

# Étude expérimentale de la chute de blocs rocheux sur une dalle en béton armé recouverte par des matériaux amortissants

**V. LABIOUSE**

Université Catholique de  
Louvain, Unité Génie Civil,  
Place du Levant, 1, B-1348  
Louvain-la-Neuve, Belgique

**F. DESCŒUDRES**

**S. MONTANI**

**C.-A. SCHMIDHALTER**

École Polytechnique  
Fédérale de Lausanne,  
Laboratoire de mécanique  
des Roches,  
CH-1015 Lausanne, Suisse

## Résumé

Le dimensionnement des galeries de protection contre les chutes de pierres dépend fortement de l'estimation des sollicitations dynamiques, que l'utilisation d'une couche amortissante peut réduire considérablement. Afin d'approfondir les connaissances actuelles sur les capacités d'amortissement des matériaux meubles, une étude expérimentale a été menée au Laboratoire de Mécanique des Roches de l'EPFL : des blocs de 100, 500 et 1 000 kg ont été lâchés de diverses hauteurs ( $\leq 10$  m) sur une dalle en béton armé recouverte par un remblai d'épaisseur variable constitué de trois types de matériaux différents.

Les dispositifs et programme d'essais sont tout d'abord présentés. Ensuite, un exemple complet permet d'illustrer les divers enregistrements effectués lors d'un impact, ainsi que les traitements postérieurs à celui-ci. Finalement, une analyse des résultats expérimentaux souligne les principales tendances entre les grandeurs mesurées et débouche sur l'élaboration d'expressions mathématiques entre certaines de ces variables.

# Experimental study of rock blocks falling down on a reinforced concrete slab covered by absorbing cushions

## Abstract

The design of rock sheds depends strongly on the amplitude of the impulsive loadings, which can be drastically reduced using an absorbing cushion. To have a better knowledge of the damping abilities of soil layers, an experimental study has been carried out at the rock mechanics laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology : weights of 100, 500 and 1 000 kg were dropped from various falling heights ( $\leq 10$  m) on a reinforced concrete slab covered by three different soil cushions.

The testing device and programme are first presented. Then, a comprehensive example is taken to illustrate the various data recorded during an impact, as well as their post-processing. Finally, an analysis underlines the main tendencies between the experimental results, and allows the development of mathematical expressions between some of the problem variables.

## Introduction

## 1.1

### Cadre de l'étude

Dans les régions montagneuses, certaines voies de communications sont exposées à des phénomènes d'instabilités tels que glissements de terrain, avalanches, éboulements ou chutes de blocs. Ces événements s'accompagnent fréquemment d'un entraînement ou d'une obstruction partielle, voire totale des voies de circulation.

Afin de limiter les risques correspondants, des ouvrages de protection peuvent être construits (Fig. 1). Ils sont généralement caractérisés par :

- une dalle de toiture fortement armée en vue de diminuer la fragilité de l'ouvrage ;
- une structure dimensionnée pour reprendre l'importante composante horizontale des sollicitations (poussée du talus, coulées d'éboulis, avalanches, impacts rocheux) ;
- l'utilisation d'une couche meuble de matériaux remblayés afin de dissiper une part importante de l'énergie d'impact et, de la sorte, protéger la dalle de toiture de la structure.

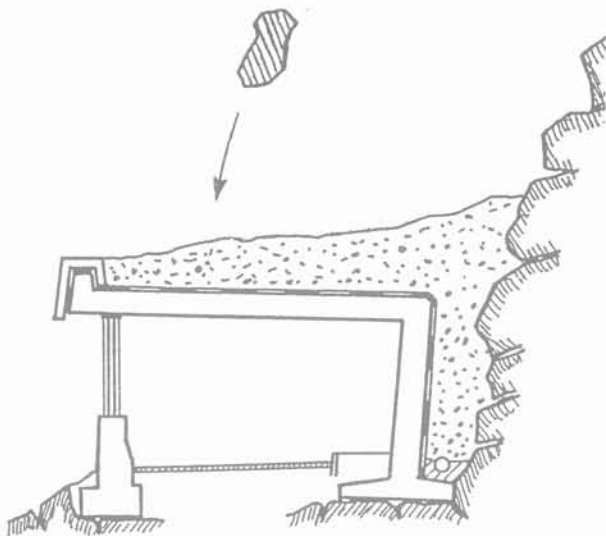


FIG. 1 Galerie de protection contre les chutes de pierres.  
Rock shed used as protection against falling blocks.

Dans le cadre d'une étude suisse relative aux ouvrages de protection contre les chutes de pierres, conduite par l'Office Fédéral des routes et la direction des travaux des CFF, le Laboratoire de mécanique des roches de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a été mandaté pour l'élaboration des bases du calcul des sollicitations de dalles en béton armé dues à des chutes de blocs.

Le programme de recherche comprend les aspects suivants :

- une étude bibliographique ;
- des essais permettant de mesurer la dissipation d'énergie cinétique obtenue dans les matériaux rem-

blayés (effet amortisseur), et les efforts sur la structure porteuse ;

- l'interprétation des résultats de mesure ;
- ainsi qu'une justification théorique.

## 1.2

### Buts de l'étude

Les efforts sur les ouvrages de protection sont essentiellement conditionnés par trois types de facteurs :

- la taille des blocs rocheux, leur vitesse de chute, leur angle d'impact et leur forme (chutes isolées ou éboulements) ;
- l'épaisseur de la couche de protection, la nature des matériaux constitutifs, leur granulométrie, leur compacité, leur angle de frottement interne, leur teneur en eau...
- la structure porteuse elle-même, son système statique, sa résistance, sa rigidité, sa fréquence propre, l'inclinaison du toit, les tirants d'ancrages, les fondations...

Afin de réduire le nombre de paramètres et de permettre une analyse quantitative détaillée, l'étude actuelle s'est limitée aux cas de chutes verticales de blocs sur une dalle horizontale.

Les résultats obtenus devraient conduire à l'élaboration de recommandations pratiques pour la conception des ouvrages, le choix des matériaux d'amortissement et le dimensionnement de la structure. Dans le cadre de cette directive, les aspects relatifs à la construction, à la maintenance et à la réparation de ces ouvrages de protection seront également introduits.

## 1.3

### Recherche bibliographique

Une importante documentation existe au sujet des chutes de pierres. Citons notamment le symposium international de Kandersteg (1979, Canton de Schwyz en Suisse) sous l'égide des Chemins de Fer Fédéraux suisses, ainsi que les journées d'études de Chambéry organisées, en 1988, par l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

Seuls quelques documents relatifs à l'aspect expérimental de la chute de blocs sur des ouvrages de génie civil sont repris ci-après. Il s'agit par ordre chronologique :

- d'une étude du Laboratoire Fédéral suisse d'Essais des Matériaux (LFEM) en 1966 ;
- d'une approche expérimental menée par l'Istituto Cantonale Tecnico Sperimentale (ICTS) du canton du Tessin en 1984 ;
- des recherches entreprises au Japon par le ministère des Constructions, quelques institutions privées et différentes universités. Un état des connaissances a été établi par le Dr H. Masuya, professeur invité à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne en 1993.

Les principales caractéristiques de ces campagnes d'essais sont reprises au tableau I. Y sont également reportées les informations essentielles relatives aux essais réalisés dans le cadre de cette étude.

TABLEAU I

# Études expérimentales de la chute de blocs sur des ouvrages de génie civil. Experimental studies of rock blocks falling down on civil engineering buildings.

| Caractéristiques de l'essai |                | LFEM          | ICTS                             | JAPON                                        | EPFL                       |
|-----------------------------|----------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
| Blocs d'impact              | Forme          | quelconque    | sphère                           | cylindres à base plane, conique ou sphérique | cylindres à base sphérique |
|                             | Masse (kg)     | 1...75        | 1180                             | 300-1000-3000                                | 100-500-1000               |
| Hauteurs de chute (m)       |                | 5-10-20-30-40 | 0,5...3                          | 5-10-15-20                                   | 0/25...10                  |
| Remblai amortissant         | Nature         | néant         | gravillons dépôts alluvionnaires | trois types de sable                         | graviers déchets rocheux   |
|                             | Épaisseur (cm) |               | 50-100                           | 50-70-90-120-150                             | 35-50-100                  |
| Structure                   | Type           | Pré-dalle     | Dalle Fondation                  | Dalle Fondation                              | Dalle                      |
|                             | Matériau       | Béton armé    | Béton armé                       | Béton armé                                   | Béton armé                 |
|                             | Épaisseur (cm) | 4-6-8-10      | 20                               | 30                                           | 20                         |

## 2

## Dispositif d'essais

## 2.1

### Configuration générale

Les essais d'impacts ont été effectués dans la Halle Fosses de l'EPFL où l'on dispose d'un puits de 5 m de diamètre et de 8 m de profondeur. Cette halle présente l'avantage de permettre des essais à l'abri des intempéries, ce qui facilite l'installation d'un système de mesure fiable ainsi que le contrôle des paramètres significatifs des essais entrepris.

Une dalle en béton armé a été construite, placée sur quatre appuis au fond du puits, puis recouverte par un remblai d'épaisseur variable (Fig. 2 et 3). L'ensemble est sollicité par des blocs d'impact lâchés de différentes hauteurs depuis le pont roulant dont est équipé la Halle Fosses. Au cours des essais, les paramètres suivants ont été variés :

- la masse des blocs d'impact : 100, 500 et 1 000 kg
- la hauteur de chute : entre 0,25 et 10 m
- l'épaisseur du remblai : 0,35, 0,50 et 1,00 m

De plus, les essais ont été réalisés avec trois matériaux de remblayage de nature différente : un gravier à béton 3/32, des matériaux provenant d'un cône de déjection et des déchets rocheux excavés par un tunnelier.

## 2.2

### Dalle en béton armé

Les dimensions de la dalle (3,40 x 3,40 m) ont été conditionnées par le diamètre de la fosse profonde

(5 m). Son épaisseur et son pourcentage d'armatures ont été calculés pour un effort d'impact de 400 kN agissant en son centre ; l'amplitude de cette sollicitation ayant été estimée à partir d'une relation japonaise basée sur la théorie de Hertz (chocs élastiques).

Le dimensionnement a permis de fixer les caractéristiques suivantes :

- dalle carrée : 3,40 m x 3,40 m
- épaisseur : 0,20 m
- pourcentage d'armatures : 0,6 %
- armatures inférieures : Ø 14 mm s = 150 mm
- armatures supérieures : Ø 10 mm s = 150 mm
- qualité de béton : B35/25

La dalle repose sur quatre appuis ponctuels. Une précontrainte d'environ 320 kN (assurée par des tiges d'ancrage placées au travers des blocs d'appui) permet de maintenir un contact parfait, et prévient de la sorte le soulèvement de la dalle lors des essais d'impact.

## 2.3

### Blocs d'impact

Les blocs d'impact sont constitués d'une masse de béton enveloppée dans un coffrage perdu métallique (Fig. 4). Leur fût est cylindrique tandis que leur base a la forme d'un segment sphérique.

Le bloc d'une tonne, dont les dimensions ont été tirées de documents japonais (Yoshida *et al.*, 1988), a été choisi comme modèle des deux autres (100 kg et 500 kg). Pour chacun d'entre eux, notons que le diamètre du fût est égal au diamètre d'une sphère de roche (masse volumique de 2 600 kg/m<sup>3</sup>) de même poids.

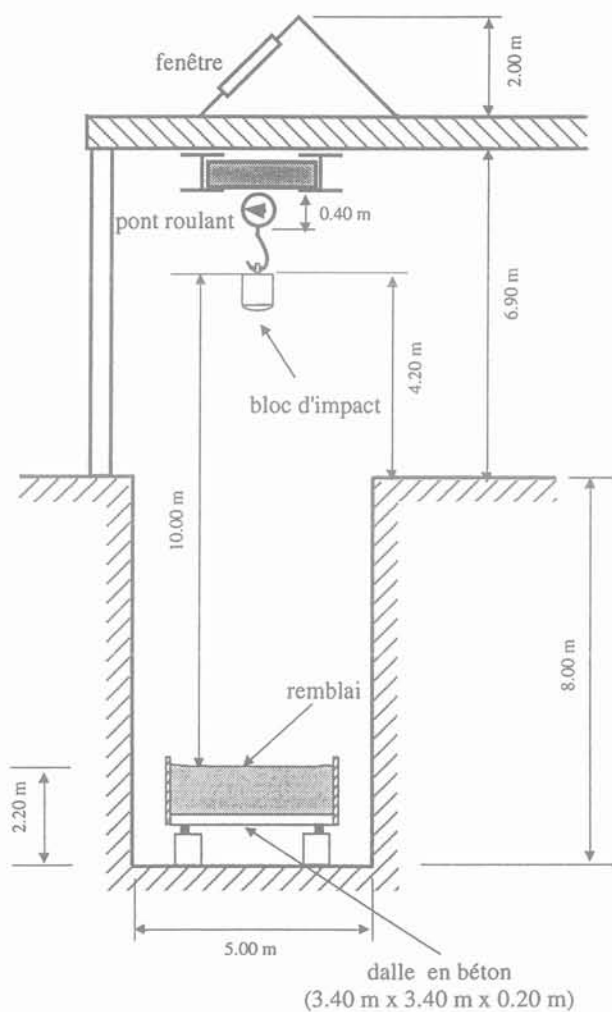


FIG. 2 Coupe verticale du puits d'essai.  
Vertical section of the testing shaft.

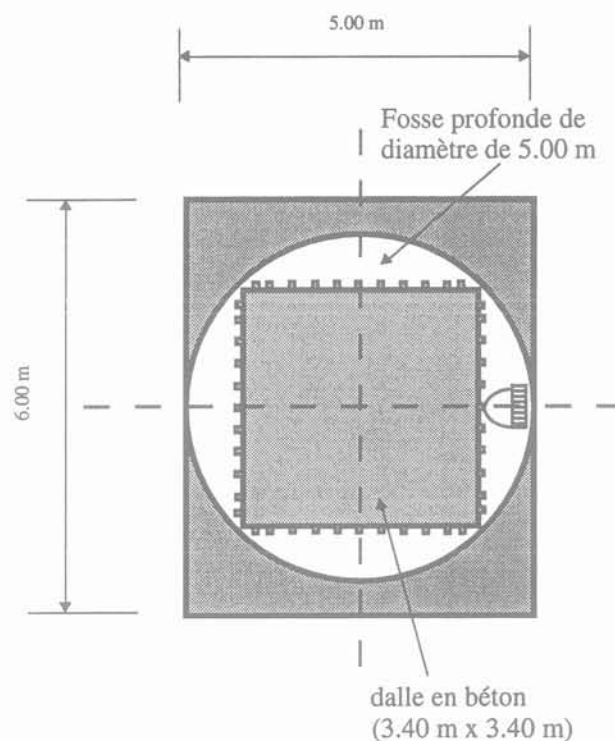
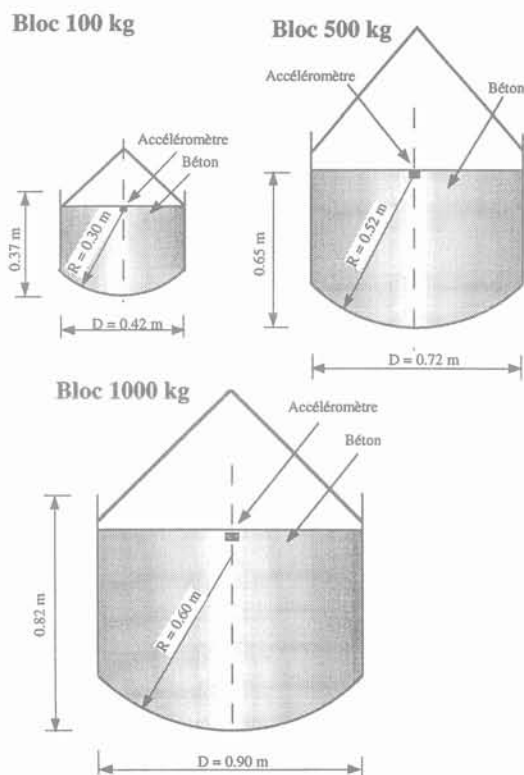


FIG. 3 Vue en plan du puits d'essai.  
Cross section of the testing shaft.



