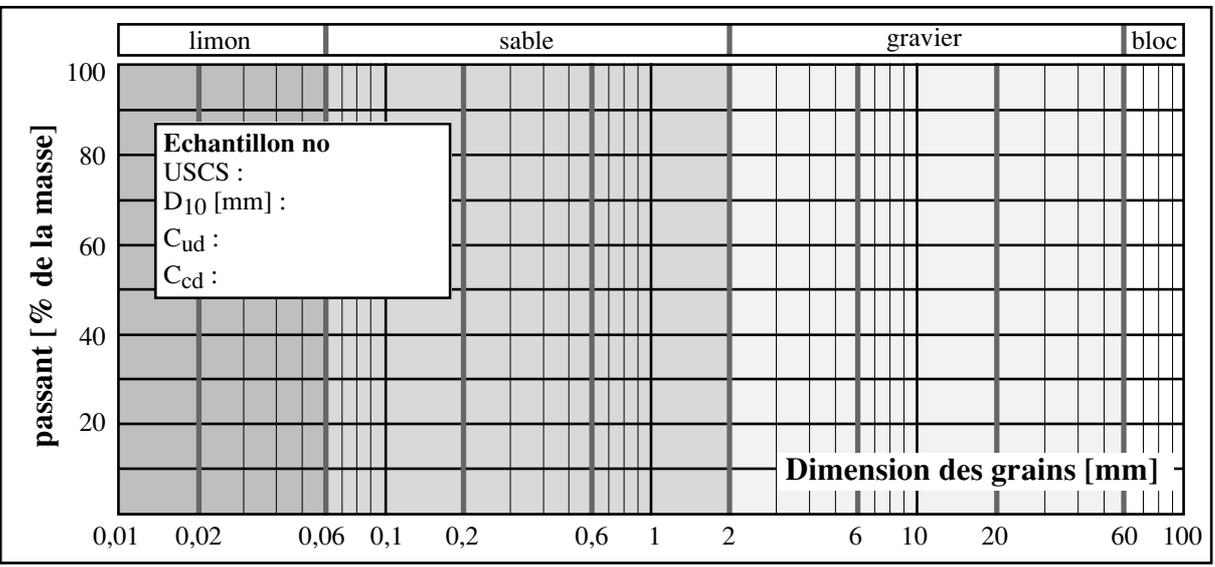
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-25

No de l'essai: 1885-10 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 2,30 Date: 2000-9-18
 Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 100 Ø_{max} granul.: mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte Echant. prélevé au tas: 3