## Blocs d'impact

### Shape of the impact blocks

FIG. 4 Blocs d'impact.  
Shape of the impact blocks.

## Matériaux de remblai

Divers matériaux d'amortissement ont été successivement utilisés (tableau II). Les essais ont été d'abord entrepris avec un gravier à béton de caractéristiques bien spécifiées et contrôlables. Ensuite, ils se sont poursuivis avec des matériaux de remblayage représentatifs de ce qui peut être mis en place économiquement sur les ouvrages réels; notamment des déblais d'excavations dont la réutilisation s'avère impossible et qui devraient être mis en décharge.

Les courbes granulométriques et les caractéristiques géotechniques de ces trois types de matériaux de remblai sont reprises respectivement à la figure 5 et au tableau III. On note une nette différence de constitution; en particulier, le pourcentage de fines augmente du premier (sol-1) au dernier sol (sol-3).

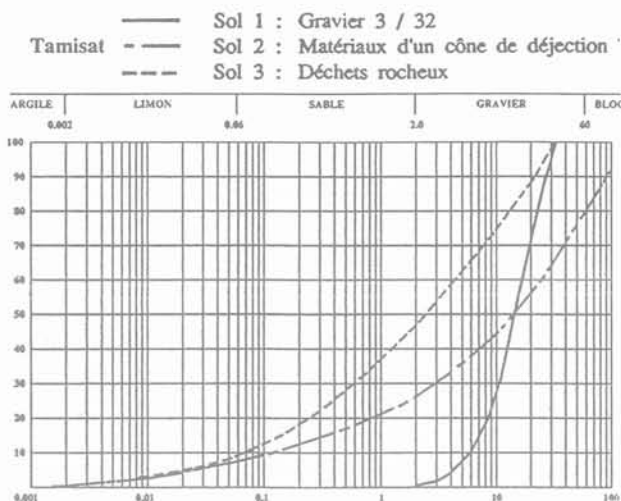


FIG. 5 Courbes granulométriques des trois sols.  
Particle size accumulation curves.

## Dispositif de mesure

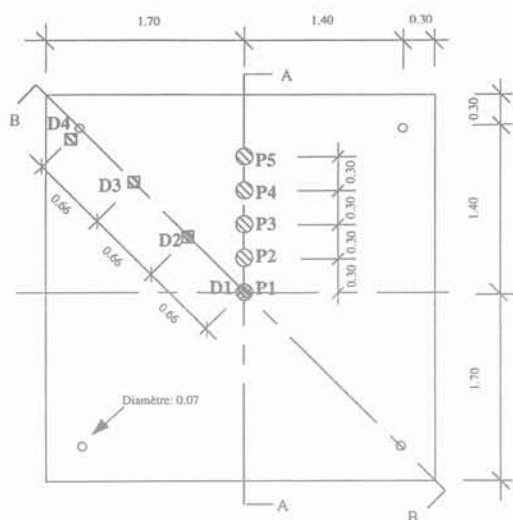
Comme expliqué dans l'introduction, le but des investigations est de déterminer la capacité d'amortissement de l'énergie d'impact par le matériau remblayé, et de mesurer les efforts agissant sur la dalle en béton armé ainsi que les déformations associées. L'approche

TABEAU II Description des matériaux d'amortissement utilisés.  
Description of the damping materials.

|              | Sol-1                                                           | Sol-2                                                                                        | Sol-3                                                                           |
|--------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Dénomination | Gravier (3/32)                                                  | Cône de déjection                                                                            | Déchets rocheux                                                                 |
| Origine      | Mélange de granulats à béton issus d'une drague et de gravières | Matériaux d'un cône de déjection situé en Valais                                             | Matériaux d'excavation d'un tunnel routier au Tessin                            |
| Composition  | Mélange de roches magmatiques, métamorphiques et sédimentaires  | Gros éléments de schistes cristallins et de gneiss en plaquettes                             | Gneiss ocellé, schisteux à deux micas (noir et blanc)                           |
| Traitement   | Néant                                                           | Tamissage pour éliminer les gros blocs (tamis à barres longitudinales de 10 cm d'espacement) | Criblage pour augmenter la fraction de fines (criblage à sec, mailles de 20 mm) |

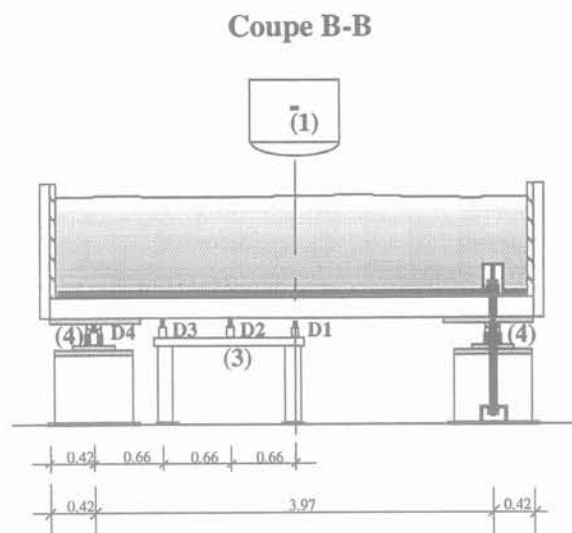
TABEAU III Caractéristiques géotechniques des trois sols de remblai.  
Geotechnical characteristics of the three soil layers.

| Type sol | Densité (kg/m <sup>3</sup> ) | d <sub>10</sub> (mm) | Uniformité C <sub>u</sub> | Courbure C <sub>c</sub> | Angle de frottement | Cohésion (kN/m <sup>2</sup> ) |
|----------|------------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Sol-1    | 1 650                        | 6                    | 2,8                       | 1,1                     | 41                  | 0                             |
| Sol-2    | 1 900                        | 0,12                 | 230,8                     | 6,2                     | 45                  | 0                             |
| Sol-3    | 1 800                        | 0,065                | 77,8                      | 1,4                     | 47                  | 0                             |



**Légende:** ● Pressiomètres installés et liés (5 pcs.)  
 ■ Capteurs de déplacement (4 pcs.)

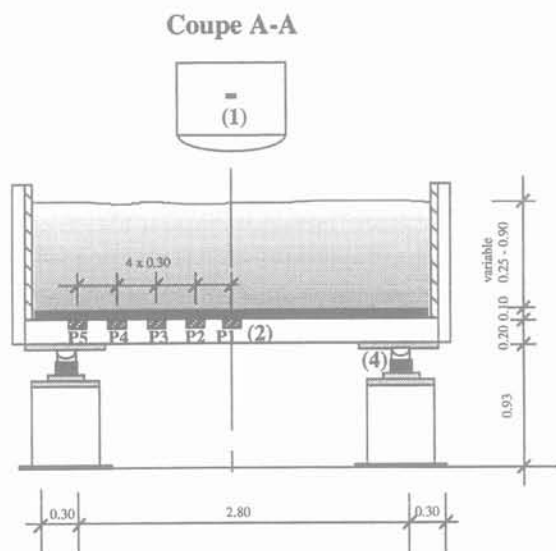
**FIG. 6** Vue en plan de la dalle et du dispositif de mesure.  
 Cross section of the concrete slab and the measuring device.



■ sable  
 ■ gravier, moraine ou tout-venant

**Légende:** (1) accéléromètre du bloc d'impact (1 pce.)  
 (3) capteurs de déplacement (4 pcs.)  
 (4) réactions d'appui (4 capteurs de force)

**FIG. 8** Coupe diagonale (BB) de la dalle et du dispositif de mesure.  
 Diagonal section (BB) of the concrete slab and the measuring device.



■ sable  
 ■ gravier, moraine ou tout-venant

**Légende:** (1) accéléromètre du bloc d'impact (1 pce.)  
 (2) pressiomètres (5 cellules de pression)  
 (4) réactions d'appui (4 capteurs de force)

**FIG. 7** Coupe médiane (AA) de la dalle et du dispositif de mesure.  
 Median section (AA) of the concrete slab and the measuring device.

scientifique d'un tel problème très complexe d'action dynamique exige des essais systématiques et bien instrumentés. A cet effet, divers capteurs ont été installés (Fig. 6, 7 et 8):

- 1) un accéléromètre dans le bloc d'impact;
- 2) cinq pressiomètres (P1 à P5) scellés dans la dalle et placés sur une demi-médiane avec une entredistance de 30 cm. Afin d'éviter leur détérioration par les matériaux de remblayage, une couche de sable de 10 cm d'épaisseur est mise en place sur la dalle;
- 3) quatre capteurs de déplacement (D1 à D4) placés sous la dalle suivant une demi-diagonale et entre distants de 66 cm;
- 4) quatre capteurs de force au droit des appuis afin de mesurer les réactions.

Il était également prévu de mesurer les contraintes dans les armatures inférieures, mais les résultats obtenus ne se sont pas avérés satisfaisants, probablement suite à la fissuration du béton.

Toutes ces mesures, acquises à une fréquence de 1,2 kHz, sont stockées automatiquement sur ordinateur, puis elles font l'objet d'un traitement et d'une représentation graphique.

## Programme d'essais

### 3.1

### Essais d'impact

La campagne des essais dynamiques est résumée au tableau IV. Il est essentiel de noter que le déroulement de ces essais a été adapté au cours de l'avancement de l'étude :

- **Séries 1 à 8 :** Pour un type de remblai (épaisseur constante) et un type de bloc d'impact, on a procédé à des essais à différentes hauteurs de chute. Pour chacune de ces hauteurs, l'essai a été répété 3 à 4 fois jusqu'à ce que les valeurs maximales enregistrées se soient stabilisées. Après chaque impact, le cratère formé par le bloc était pioché, puis égalisé.

- **Séries 9 à 28 :** Afin de mieux cerner le phénomène de compactage des matériaux d'amortissement, on a ensuite réalisé des essais pour un type de remblai (épaisseur constante), un type de bloc et une hauteur de chute bien définie ; et ce, jusqu'à ce que l'on atteigne des valeurs d'impact stabilisées (pour certaines séries, onze chocs ont été nécessaires !). Pour que les conditions initiales soient plus ou moins identiques d'une série à l'autre, un remaniement du sol s'est avéré indispensable entre chaque série d'essais (sortie partielle ou même totale du remblai). Par contre, entre chaque

impact, on se contentait de corriger superficiellement le sol en piochant et en égalisant le cratère (comme pour les huit premières séries).

- **Séries 30 et 31 :** Ces deux dernières séries ont été planifiées pour connaître le comportement du système sous de plus grandes énergies d'impact : blocs de 500 et 1 000 kg dont la hauteur de chute a été progressivement augmentée jusqu'à 9 m par incréments de 1 m. La procédure d'essais est analogue à celle utilisée pour les huit premières séries.

### 3.2

### Essais statiques

#### 3.2.1

#### Rigidité statique

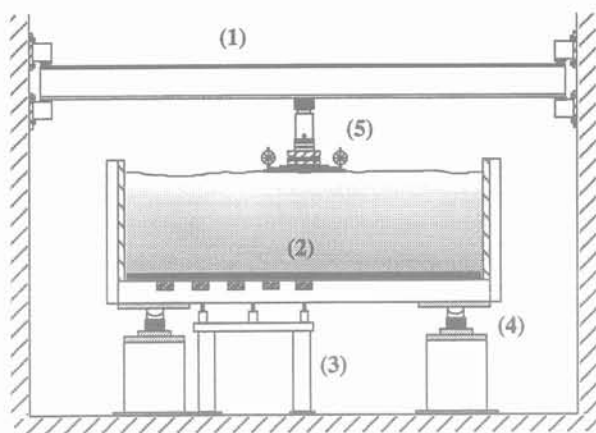
Le suivi de l'évolution de la rigidité au cours de la campagne d'essais permet de se faire une idée de l'endommagement progressif de la dalle. De plus, la connaissance des rigidités statiques de la dalle et de l'ensemble remblai-dalle devrait permettre, par comparaison avec les essais d'impact, de ramener le problème du dimensionnement sous sollicitations dynamiques au calcul plus aisé d'une structure soumise à un effort statique équivalent.

Des essais statiques ont donc été effectués régulièrement tant sur la dalle seule que sur la dalle recouverte de remblai (Fig. 9), la charge appliquée étant de 50 kN jusqu'à la vingt-huitième série de 200 kN ensuite.

TABLEAU IV Déroulement des essais.  
Testing programme.

| Série | Sol | $h_{\text{remblai}}$ (m) | Bloc (kg) | $H_{\text{chute}}$ (m)    | Série | Sol | $h_{\text{remblai}}$ (m) | Bloc (kg) | $H_{\text{chute}}$ (m) |
|-------|-----|--------------------------|-----------|---------------------------|-------|-----|--------------------------|-----------|------------------------|
| 1     | 1   | 1,00                     | 100       | 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 9,8       | 17    | 1   | 0,50                     | 1 000     | 1                      |
| 2     | 1   | 1,00                     | 500       | 0,5 ; 1,0 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 | 18-A  | 3   | 1,00                     | 100       | 10                     |
| 3     | 1   | 1,00                     | 1 000     | 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 1     | 18-B  | 3   | 1,00                     | 100       | 5                      |
| 4     | 2   | 1,00                     | 100       | 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 9,85      | 19-A  | 3   | 1,00                     | 500       | 1                      |
| 5     | 2   | 1,00                     | 500       | 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2         | 19-B  | 3   | 1,00                     | 500       | 2                      |
| 6     | 2   | 1,00                     | 1 000     | 0,25 ; 0,5 ; 0,75         | 20    | 3   | 1,00                     | 1 000     | 1                      |
| 7     | 1   | 0,50                     | 100       | 2,5 ; 5 ; 7,5 ; 9         | 21    | 3   | 1,00                     | 100       | 5                      |
| 8     | 1   | 0,50                     | 500       | 0,25 ; 0,5 ; 1            | 22-A  | 3   | 0,50                     | 100       | 5                      |
| 9     | 1   | 0,50                     | 100       | 10                        | 22-B  | 3   | 0,50                     | 100       | 10                     |
| 10-A  | 1   | 1,00                     | 100       | 9,75                      | 23-A  | 3   | 0,50                     | 500       | 1                      |
| 10-B  | 1   | 1,00                     | 500       | 2                         | 23-B  | 3   | 0,50                     | 500       | 2                      |
| 11-A  | 2   | 1,00                     | 100       | 9,75                      | 24    | 3   | 0,50                     | 1 000     | 1                      |
| 11-B  | 2   | 1,00                     | 500       | 2                         | 25-A  | 3   | 0,35                     | 100       | 5                      |
| 12-A  | 2   | 0,50                     | 100       | 5                         | 25-B  | 3   | 0,35                     | 100       | 10                     |
| 12-B  | 2   | 0,50                     | 100       | 10                        | 26-A  | 1   | 0,35                     | 100       | 5                      |
| 13-A  | 2   | 0,50                     | 500       | 1                         | 26-B  | 1   | 0,35                     | 100       | 10                     |
| 13-B  | 2   | 0,50                     | 500       | 2                         | 27    | 1   | 1,00                     | 100       | 9,75                   |
| 14    | 2   | 1,00                     | 500       | 2                         | 28    | 1   | 1,00*                    | 100       | 9,75                   |
| 15    | 2   | 1,00                     | 1 000     | 1                         | 30    | 1   | 0,50                     | 500       | 2...9                  |
| 16    | 1   | 0,50                     | 500       | 2                         | 31    | 1   | 0,50                     | 1 000     | 1...9                  |

\* Essais sur un remblai incliné à 20°.



**Légende:** (1) poutre d'appui (HEB 300)  
(2) pressiomètres (5 pcs.)  
(3) capteurs de déplacement (4 pcs.)  
(4) capteurs de force (4 pcs.)  
(5) vérin hydraulique et capteur de force

■ sable  
■ remblai (sol-1, 2 ou 3)

**FIG. 9** Schéma de l'essai statique.  
Scheme of the static test.

### 3.2.2

#### Essais à la plaque

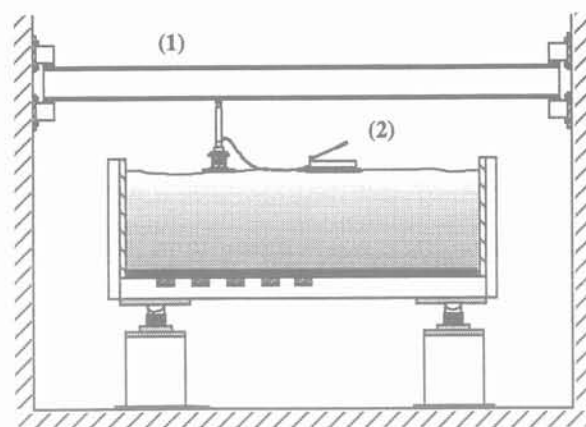
Afin de connaître les caractéristiques de déformabilité des remblais mis en place, des essais ME ont été régulièrement réalisés avant et après les séries d'essais. Ces essais à la plaque normalisés (grâce auxquels on détermine les modules de compressibilité en charge et décharge d'une couche d'infrastructure) étaient effectués, non pas au centre du remblai où le sol était pré-consolidé par les essais dynamiques et statiques antérieurs, mais à la moitié de la distance entre le centre et le bord (Fig. 10).

## 4

### Exemple d'essai d'impact

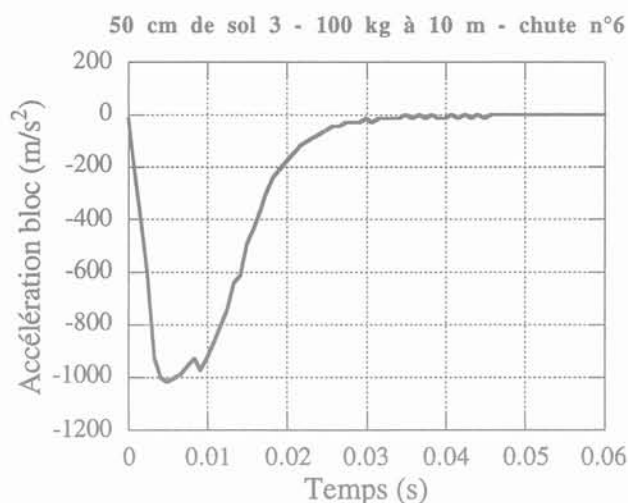
Les essais dynamiques permettent d'obtenir de nombreuses informations, soit directement par des mesures, soit indirectement par des calculs. Par mesure, on détermine la décélération du bloc, les pressions sur la dalle, les réactions d'appuis ainsi que les mouvements de la dalle (Fig. 6, 7 et 8). Par calcul ou par analyse des enregistrements d'essais, on détermine l'évolution de la vitesse et de la pénétration du bloc durant l'impact, l'effort dynamique par accélération, l'effort dynamique intégré (à partir des pressions mesurées), le temps d'impact ainsi que la période propre du système.

Les figures 11 à 18 ci-après sont relatives au sixième essai de la série 22-B (tableau IV). Il s'agit d'un impact du bloc de 100 kg lâché d'une hauteur de 10 m sur un remblai de déchets rocheux (Sol-3) de 50 cm d'épaisseur.



**Légende:** (1) poutre d'appui (HEB 300)  
(2) vérin hydraulique avec plaque d'appui  
(A = 700 cm<sup>2</sup>) et comparateur

**FIG. 10** Schéma de l'essai ME.  
Scheme of the ME test.



**FIG. 11** Décélération du bloc durant l'impact.  
Deceleration of the weight during the impact.

### 4.1

#### Accélération, vitesse et pénétration du bloc d'impact

A partir des mesures fournies par l'accéléromètre du bloc d'impact (Fig. 11), il est aisé de déterminer par intégration l'évolution de la vitesse du bloc au cours du temps (Fig. 12). Un contrôle de la fiabilité des valeurs enregistrées est alors réalisé en vérifiant que la courbe de vitesse aboutit à une valeur nulle en fin d'impact. Si tel n'est pas le cas, la courbe d'accélération est corrigée jusqu'à convenance en filtrant les mesures inférieures au seuil de précision du capteur (1 % du fond d'échelle).

Une seconde intégration fournit ensuite l'enfoncement du bloc en fonction du temps (Fig. 13). Il a pu être constaté que la pénétration ainsi calculée était proche

50 cm de sol 3 - 100 kg à 10 m - chute n°6

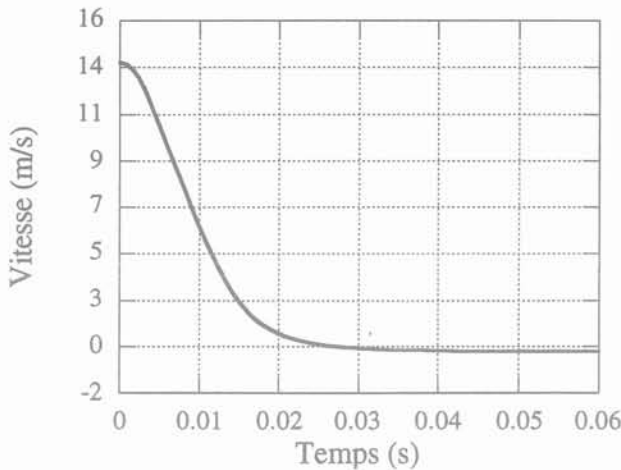


FIG. 12 Vitesse du bloc durant l'impact.  
Speed of the weight during the impact.

50 cm de sol 3 - 100 kg à 10 m - chute n°6

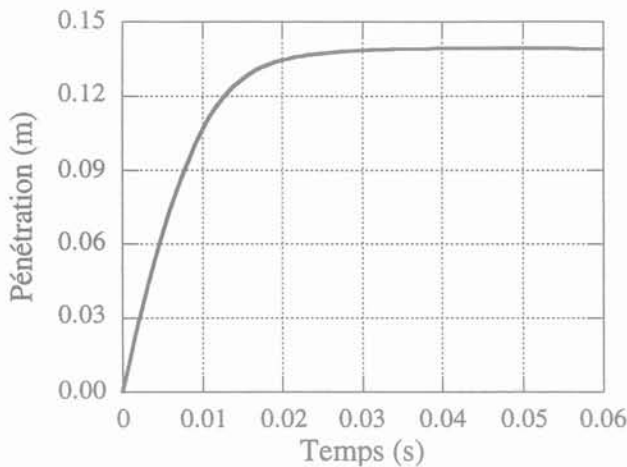


FIG. 13 Pénétration du bloc durant l'impact.  
Penetration of the weight during the impact.

de la valeur mesurée manuellement après retrait du bloc.

Finalement, en multipliant la décélération maximale du bloc par sa masse, on détermine l'effort maximal agissant à la surface du remblai au cours de l'impact. Cette valeur caractéristique, dénommée « effort par accélération », sera utilisée lors de l'analyse des résultats.

#### 4.2

### Pressions sur la dalle

La figure 14 représente la réponse des pressiomètres P1 à P5 au cours du temps. Vu que ces mesures de pression sont seulement effectuées sur la moitié d'une médiane (Fig. 7), il était important de garantir un impact parfaitement centré des blocs sur le remblai afin que l'on puisse faire l'hypothèse d'une distribution axisymétrique des pressions sur la dalle.

La force résultante agissant au centre de la dalle, encore appelée « effort intégré », s'obtient en intégrant la répartition des pressions sur toute la dalle (Fig. 15). Cette intégration se base sur une distribution trapézoïdale et axisymétrique des pressions (Fig. 16):

$$F_{\text{int}} = 0,333 \pi \Delta s^2 (p_1 + 6 p_2 + 12 p_3 + 18 p_4 + 11 p_5) \text{ avec } \Delta s = 0,3 \text{ m (1)}$$

Par ailleurs, une analyse de l'enregistrement de la pression centrale (capteur P1) permet une estimation du « temps d'impact », ou durée d'application de la charge dynamique ( $T_{\text{imp}}$  à la figure 14).

#### 4.3

### Réactions d'appuis

Grâce aux quatre capteurs de force (Fig. 6), l'enregistrement de la somme des efforts transmis aux appuis est possible (Fig. 17). L'existence de réactions négatives atteste clairement de la nécessité d'une précontrainte des appuis pour éviter le sursaut de la dalle.

50 cm de sol 3 - 100 kg à 10 m - chute n°6

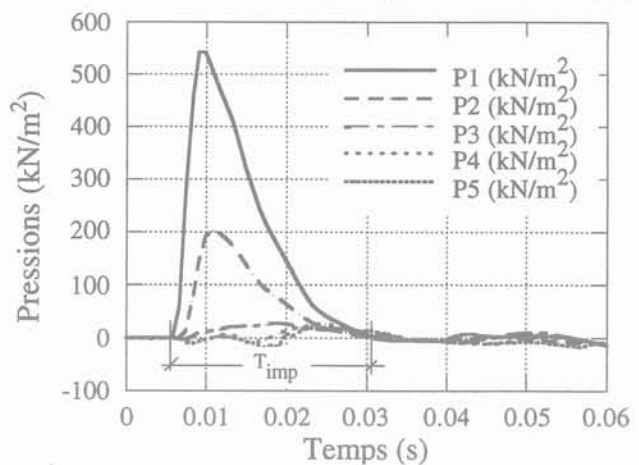


FIG. 14 Réponse des pressiomètres P1 à P5.  
Measures of the pressure meters P1 to P5.

50 cm de sol 3 - 100 kg à 10 m - chute n°6

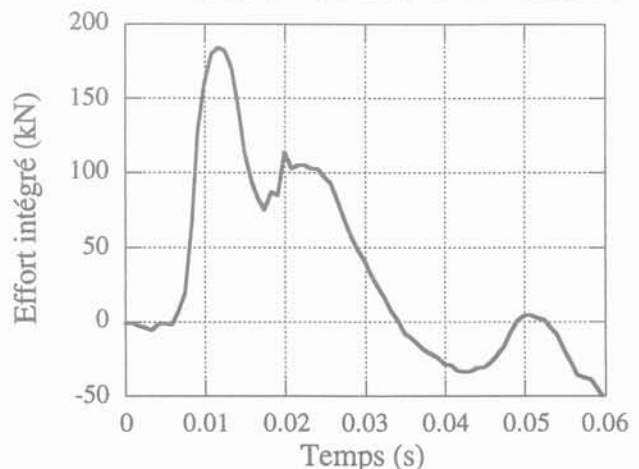
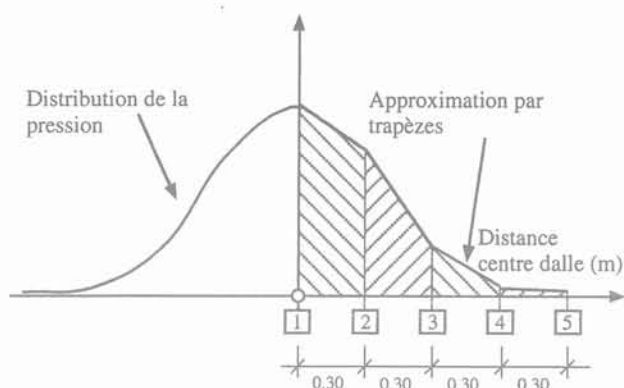
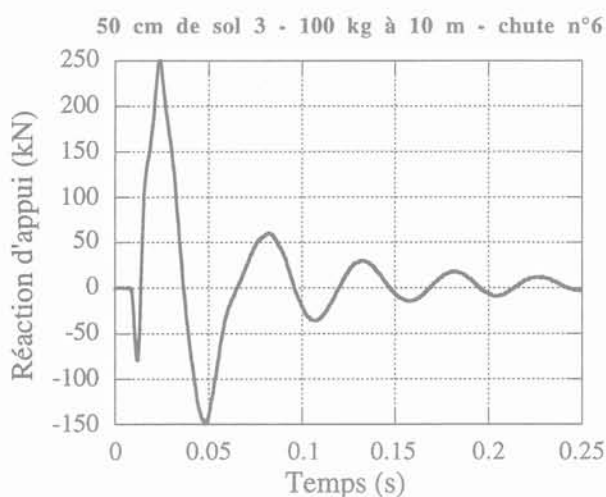


FIG. 15 Effort intégré.  
Integrated earth pressure.