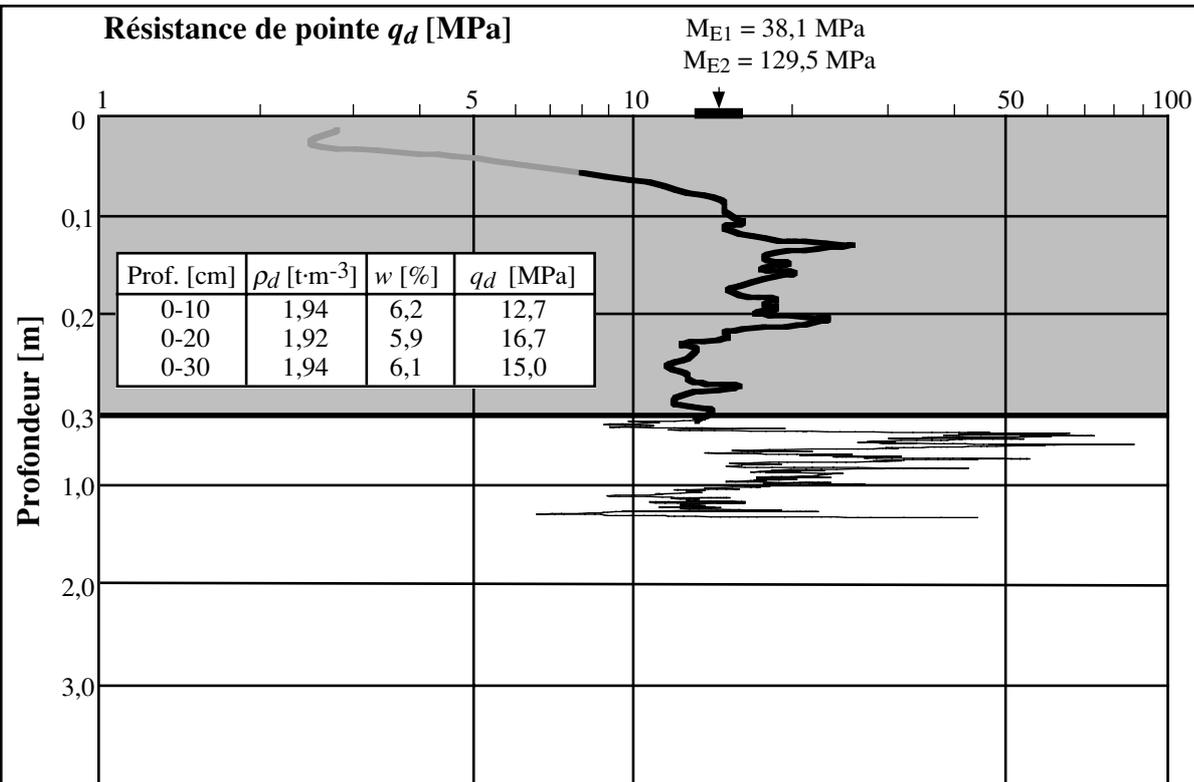


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-26

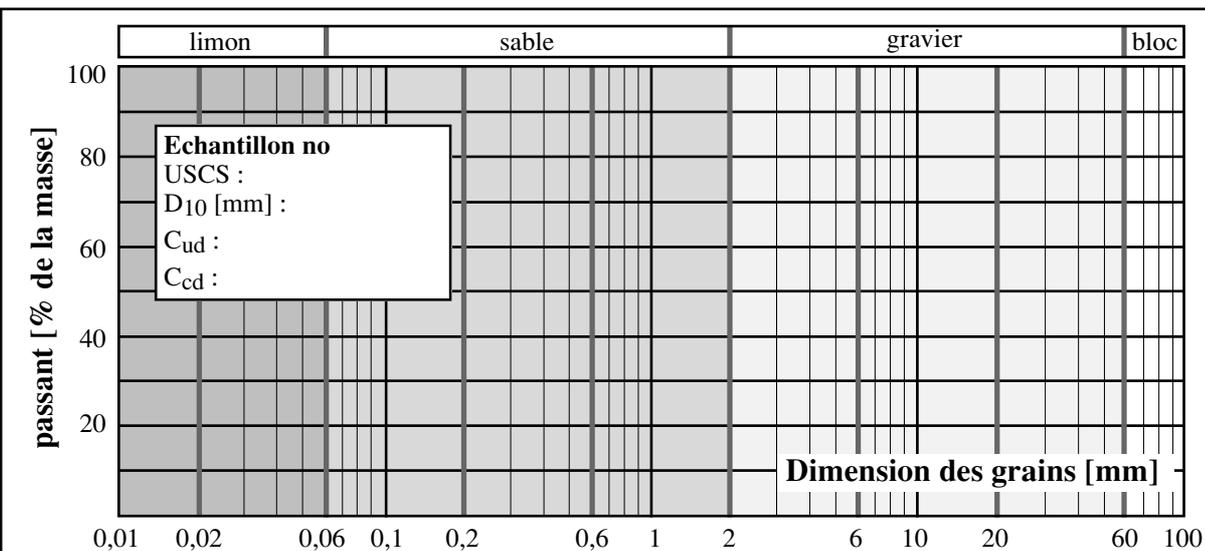
No de l'essai: 1885-11	Type du PDL: Panda 2 cm ²
Profondeur dans fouille [m]: - 1,00	Date: 2000-9-18
Matériau de remblayage: grave recyclée 0 - 100	Ø _{max} granul.: mm

Essai M_E :