**Légende:** 1 à 5 capteurs de pression

**FIG. 16** Intégration de la répartition des pressions.  
Integration of the earth pressure distribution.



**FIG. 17** Enregistrement de la somme des réactions d'appuis.  
Measurement of the total reaction force.

#### 4.4

### Mouvement de la dalle

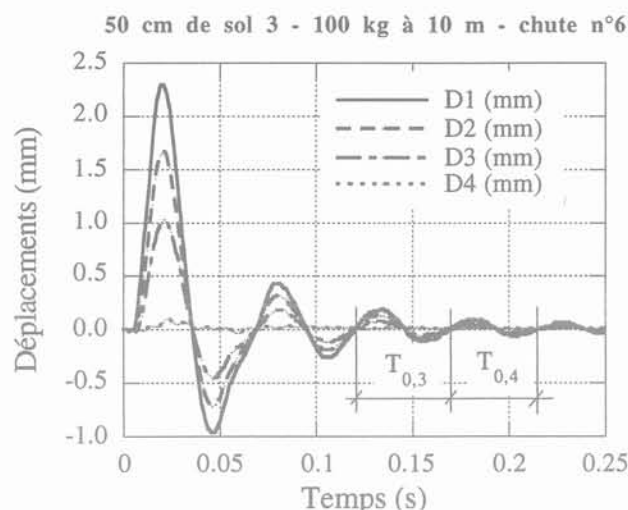
En plus de la mesure des réactions d'appuis, la réponse de la dalle aux divers impacts peut être observée grâce aux quatre capteurs de déplacement D1 à D4 placés sous celle-ci (Fig. 18).

La période propre de l'ouvrage peut être déterminée à partir des figures 17 ou 18. Dans cette étude, l'estimation a été basée sur les troisième et quatrième cycles de vibration du capteur de déplacement central D1 ( $T_{0,3}$  et  $T_{0,4}$  à la figure 18). Notons qu'un calcul théorique simplifié a permis de trouver des résultats tout à fait comparables.

#### 4.5

### Influence du compactage dynamique

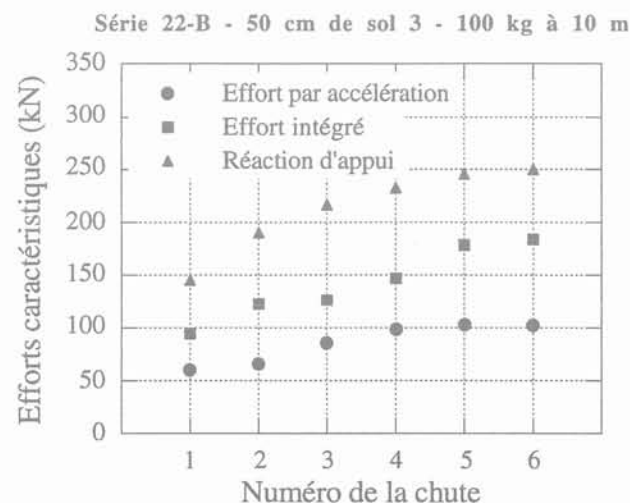
Lors de l'interprétation des résultats de la campagne d'essais dynamiques, il est important de garder



**FIG. 18** Mesure des capteurs de déplacement D1 à D4.  
Measures of the displacement meters D1 to D4.

à l'esprit que les diverses informations mesurées et calculées dépendent non seulement des caractéristiques de la série d'essais (masse du bloc, hauteur de chute, type et épaisseur du remblai), mais aussi du nombre d'essais précédemment réalisés dans cette série. Ce phénomène de compactage dynamique, déjà mentionné auparavant, est très bien illustré aux figures 19 et 20 pour la série 22-B (dont les résultats pour le sixième essai ont été présentés aux figures 11 à 18 ci-avant). On y constate une stabilisation des différents paramètres après quelques chutes.

Pour les trois types de matériaux d'amortissement utilisés dans la présente étude, l'influence du compactage dynamique semble être d'autant plus marquée que la teneur en fines du sol est élevée.



**FIG. 19** Évolution des efforts avec le nombre de chutes.  
Evolution of the forces with the number of falls.

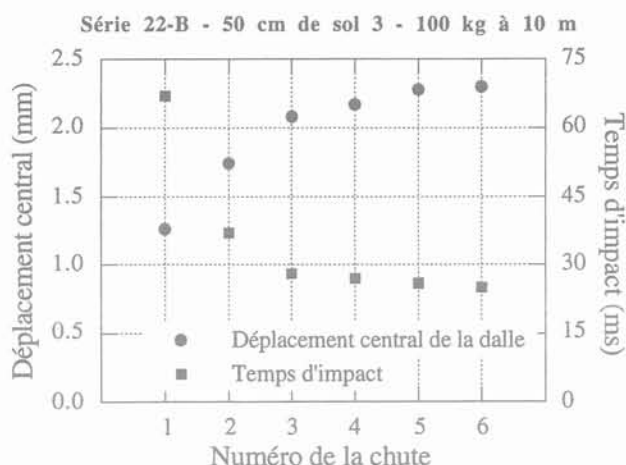


FIG. 20 Évolution du déplacement central de la dalle et du temps d'impact avec le nombre de chutes.  
Evolution of the central slab displacement and of the impact time with the number of falls.

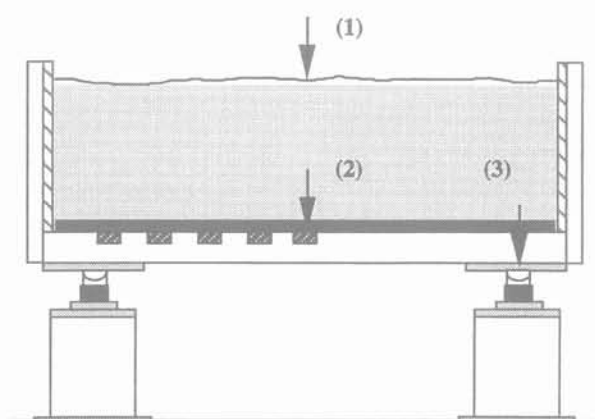
## 5

# Analyse des résultats

## 5.1

## Comparaison des trois efforts caractéristiques

Chaque essai d'impact permet d'obtenir l'évolution au cours du temps de trois efforts caractéristiques (Fig. 21): l'effort par accélération, l'effort intégré et la somme des réactions d'appui (définis respectivement aux points 4.1, 4.2 et 4.3).



Légende: (1) Effort par accélération  
(2) Effort intégré  
(3) Réaction d'appui

FIG. 21 Représentation des trois efforts caractéristiques.  
Representation of the three characteristic forces.

La valeur maximale de chacune de ces forces a été relevée pour tous les essais réalisés jusqu'à la série 27. Ces résultats ont ensuite été collationnés et triés par type de matériau d'amortissement et par épaisseur de remblai, avant de faire l'objet de trois représentations graphiques:

- figure 22: relation effort intégré-effort par accélération;
- figure 23: relation effort intégré-réaction d'appui;
- figure 24: relation réaction d'appui-effort par accélération.

L'examen de ces résultats mène aux constatations suivantes:

- 1) Dans la gamme des impacts analysés (énergie potentielle maximale de 1 kNm, soit 100 kg à 10 m, 500 kg à 2 m ou 1 000 kg à 1 m), il semble y avoir une relation linéaire entre les valeurs maximales des trois efforts caractéristiques. Cette linéarité est mieux marquée pour la relation entre la réaction d'appui et l'effort par accélération (Fig. 24) suite à une dispersion plus faible des points; la meilleure corrélation étant probablement due au fait que ces deux forces sont mesurées directement, contrairement à l'effort intégré qui s'obtient par intégration des valeurs enregistrées aux cinq pressiomètres (mesures qui se sont avérées légèrement influencées par les vibrations de la dalle...).
- 2) L'influence du type de matériau de remblai sur les tendances linéaires mises en évidence ci-avant est quasi insignifiante pour les trois sols utilisés dans la présente étude. Par contre, une différence due à l'épaisseur de la couche d'amortissement peut être notée aux figures 22 et 23 où l'effort intégré tend à croître plus vite lorsque la hauteur de remblai diminue.

## 5.2

## Rigidité « dynamique » de la dalle

Lors des essais statiques réalisés sur la dalle recouverte de remblai, les trois efforts caractéristiques sont sensiblement égaux ( $\pm 10\%$  près); et, par conséquent, la détermination de la rigidité de l'ensemble dalle-remblai est univoque. Par contre, l'évaluation de cette rigidité à partir des essais dynamiques s'avère plus difficile suite aux valeurs différentes prises par ces trois forces. Parmi les divers diagrammes force-déplacement ainsi envisageables, notre intérêt s'est essentiellement porté sur les représentations des valeurs maximales de l'effort intégré et de la réaction d'appui en fonction du déplacement maximal au centre de la dalle, et ce pour deux raisons:

- ces deux forces sont appliquées à même la dalle, contrairement à l'effort par accélération qui agit à la surface du remblai (Fig. 21);
- ces deux efforts atteignent leur maximum sensiblement en même temps que le déplacement central de la dalle, ce qui en facilite l'interprétation.

L'analyse des figures 25 et 26 met en évidence l'importance de l'évolution de la rigidité de la dalle au cours des essais. Cela se remarque clairement pour les résultats des séries 1, 2 et 3 (effectuées sur un remblai de 1 m de gravier), où la rigidité est bien plus élevée que pour les séries ultérieures. L'analyse des premiers essais statiques réalisés sur la dalle a d'ailleurs confirmé une perte de rigidité de l'ordre de 35 % au début de la campagne d'essais. Cette chute s'explique

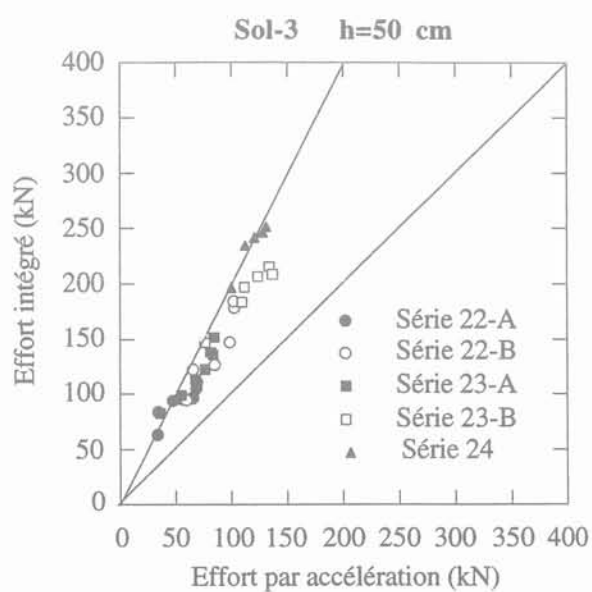
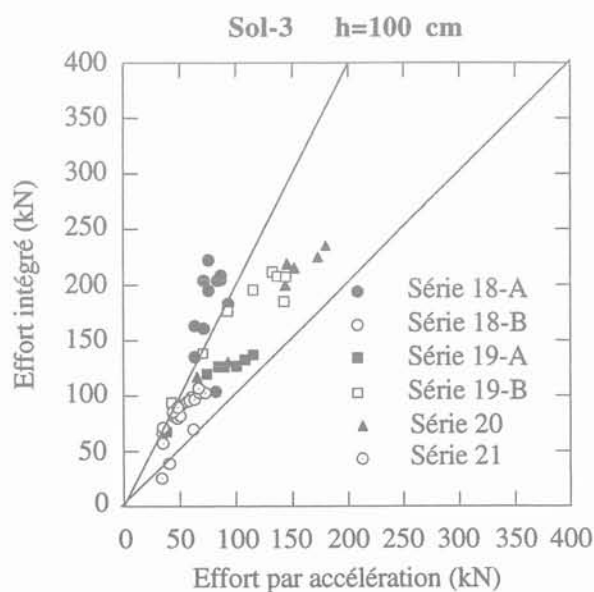
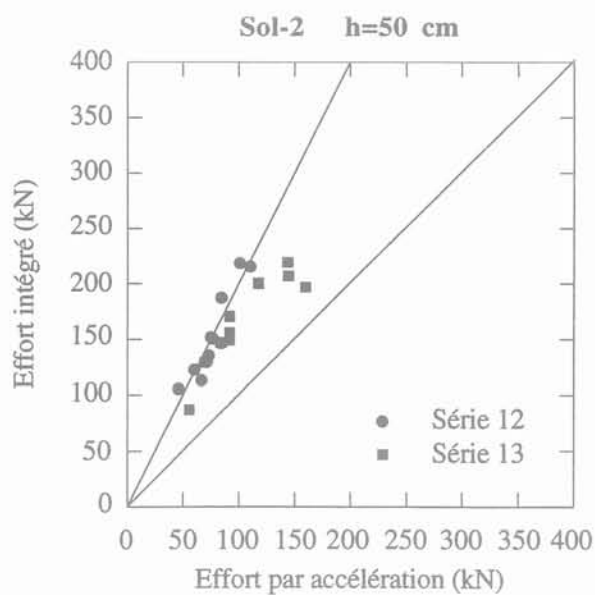
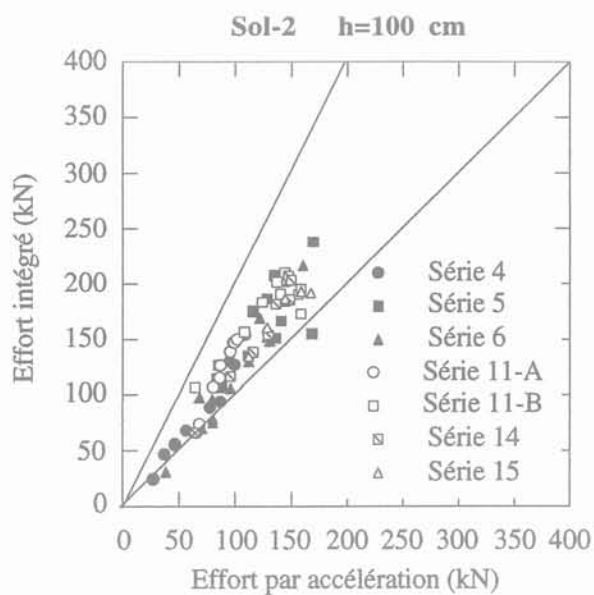
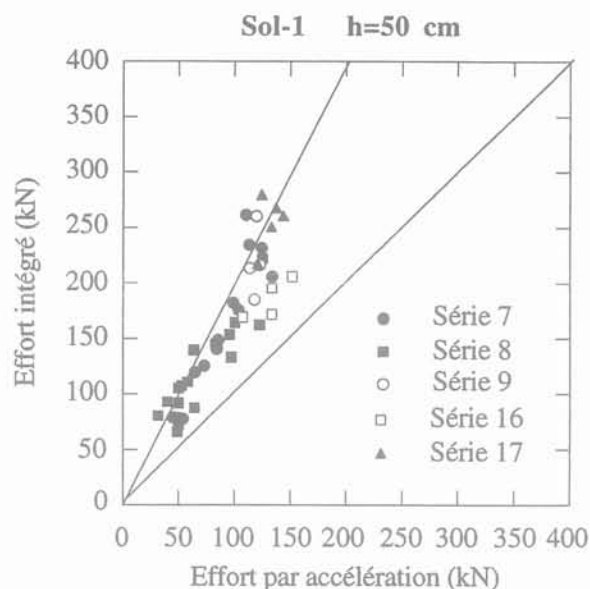
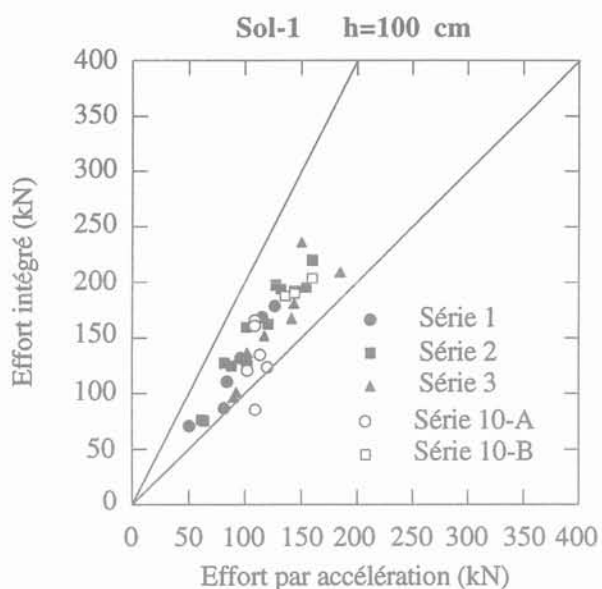


FIG. 22

**Relation effort intégré-effort par accélération.**

Relationship between integrated earth pressure and impulsive force of weight.

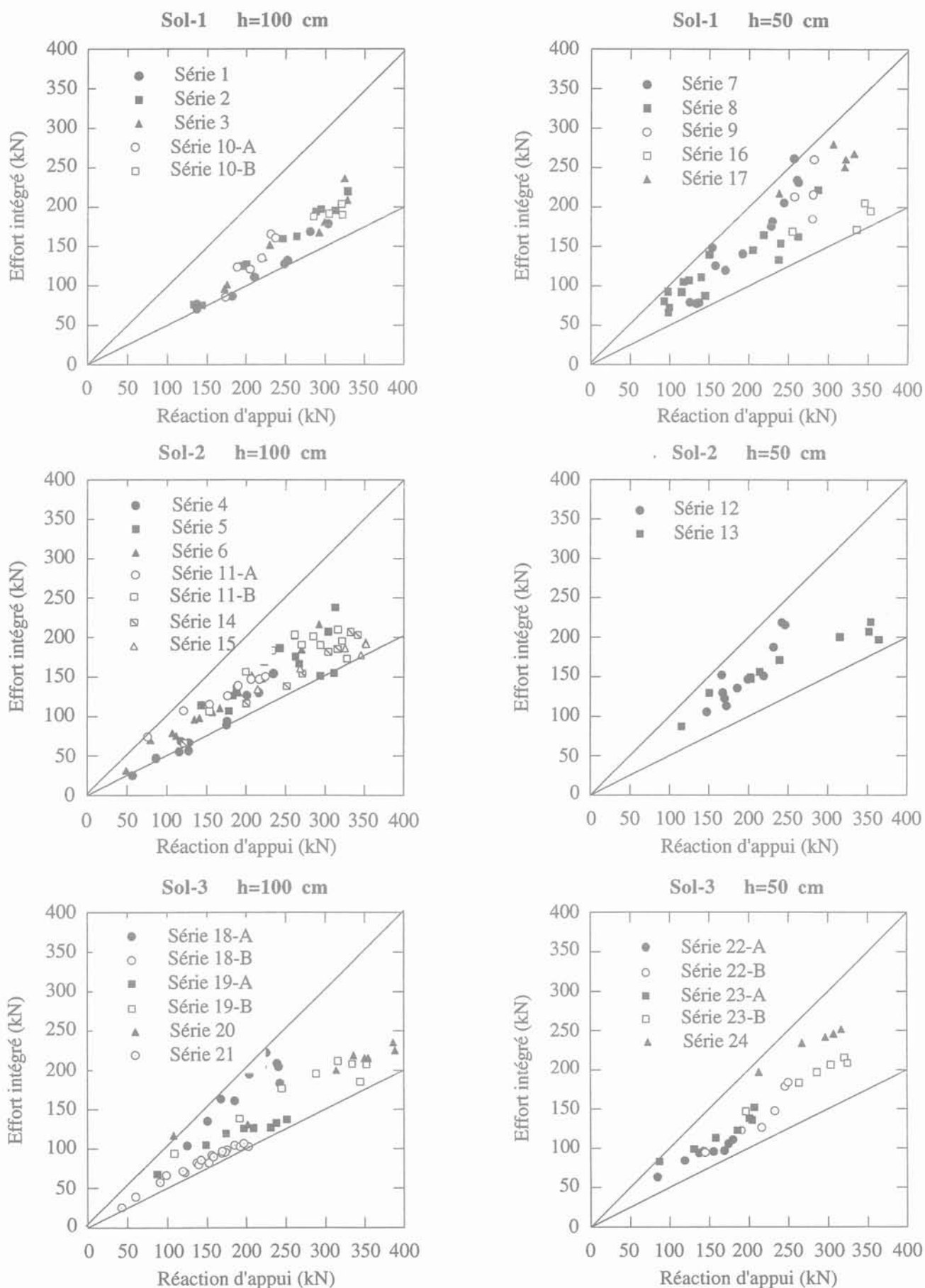
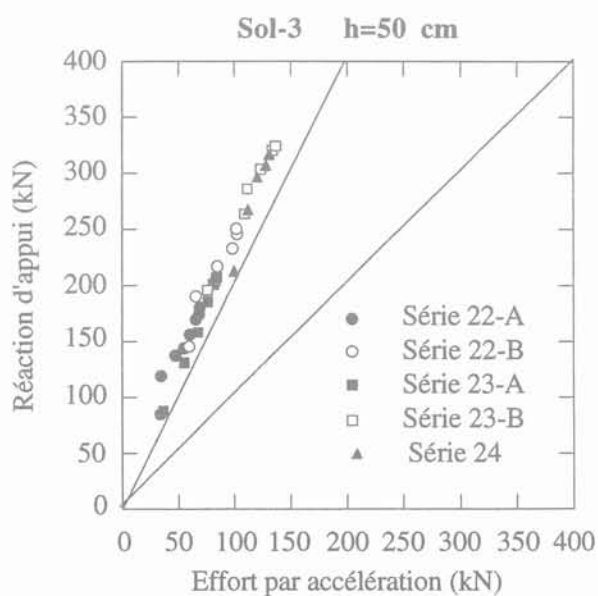
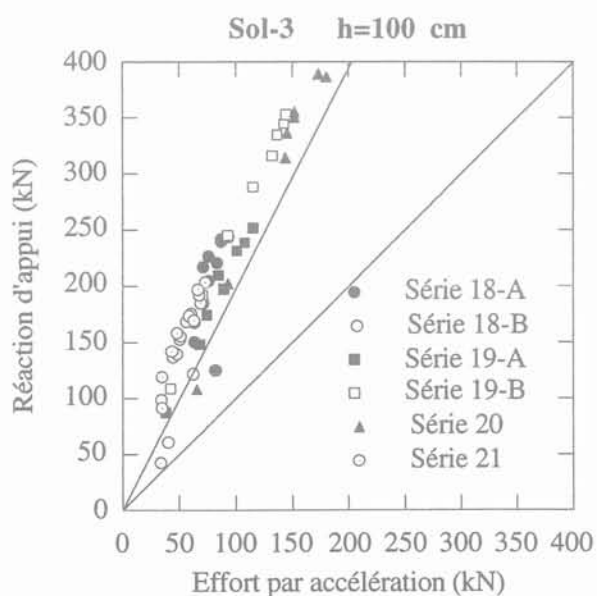
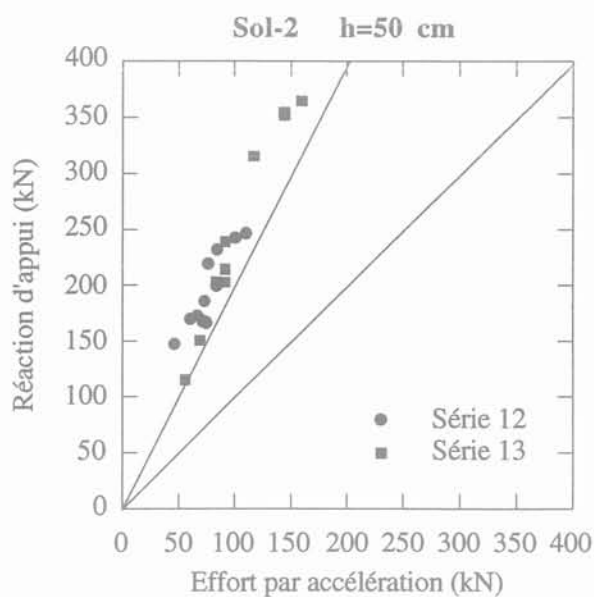
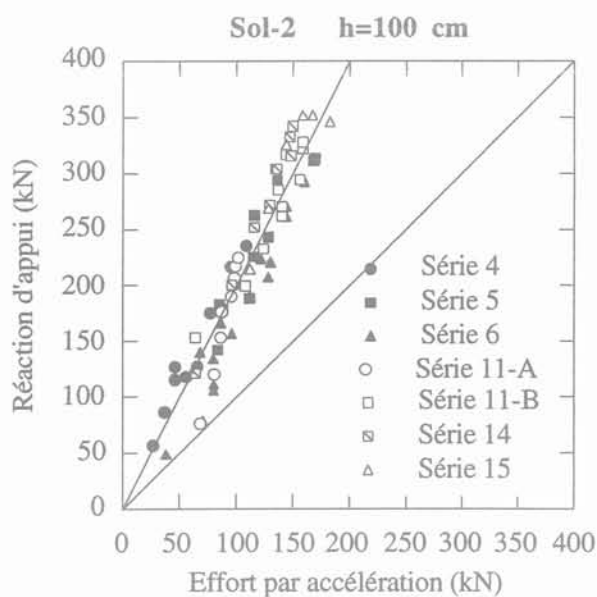
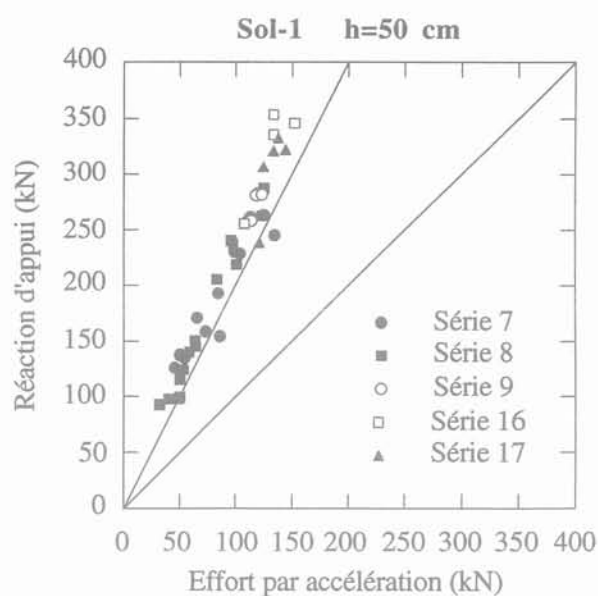
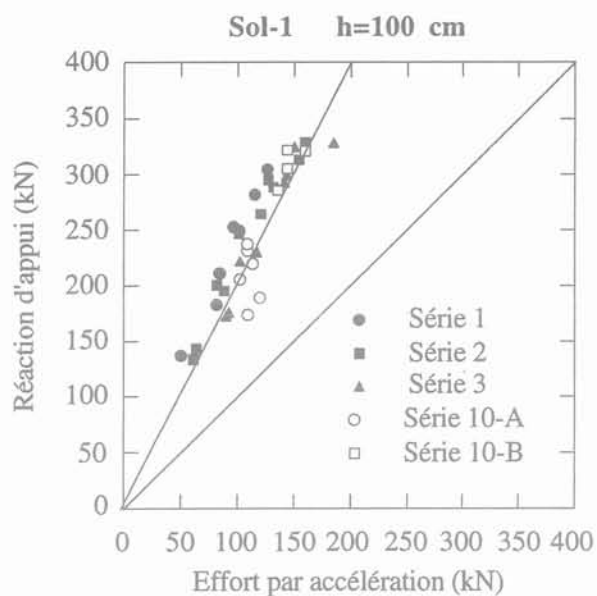


FIG. 23

Relation effort intégré-réaction d'appui.

Relationship between integrated earth pressure and total reaction force.



**FIG. 24** Relation réaction d'appui-effort par accélération.  
Relationship between total reaction force and impulsive force of weight.

probablement par la fissuration de la dalle lors des premiers impacts. Au cours des séries suivantes (4 à 28), la rigidité de la dalle a encore fluctué, mais sans dépasser une variation de 10 %.

Hormis les trois premières séries, on constate que dans l'ensemble les résultats présentent une faible dispersion lorsqu'ils sont exprimés en fonction de la réaction d'appui (Fig. 25); et, tout comme déjà noté précédemment (point 5.1), une dispersion plus marquée dans le diagramme faisant intervenir l'effort intégré (Fig. 26). Les tendances sont linéaires à légèrement paraboliques et sont relativement indépendantes du type de matériau d'amortissement utilisé. Par contre, l'épaisseur de remblai semble avoir une petite influence.

Des essais statiques de 100, 150 et 200 kN ont été réalisés après la série 28 sur un remblai de 50 cm de gravier (sol-1). Les trois courbes effort intégré ( $\approx$  effort au vérin) – déplacement central de la dalle ainsi obtenues sont superposées aux résultats d'impacts des séries 7, 8, 9, 16 et 17 (Fig. 27). Il en ressort que les courbes statiques constituent une bonne moyenne des résultats dynamiques; et par conséquent, l'effort intégré peut être utilisé pour passer d'un dimensionnement sous sollicitation dynamique à un calcul statique équivalent.

### 5.3

## Apport des séries 30 et 31

Au cours des séries 30 et 31, la hauteur de chute des blocs de 500 et de 1 000 kg a été progressivement augmentée jusqu'à 9 m, permettant ainsi d'analyser le comportement de l'ensemble dalle-remblai sous de plus grandes énergies d'impact. Ces essais ayant été menés sur un remblai de gravier de 50 cm d'épaisseur, les mesures ont pu être comparées aux enregistrements des séries 7, 8, 9, 16 et 17.

La figure 28 reprend les trois diagrammes de comparaison des efforts caractéristiques ainsi que les trois représentations différentes de la relation force-déplacement (à noter que les valeurs maximales des efforts et du déplacement utilisées dans ces graphes ont été modifiées : 800 kN et 25 mm, à comparer aux 400 kN et 4 mm des figures 22 à 27). De prime abord, on s'aperçoit que les tendances linéaires mises en évidence pour les faibles énergies d'impact ne sont plus du tout satisfaites pour les chocs plus importants. Cependant, on peut se demander si ces changements d'allure ne pourraient pas être liés à l'évolution de la rigidité de la dalle au cours du temps (vieillessement, fissuration, dégradation). Une analyse complémentaire (explicitée ci-après) a effectivement montré qu'en intégrant cette influence, l'interprétation des résultats expérimentaux devient plus aisée et les tendances mieux marquées.

L'analyse des neuf essais statiques de 20 tonnes réalisés durant les séries 30 et 31 a mis en évidence un certain endommagement de la dalle. On a notamment enregistré une réduction de la rigidité de 50 % entre le premier et le dernier essai ! Sur base de ces informations statiques, les mesures dynamiques des séries 30 et 31 ont été modifiées afin de pouvoir examiner les résultats indépendamment de l'évolution de la raideur de la dalle :

– les valeurs du déplacement central de la dalle ont été réduites proportionnellement à la diminution de rigidité statique ;

– les enregistrements de la réaction d'appui ont été augmentés proportionnellement à la racine carrée de l'accroissement de flexibilité. Notons que cette correction peut être justifiée de façon théorique (Tonello, 1988);

– l'effort intégré a subi une modification analogue à la réaction d'appui. Cependant, l'influence de la raideur de la dalle sur cet effort devra être vérifiée ultérieurement, notamment par la réalisation de quelques essais complémentaires appropriés ;

– l'effort par accélération n'a pas été modifié, car il dépend essentiellement des caractéristiques d'amortissement du matériau de remblai.

Les nouveaux graphiques ainsi obtenus sont repris à la figure 29. Bien que certains des points modifiés sortent du cadre des graphes, les échelles ont été choisies semblables à celles de la figure 28 afin d'en faciliter la comparaison. On constate tout d'abord que les points « corrigés » présentent une plus faible dispersion (surtout au niveau des déplacements), ce qui tend à confirmer que les modifications réalisées sont logiques et cohérentes. On note également que les résultats modifiés des séries 30 et 31 se disposent mieux dans le prolongement des mesures des séries précédentes.

Disposant d'un nombre raisonnable de points de mesure, une étude statistique a pu être envisagée. Pour chacune des six relations reprises à la figure 29, elle a consisté en la recherche de la loi de type puissance «  $Y = A X^B$  » qui colle le mieux aux résultats expérimentaux corrigés. Les coefficients A et B qui fournissent cette meilleure corrélation sont résumés au tableau V.

**TABEAU V Résultats de l'analyse statistique.**  
Results of the statistical analysis.

| Relation                                      | A       | B     | r     |
|-----------------------------------------------|---------|-------|-------|
| Effort intégré – Effort par accélération      | 1,980   | 0,959 | 0,951 |
| Effort intégré – Réaction d'appui             | 0,202   | 1,220 | 0,978 |
| Réaction d'appui – Effort par accélération    | 6,110   | 0,796 | 0,979 |
| Effort intégré – Déplacement central          | 72,394  | 0,968 | 0,939 |
| Effort par accélération – Déplacement central | 43,160  | 1,003 | 0,974 |
| Réaction d'appui – Déplacement central        | 117,295 | 0,819 | 0,979 |

Par ailleurs, des considérations théoriques simplifiées ont permis d'estimer que la réaction d'appui était reliée à l'effort par accélération via un exposant (5/6). Partant de cette information et des résultats statistiques du tableau V, des propositions de relations entre les trois efforts caractéristiques ont été avancées :

$$\text{Effort intégré} = \alpha \text{ Effort par accélération} \quad (2)$$

$$\text{Effort intégré} = \beta (\text{Réaction d'appui})^{6/5} \quad (3)$$

$$\text{Réaction d'appui} = \gamma (\text{Effort par accélération})^{5/6} \quad (4)$$

où les coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont fonction des caractéristiques de la couche d'amortissement.

Ces expressions établies pour le remblai de gravier

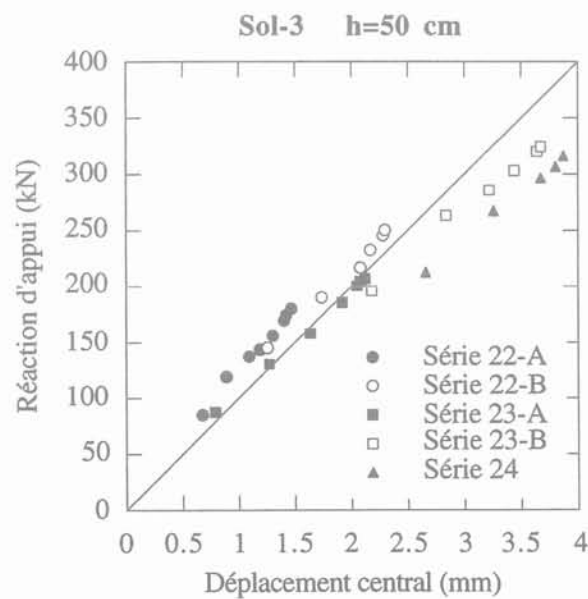
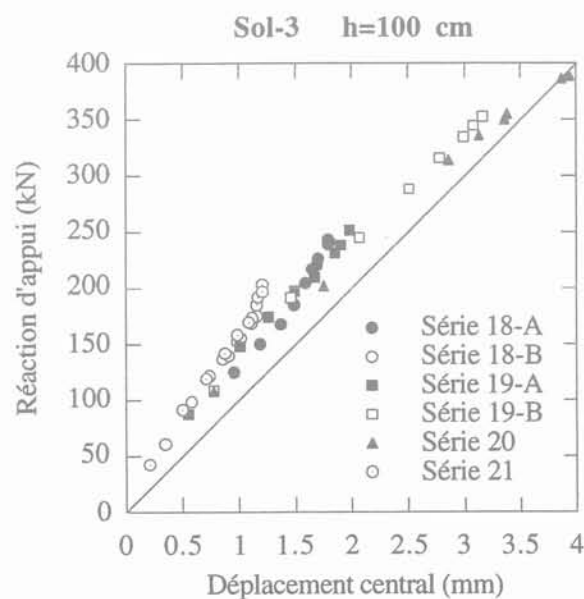
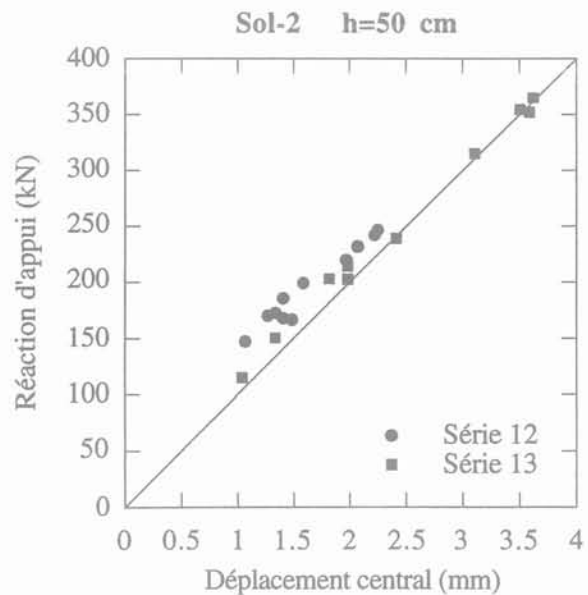
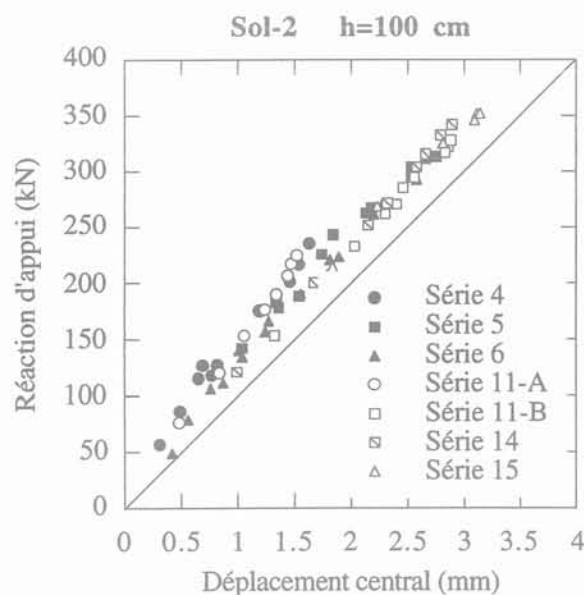
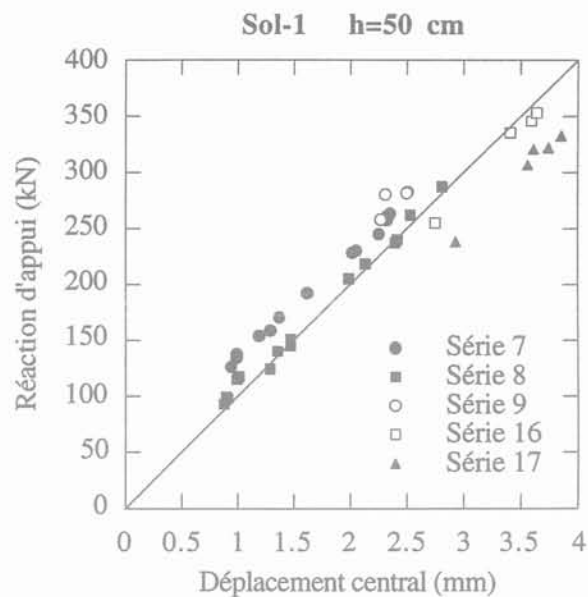
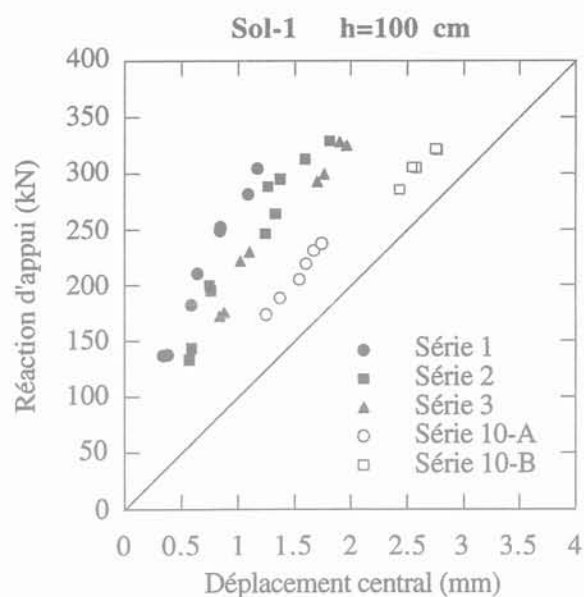


FIG. 25

Relation réaction d'appui-déplacement central de la dalle.

Relationship between total reaction force and central slab displacement.

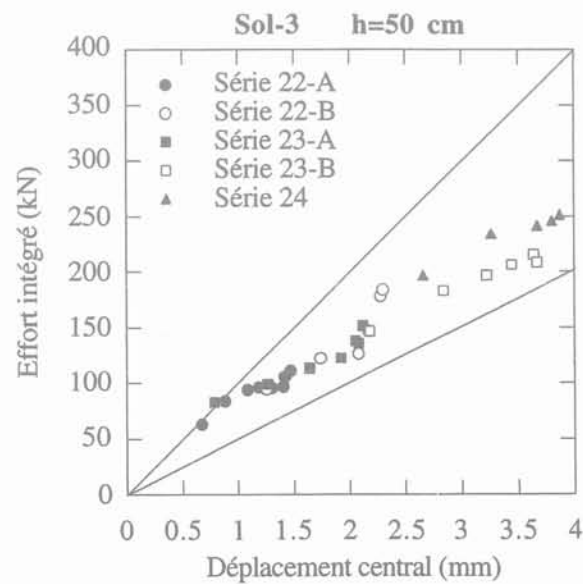
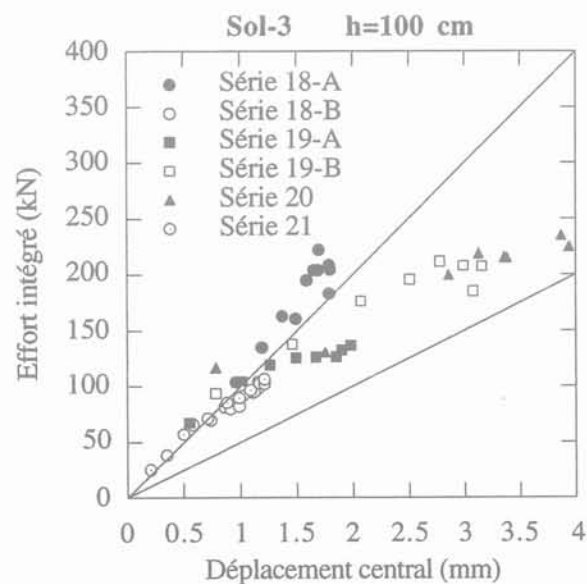
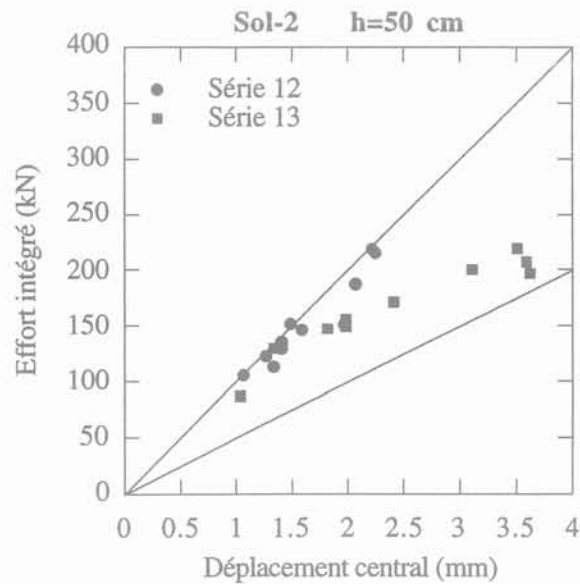
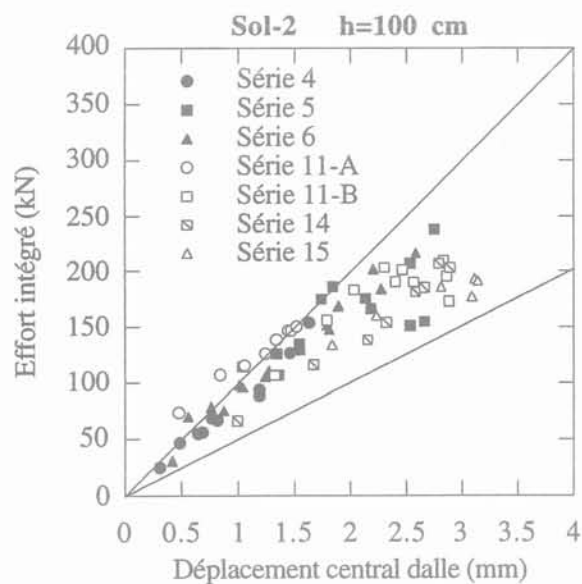
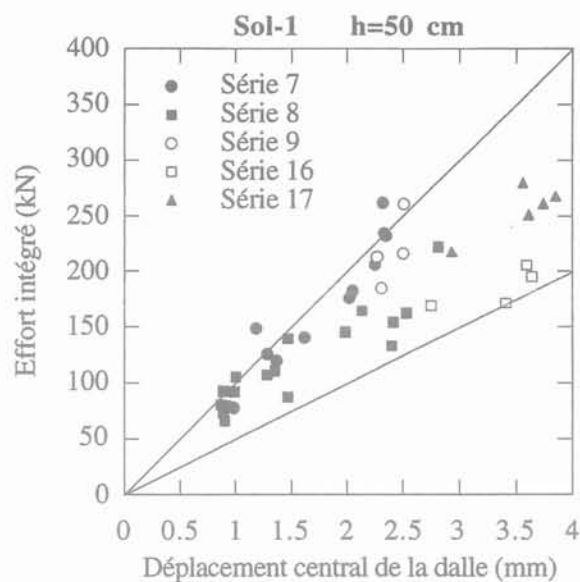
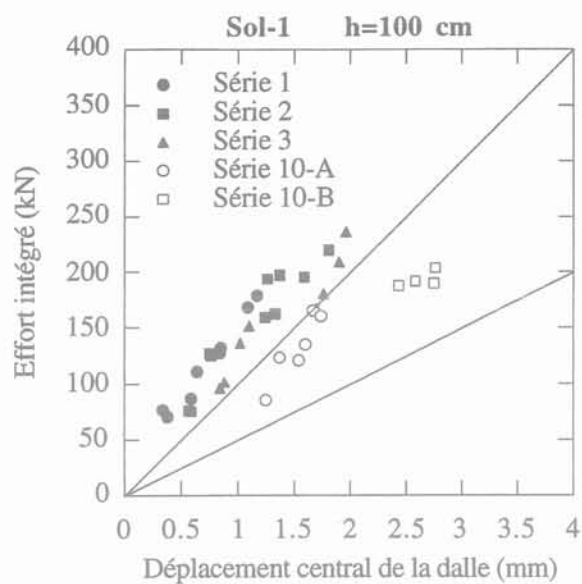


FIG. 26

Relation effort intégré-déplacement central de la dalle.

Relationship between integrated earth pressure and central slab displacement.

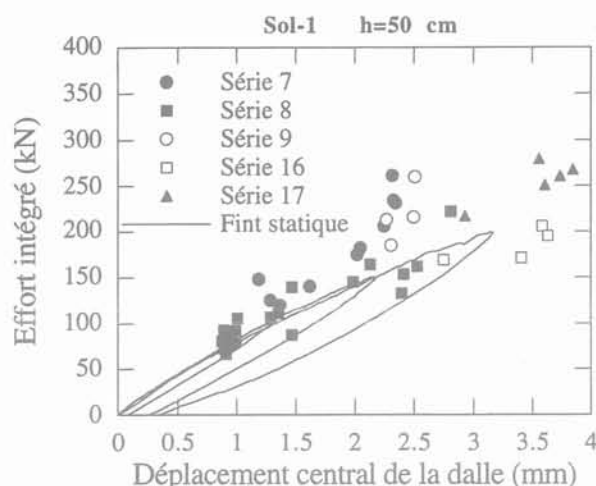


FIG. 27 Comparaison résultats dynamiques-courbes statiques.  
Comparison of dynamic results and static curves.

de 50 cm d'épaisseur devront faire l'objet d'une vérification et éventuellement d'une adaptation pour les autres types de sol et les autres épaisseurs de remblai.

#### 5.4

### Évaluation de l'effort par accélération

La connaissance de la valeur maximale de l'effort par accélération en fonction des caractéristiques de l'impact (masse du bloc, hauteur de chute, type et épaisseur de remblai) permettrait de déterminer l'amplitude de la sollicitation dynamique agissant sur le remblai et ensuite, via les relations vues précédemment, les valeurs maximales de l'effort intégré et de la réaction d'appui.

Sur la base de la théorie des chocs élastiques développée par Hertz (1881), il est possible d'exprimer la force de contact maximum lors de l'impact d'une sphère sur un milieu semi-infini (Japan Road Association, 1978; Heierli, 1984; Ishikawa, 1993). Cette formulation a été légèrement revue afin de tenir compte de la géométrie des blocs d'impact (non sphériques) et des données géotechniques disponibles (essais ME):

$$P_{\max} = 1,765 M_E^{2/5} R^{1/5} W^{3/5} H^{3/5} \quad (5)$$

avec:

|                            |                                                                                                                                           |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P_{\max}$ (kN)            | Effort maximal durant l'impact;                                                                                                           |
| $M_E$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Module de compressibilité du matériau d'amortissement obtenu par un essai à la plaque (ME) réalisé sur le remblai, en premier chargement; |
| $R$ (m)                    | Rayon de la partie du bloc en contact avec le sol lors de l'impact (≡ rayon du segment sphérique);                                        |
| $W$ (kN)                   | Poids du bloc d'impact;                                                                                                                   |
| $H$ (m)                    | Hauteur de chute.                                                                                                                         |

Cette expression appelle quelques commentaires:

- les exposants permettent de se faire une idée de l'importance relative des divers paramètres intervenant dans la formule;
- le poids du bloc  $W$  et la hauteur de chute  $H$  possédant le même exposant, cette équation pourrait être exprimée en fonction de l'énergie acquise par le bloc au moment de l'impact;
- l'épaisseur de la couche amortissante n'intervient pas dans l'équation. L'influence de ce paramètre doit être prise en compte par l'utilisation d'un facteur de correction correspondant à l'effort intégré mesuré au niveau de la dalle. Pour l'instant, ce facteur pourrait être de la forme  $(h_0/h)^{1/2}$  où  $h_0$  représente la hauteur de référence  $h_0 = 1,00$  m.

Les figures 30 et 31 représentent l'évolution de l'effort par accélération en fonction de la hauteur de chute pour les blocs de 500 et de 1 000 kg tombant sur un remblai de 50 cm de gravier (module de compressibilité moyen en charge de 3 200 kN/m<sup>2</sup> mesuré par des essais à la plaque de type ME). Y sont comparées les mesures de laboratoire et les évaluations théoriques. Ainsi que le confirment les coefficients de corrélation de 0,96 (500 kg) et de 0,95 (1 000 kg), la concordance expérience-calcul est très bonne.

#### 6

### Conclusions

Dans le cadre d'une étude suisse relative aux ouvrages de protection contre les chutes de pierres, le Laboratoire de Mécanique des Roches de l'EPFL a été mandaté pour mener une campagne expérimentale d'impacts de blocs rocheux sur une dalle en béton armé recouverte de matériaux amortissants. Au cours de ces essais, quatre paramètres essentiels intervenant dans le dimensionnement des galeries de protection ont été variés: la taille des blocs d'impact, la hauteur de chute, le type de matériau d'amortissement et l'épaisseur de la couche de remblai.

Lors des premières séries d'impacts, il est rapidement apparu que les résultats obtenus dépendaient non seulement des paramètres du choc, mais aussi du nombre d'essais réalisés précédemment dans la série (phénomène de compactage dynamique). Cette constatation nous a d'ailleurs conforté dans l'idée que l'étude scientifique de la capacité d'amortissement d'un matériau remblayé soumis à un impact exige des essais systématiques et très bien instrumentés.

Dans le même ordre d'idées, il a été constaté que la diminution de la rigidité de la dalle au cours de la campagne d'essais se traduisait par une évolution des grandeurs mesurées, même pour des séries de caractéristiques analogues. Dans ce sens, la réalisation d'essais statiques en parallèle avec les séries dynamiques s'est avérée très riche lors de l'interprétation des résultats. En effet, ces essais ont permis de quantifier l'évolution de la raideur de la dalle, et ont contribué de la sorte à connaître son influence sur les efforts et déplacements mesurés.

L'analyse des résultats a fait appel à la définition de trois efforts (Fig. 21): l'effort par accélération (≡ effort exercé par le bloc sur le remblai), l'effort intégré (≡ force résultante agissant au centre de la dalle) et la somme des réactions d'appuis. Les valeurs maximales

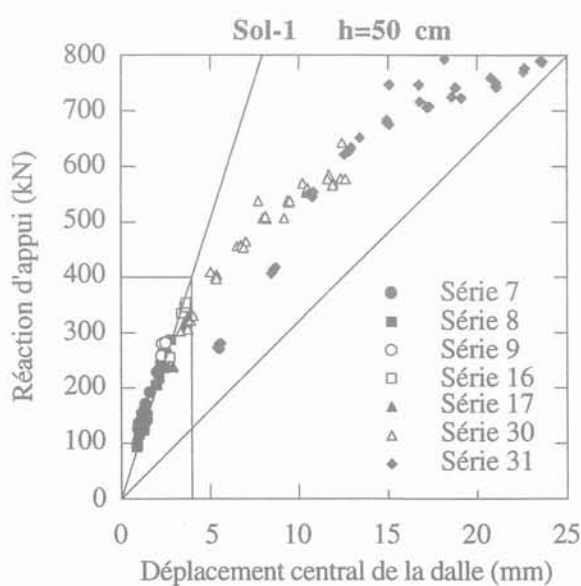
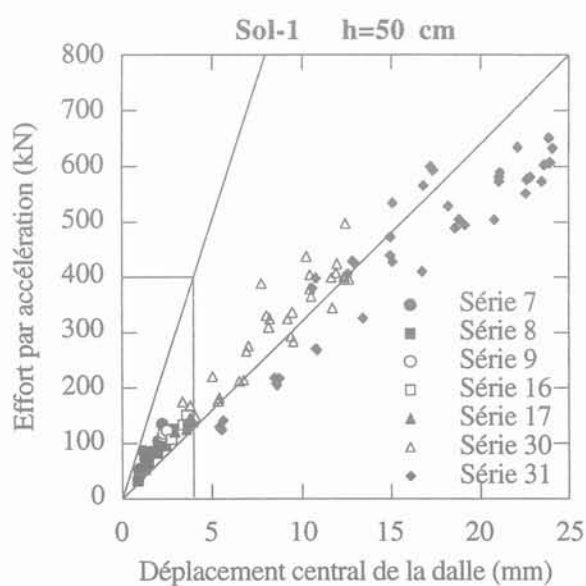
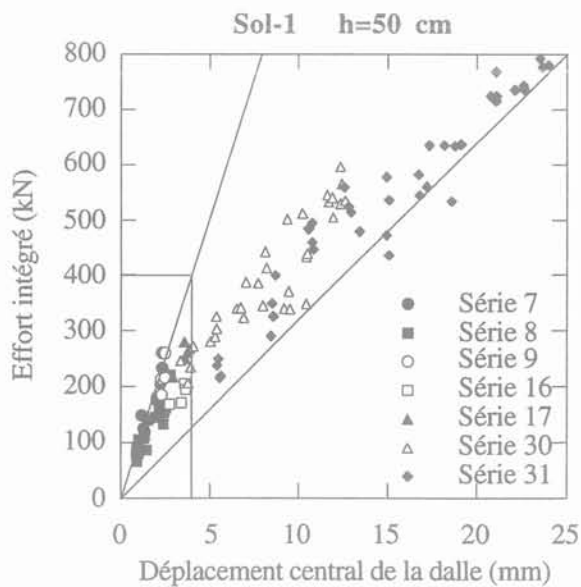
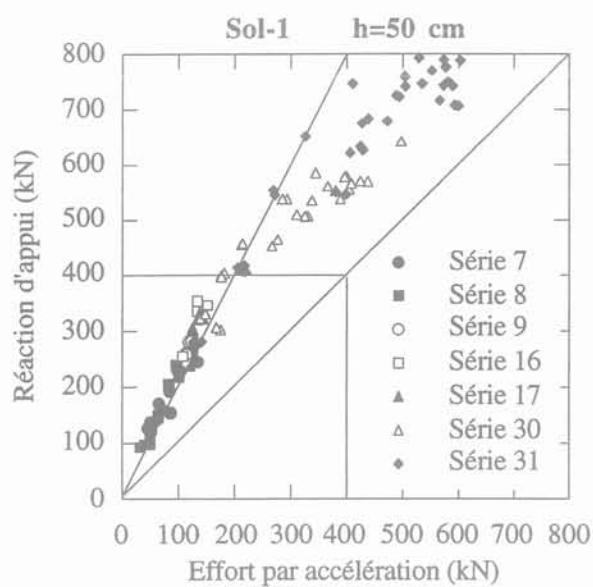
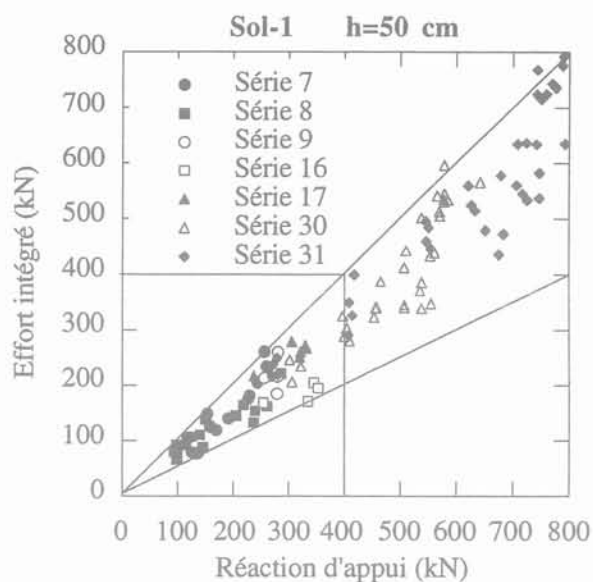
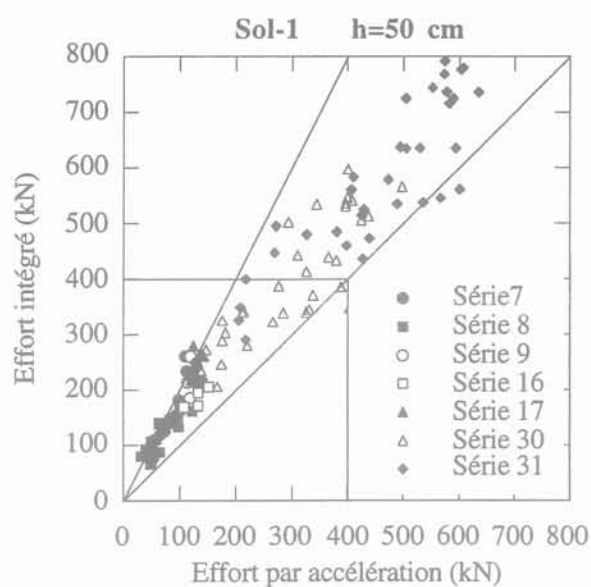


FIG. 28 Résultats des essais sur 50 cm de gravier.  
Test results for the 50 cm gravel cushion.

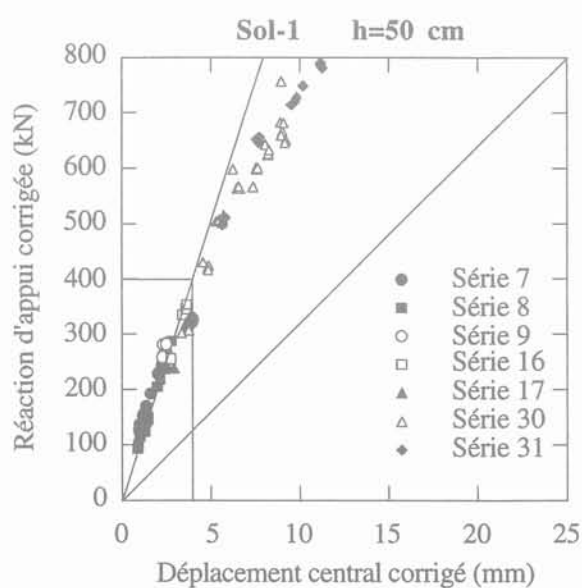
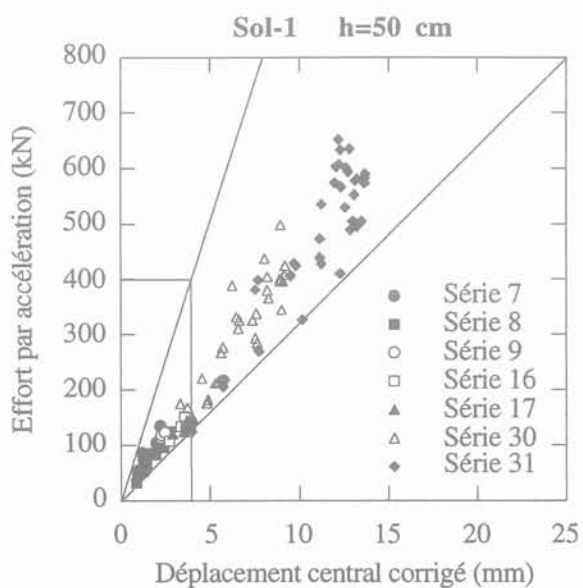
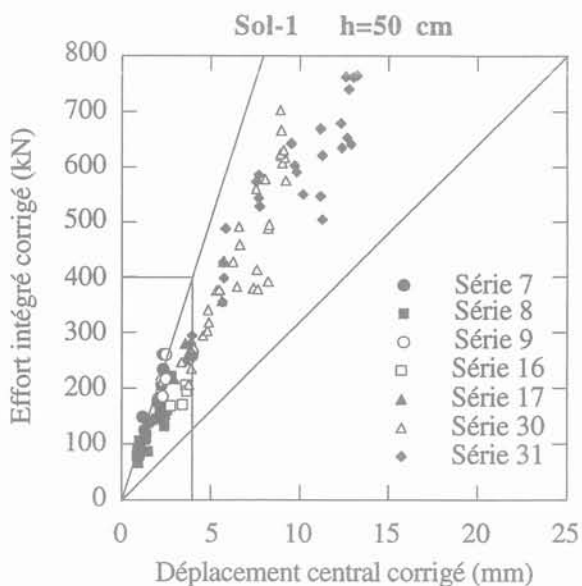
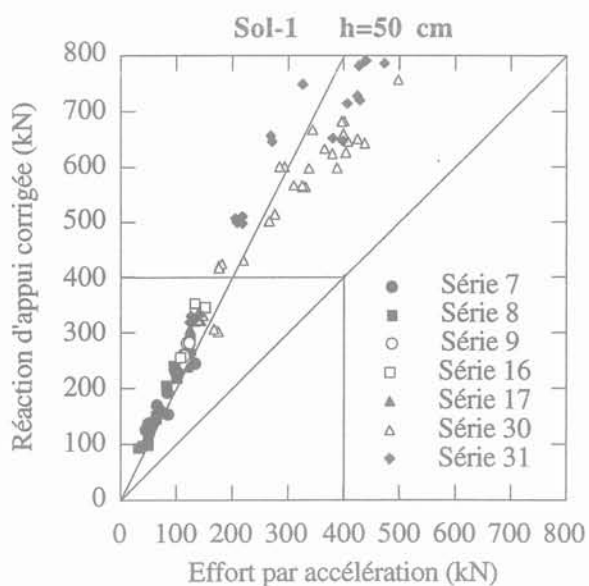
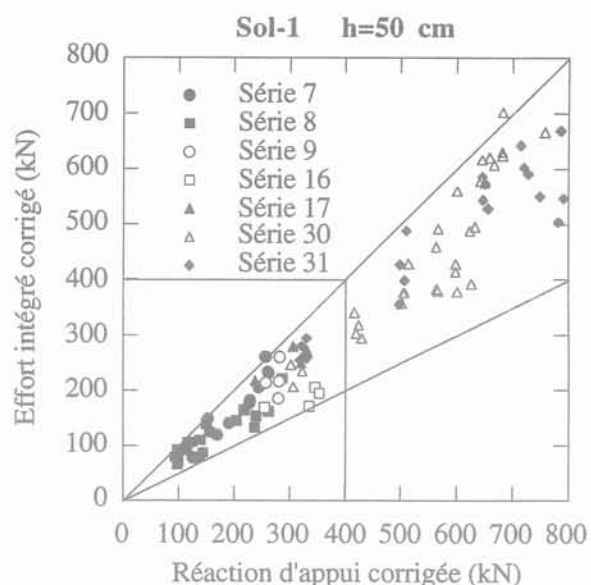
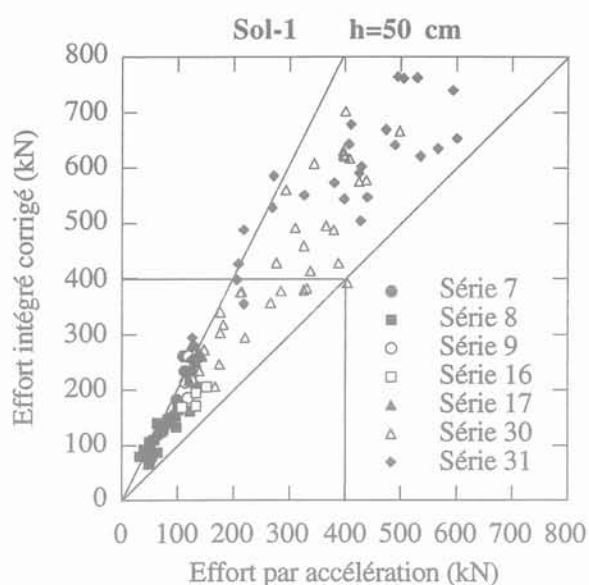
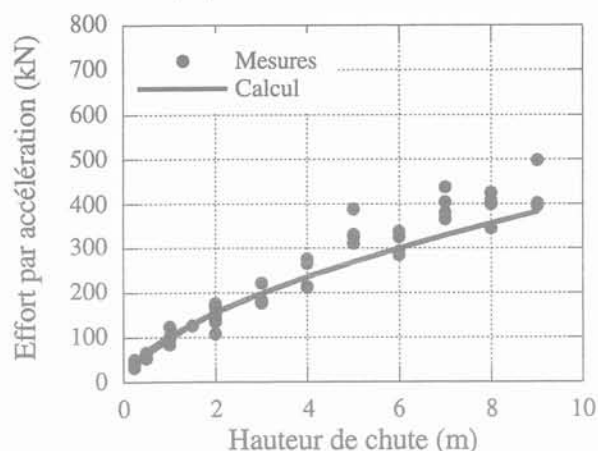


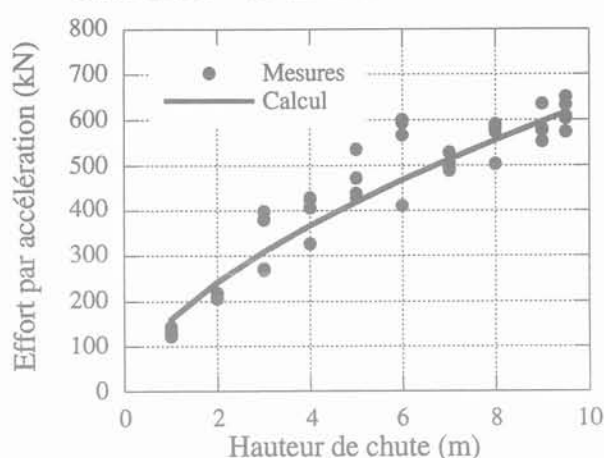
FIG. 29 Résultats « corrigés » des essais sur 50 cm de gravier.  
« Corrected » results for the 50 cm gravel cushion.

Séries 8,16,30 - 50 cm de sol 1 - bloc de 500 kg



**FIG. 30** Relation effort par accélération-hauteur de chute ; comparaison des mesures et du calcul pour le bloc de 500 kg.  
Relationship between the maximum impulsive force of weight and the falling height ; comparison of measures and calculation for the 500 kg block.

Séries 17, 31 - 50 cm de sol 1 - Bloc de 1000 kg



**FIG. 31** Relation effort par accélération-hauteur de chute ; comparaison des mesures et du calcul pour le bloc de 1000 kg.  
Relationship between the maximum impulsive force of weight and the falling height ; comparison of measures and calculation for the 1000 kg block.

de ces trois grandeurs caractéristiques ont été comparées et ensuite reliées par des expressions mathématiques. Les coefficients intervenant dans ces équations dépendent du type de sol utilisé et de l'épaisseur de remblai.

L'examen du déplacement central de la dalle en fonction des sollicitations dynamiques a mis en évidence une bonne corrélation entre d'une part les mesures dynamiques présentées dans un diagramme effort intégré-déplacement, et d'autre part les courbes force-déplacement issues des essais statiques. Il s'ensuit que l'effort intégré peut être utilisé pour ramener le problème du dimensionnement de la dalle soumise à un impact, au calcul plus aisé d'une structure sollicitée par un effort statique équivalent.

L'amplitude de la sollicitation dynamique agissant sur le remblai ( $\equiv$  effort par accélération) a été étudiée en fonction des caractéristiques de l'impact. Une très bonne concordance a ainsi été trouvée entre les mesures de laboratoire et une formulation théorique basée sur la théorie des chocs élastiques de Hertz.

En guise de remarque finale, il est important de garder à l'esprit que certains des résultats obtenus peuvent être liés aux spécificités de la campagne d'essais réalisée. Dans ce sens, des essais complémentaires sont en cours avec suppression de la dalle pour évaluer l'influence de la rigidité de la structure (remblai sur un fond rigide).

## Remerciements

Les travaux présentés dans cet article ont été rendus possibles grâce au support financier de l'Office Fédéral des Routes suisse (mandat de recherche n° 98/92) et l'aide scientifique du groupe de travail « Dimensionnement des galeries de protection contre les chutes de pierres ».

Les remerciements du premier auteur sont également adressés au Laboratoire de Mécanique des Roches de l'EPFL pour l'occasion qui lui a été donnée de collaborer à cette passionnante recherche.

- CFF-SBB – Protection des installations ferroviaires contre les effets de chutes de rochers, Symposium international de Kandersteg, Canton de Schwyz, Suisse, 10-12 septembre 1979.
- Descœudres F., Masuya H., Schmidhalter C.-A. – Étude expérimentale de la chute de blocs impactant une dalle en béton armé recouverte par des matériaux amortissants, Rapport n° 98/92 du Laboratoire de Mécanique des Roches de l'EPFL, Suisse, 1993.
- ENPC – Les paravalanches : ouvrages de protection contre les avalanches et les chutes de pierres, Journées d'études de Chambéry, France, 8-10 mars 1988.
- Heierli W. – Viadotto bosco di Bedrina n° 2, Steinschlag-Schutz : Verhalten von Kies-Sand-Dämpfungsschichten, Rapport n° 1296-3 pour le Dipartimento delle pubbliche costruzioni, Ufficio Strade Nazionali, Bellinzona, Canton du Tessin, Suisse, 1984.
- ICTS – Prove sperimentali dell'urto di una sfera di calcestruzzo su due tipi di ghiaia, Rapport du Laboratorio di Fisica Terrestre, Istituto Cantonale Tecnico Sperimentale, Lugano-Trevano, Canton du Tessin, Suisse, 1984.
- Ishikawa N. – Design method of rock sheds, Impact behavior and design of structures (en japonais), Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japon, 1993, pp. 153-248.
- Japan Road Association – Handbook of prevention against rock falls (en japonais), Tokyo, Japon, 1978, pp. 18-27.
- LFEM – Fallversuche an Elementen für Steinschlaggalerien, Rapport n° 24040 du Laboratoire Fédéral d'Essais des Matériaux, Dübendorf, Canton de Zurich, Suisse, 1966.
- Masuya H. – The evaluation of the impact load on rock shed by the falling rocks (en japonais), Thèse de doctorat, Department of Civil Engineering, Kanazawa University, Japon, 1989.
- Masuya H. – The state of the art concerning the impact problem by rock falls in Japan, Rapport interne du Laboratoire de Mécanique des Roches de l'EPFL, Suisse, 1993.
- Tonello J. – Généralités et approche de modèles simples, Les paravalanches : ouvrages de protection contre les avalanches et les chutes de pierres, Journées d'études de Chambéry, France, 1988.
- Yoshida H., Masuya H., Ihara T. – Experimental study of impulsive design load for rock sheds, Périodique de l'Association Internationale des Ponts et Charpentiers, vol. P-127/88, pp. 61-74, 1988.

## Thèse

### Identification et caractérisation mécanique de graveleux latéritiques du Sénégal : application au domaine routier

FALL-MEISSA

Thèse de l'INPL (Nancy) préparée à l'ENSG sous la direction de J.-P. Tisot

Les sols latéritiques compactés sont très largement employés comme remblais et matériaux de construction routière dans la plupart des pays tropicaux. Certaines caractéristiques techniques habituelles sont déjà bien connues et ont fait l'objet d'études antérieures. Le travail actuel porte sur l'examen plus détaillé du comportement mécanique de trois graveleux latéritiques du Sénégal occidental compactés à l'Optimum Proctor Modifié. Le travail a d'abord été consacré à une étude statistique sur une banque de données géotechniques. Cette étude a dégagé des généralités sur les latérites du Sénégal et a abouti à une analyse de données statistiques qui conclut par la proposition de nouvelles spécifications routières avec les graveleux latéritiques du Sénégal. L'étude des interconnexions simples et multiples avec le CBR (recherches de corrélations entre le CBR et les caractéristiques physiques d'identification) montre que le facteur de portance est

indépendant des autres caractéristiques. Une bonne évaluation de l'indice CBR passerait par une meilleure connaissance des qualités mécaniques de ces sols. Enfin dans une étude expérimentale on a utilisé trois sols latéritiques compactés à l'Optimum Proctor Modifié, et pour lesquels des essais triaxiaux CU ont été faits sous des sollicitations monotones et cycliques. Une évaluation préliminaire a été faite à la boîte de cisaillement de grande taille et a montré des pertes de caractéristiques mécaniques en passant de l'état non imbibé à l'état imbibé, selon les conditions de l'essai CBR. Le comportement des sols est différent selon que l'on est sous faibles contraintes (50 à 150 kPa) ou sous grandes contraintes (200 à 600 kPa), ce phénomène étant lié aux paramètres d'état initiaux. L'approche sous chargements répétés a montré que ces sols sont assez performants dans les conditions de variation de teneur en eau faible.