Partie du pénétoграмme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

3

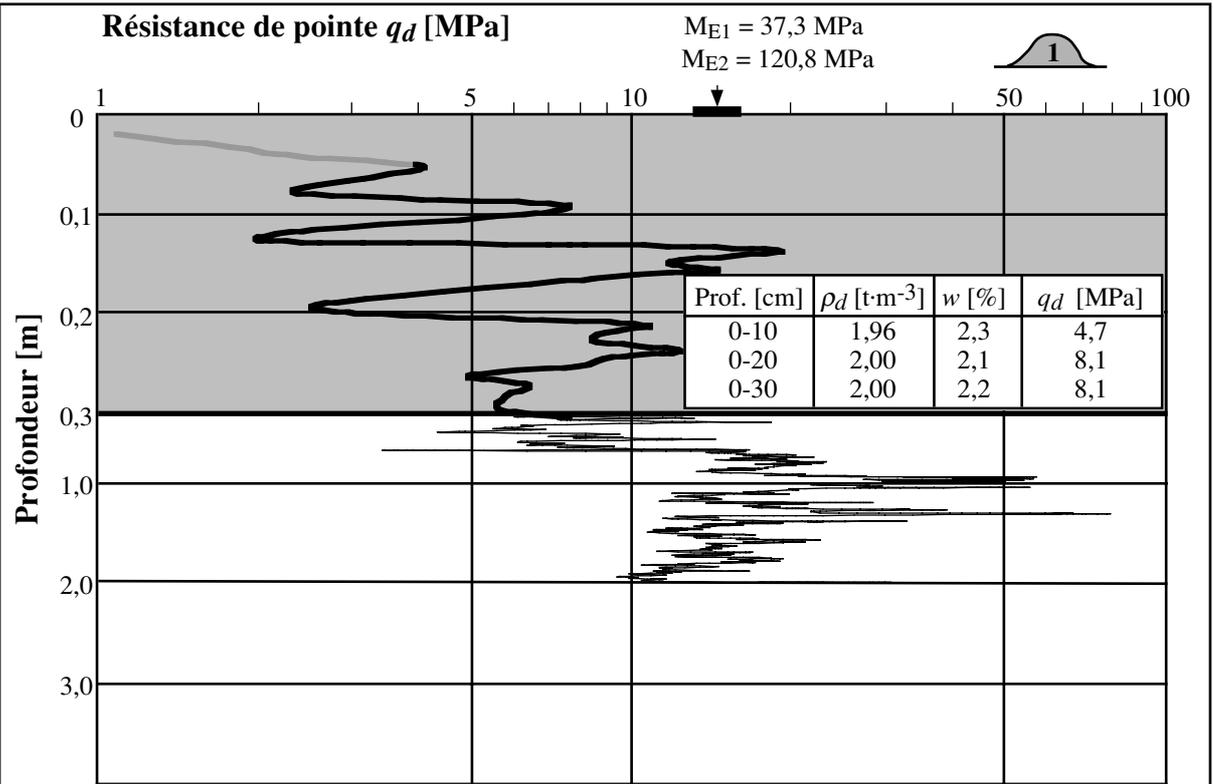


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

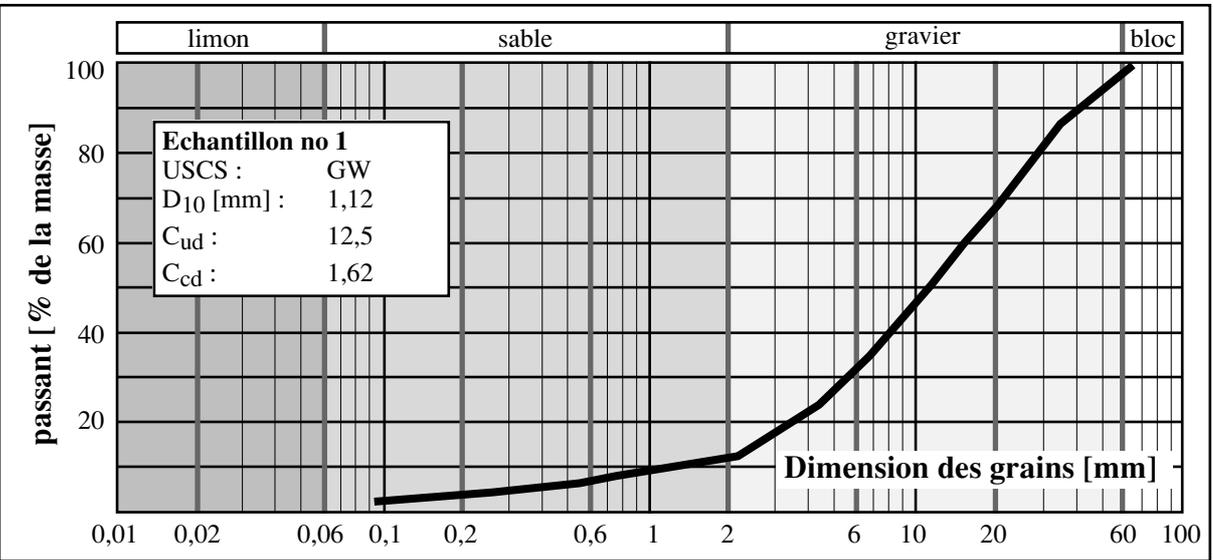
Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-27

No de l'essai: 1885-12 Type du PDL: Panda 2 cm²
 Profondeur dans fouille [m]: - 0,50 Date: 2000-10-16
 Matériau de remblayage: grave 0 - 60 Ø_{max} granul.: 60 mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte Echant. prélevé au tas:

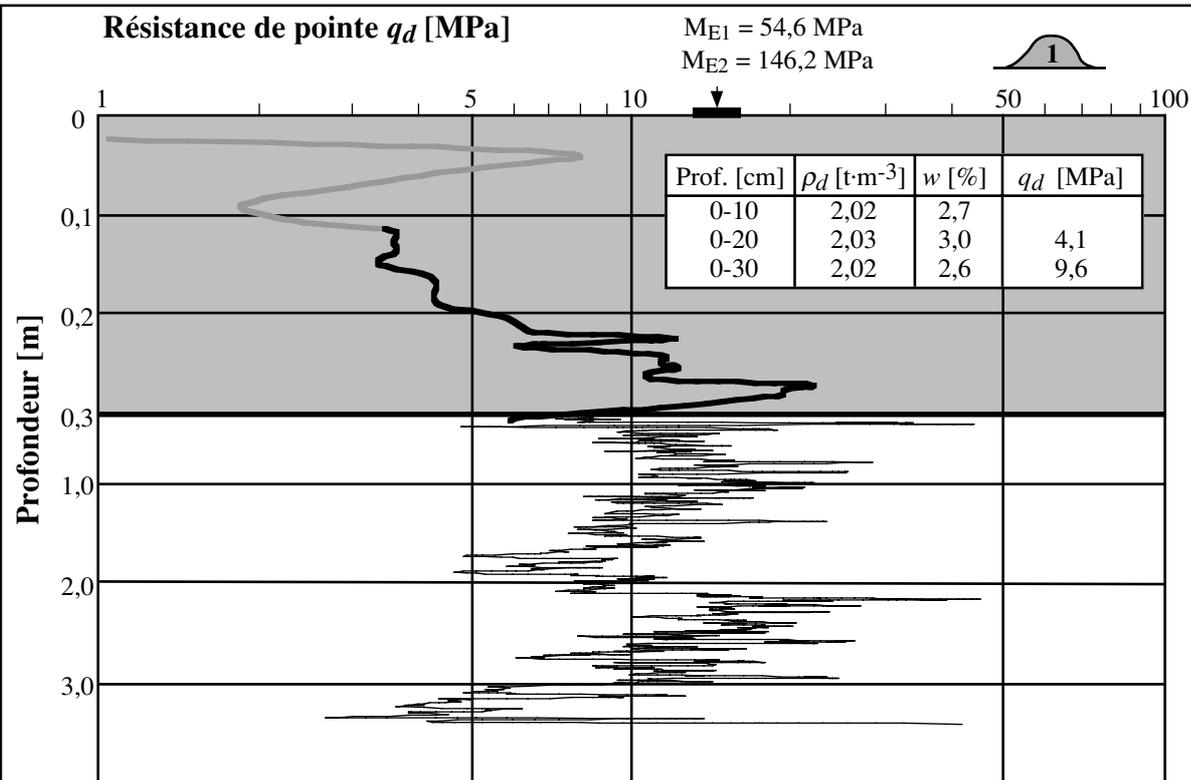


Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger

Mandat de recherche de l'OFROU no 30 / 96

Fiche d'essai no B-28

No de l'essai: 1885-13	Type du PDL: Panda 2 cm ²
Profondeur dans fouille [m]: - 0,50	Date: 2000-10-16
Matériau de remblayage: tout-venant	Ø_{max} granul.: 100 mm



Essai M_E : Partie du pénétrogramme non pris en compte

Echant. prélevé au tas:

