

# TECHNIQUES ET MÉTHODES

Évaluation de l'excavabilité  
à la pioche des matériaux  
granulaires traités avec  
un liant hydraulique à l'aide  
d'un essai de poinçonnement



guide technique



# **Évaluation de l'excavabilité à la pioche des matériaux granulaires traités avec un liant hydraulique à l'aide d'un essai de poinçonnement**

Septembre 2016



**TECHNIQUES ET MÉTHODES**

**Ce guide a été rédigé sous la direction de**

Thierry Sedran, Ifsttar  
Département matériaux et structures  
Laboratoire matériaux pour infrastructures de transport

**Ont participé à la rédaction de guide :**

Thierry Sedran, Ifsttar  
Éric Genesseeux, Ifsttar  
Michel Hardy, Engie Lab

Les informations contenues dans ce guide sont issues de deux thèses sur l'excavabilité des matériaux de tranchées traités aux liants hydrauliques, réalisées à l'Ifsttar, entre 2006 et 2015, par Caroline Morin [1] et Éric Genesseeux [2], en collaboration avec Engie.

**Ce guide a bénéficié des commentaires et remarques des personnes suivantes :**

Joseph Abdo, Cimbéton  
Jean-Marc Potier, SNBPE  
Sophie Jacob, Cerib  
François de Larrard, Lafarge Holcim  
Jean-Michel Torrenti, Ifsttar  
Emilie Druais, Engie Lab

**Comment citer cet ouvrage :**

Ifsttar et Engie, Évaluation de l'excavabilité à la pioche des matériaux granulaires traités avec un liant hydraulique à l'aide d'un essai de poinçonnement, Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2016, techniques et méthodes, GT13, 36 pages, ISBN 978-2-85782-719-1

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux - Ifsttar  
14-20, boulevard Newton - Cité Descartes - Champs-sur-Marne - 77447 Marne-la-Vallée cedex 2  
[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)

Les collections de l'Ifsttar  
techniques et méthodes - guide technique - réf. : GT13  
ISBN 978-2-85782-719-1 – ISSN 2492-5438

En application du code de la propriété intellectuelle, l'Ifsttar interdit toute reproduction intégrale ou partielle du présent ouvrage par quelque procédé que ce soit, sous réserve des exceptions légales.



Cet ouvrage est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution.  
Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.  
Les termes de cette licence sont accessibles à l'adresse :  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

# Sommaire

<b>Chapitre 1. Contexte et objet du guide</b> .....	5
1.1 Les matériaux traités aux liants hydrauliques, une solution pour le remplissage des tranchées pour les réseaux .....	5
1.2 Une nécessité : maintenir l'excavabilité des matériaux à la pioche .....	5
1.3 Un frein : pas de définition précise de l'excavabilité .....	6
1.4 Objet du guide .....	6
<b>Chapitre 2. Définition quantitative et évaluation de l'excavabilité</b> .....	7
2.1 Un critère pertinent : le volume de matériau excavé .....	7
2.2 Travail fourni par un coup de pioche .....	8
2.3 Le critère classique de la résistance à la compression n'est pas suffisant .....	8
2.4 Un modèle géométrique simple pour prédire le volume excavé .....	9
2.5 Un essai de poinçonnement pour prédire l'enfoncement de la pioche .....	10
<b>Chapitre 3. Réalisation de l'essai de poinçonnement</b> .....	13
3.1 Confection des éprouvettes .....	13
3.2 Réalisation de l'essai .....	16
3.3 Démoulage et nettoyage des moules .....	20
3.4 Traitement des données .....	20
3.5 Compte rendu d'essai .....	22
<b>Chapitre 4. Prise en compte de l'évolution à long terme des matériaux</b> .....	23
<b>Références</b> .....	25
<b>Annexes</b> .....	27
Détail du calcul de volume excavé par un coup de pioche .....	27
Dimensions des moules, fonds de moule et poinçon .....	28
Compte-rendu d'essai de poinçonnement .....	30
Abaque pour l'estimation de l'excavabilité d'un matériau .....	31
<b>Liste des figures</b> .....	33
<b>Fiche bibliographique</b> .....	35
<b>Publication data form</b> .....	36



# Chapitre 1.

## Contexte et objet du guide

Malgré l'existence de règles de l'art bien définies, décrites dans la norme NF P 98-331 et dans le guide technique Sétra-LCPC [3], les tranchées remblayées classiquement présentent encore, en proportion importante, une défaillance de comportement dans le temps, liée essentiellement à une insuffisance de compactage lors de leur remblayage. Ce phénomène est accentué en site urbain par deux facteurs qui complexifient les opérations de compactage : l'encombrement des sous-sols en milieu urbanisé (figure 1) et la multiplication des interventions qui conduit à réduire la largeur des tranchées.

Figure 1  
Encombrement du sous-sol urbain



Crédit photos : Engie

### 1.1 Les matériaux traités aux liants hydrauliques, une solution pour le remplissage des tranchées pour les réseaux

Des matériaux fluides de remblaiement dits autocompactants sont apparus dans le début des années 90. Ils constituent une réponse pertinente à la problématique de remplissage de tranchées pour les réseaux. Ils contiennent un liant hydraulique et se mettent en place par simple déversement, sous le seul effet de la gravité. Ils ne nécessitent ainsi aucun compactage et leur portance est assurée par la prise du liant qu'ils contiennent. Ces matériaux sont décrits en détail dans le dossier du Certu [4] ou le document de Cimbéton [5].

### 1.2 Une nécessité : maintenir l'excavabilité des matériaux à la pioche

La prise du liant se prolonge dans le temps et conduit à une augmentation des performances mécaniques du matériau. Cependant, les exploitants ont également la nécessité de pouvoir accéder rapidement à leurs réseaux, pour des opérations de maintenance ou de densification, par exemple.

Si dans un premier temps l'exploitant peut utiliser des moyens mécaniques d'excavation lourds, à l'approche du réseau il est souvent nécessaire de pouvoir intervenir manuellement pour éviter de l'endommager.

L'excavabilité du matériau autocompactant à la pioche est donc une propriété primordiale pour l'exploitant, afin de disposer d'une garantie d'accès à son ouvrage et de tout au long de sa vie.

### 1.3 Un frein : pas de définition précise de l'excavabilité

Même si la notion est intuitive, il n'existe pas dans la littérature technique de définition précise et quantitative de l'excavabilité.

Par ailleurs, l'excavabilité d'un matériau dépend fortement de l'énergie d'excavation utilisée. Or les systèmes de classification ou les critères empiriques d'excavabilité existants n'intègrent pas, ou mal, cette notion.

Enfin, la résistance à la compression est très généralement retenue pour évaluer l'excavabilité : dans le dossier du Certu [4] ou le document de Cimbéton [5], on suggère ainsi une résistance inférieure à 0,7 MPa pour une excavation facile et à 2 MPa pour une excavation moyennement facile. Or un tel essai est peu représentatif des phénomènes mis en jeu lors d'une excavation, et l'expérience montre qu'il ne permet pas de garantir l'excavabilité sur les chantiers. Le chapitre 2 confirme par ailleurs qu'un critère en résistance à la compression n'est ni nécessaire, ni suffisant pour évaluer l'excavabilité.

L'absence de critère fiable et pertinent constitue alors un frein à l'utilisation des matériaux autocompactants, puisqu'il devient difficile pour les opérateurs de réseaux de les prescrire, ou pour les fournisseurs de matériaux de justifier leur excavabilité.

Le présent guide a pour vocation de pallier ce manque.

### 1.4 Objet du guide

Sur la base des résultats issus de deux thèses, réalisées à l'Ifsttar, entre 2006 et 2015, par Caroline Morin [1] et Éric Genneveux [2], en collaboration avec Engie, le présent guide permet de :

- définir quantitativement des niveaux de facilité d'excavation à la pioche ;
- montrer qu'un essai de poinçonnement en laboratoire permet de décrire l'excavation d'un matériau, contrairement à un essai de résistance en compression ;
- préciser les conditions opératoires de cet essai ;
- fournir des critères à partir de cet essai pour statuer sur la facilité d'excavation à la pioche d'un matériau.



# Chapitre 2.

## Définition quantitative et évaluation de l'excavabilité

### 2.1 Un critère pertinent : le volume de matériau excavé

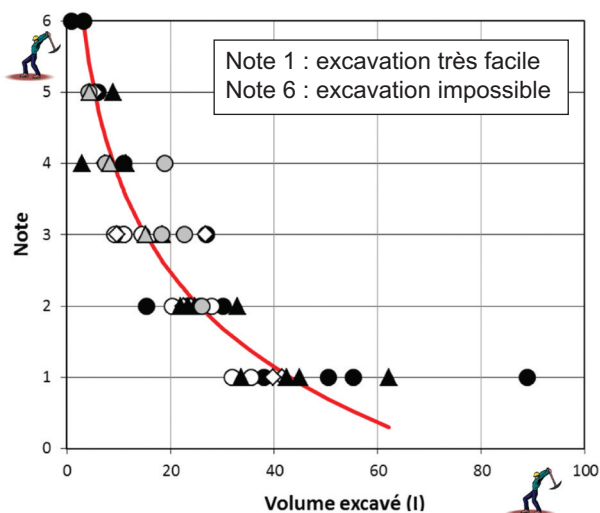
Avant même de chercher à évaluer l'excavabilité d'un matériau, il est nécessaire de définir quantitativement cette notion. Intuitivement, un matériau sera dit facilement excavable à la pioche si on peut décaisser la tranchée rapidement sans trop forcer. Un critère quantitatif de l'excavabilité est donc, par exemple, le volume de matériau excavé pour un nombre donné de coups de pioche.

On a demandé à un professionnel de noter « en aveugle » la difficulté ressentie en donnant 90 coups de pioche sur environ 60 matériaux différents (par leur âge ou leur formule) coulés en tranchées (figure 2). Les notes variaient de 1 pour une excavation perçue comme très facile, à 6 pour une excavation perçue comme impossible. En parallèle, les volumes excavés après 90 coups ont été mesurés et consignés, pour chacun des matériaux testés. On voit sur la figure 3 ci-dessous qu'il existe un lien direct entre la perception de la difficulté et le volume excavé : plus le volume excavé est important, plus l'excavation sera perçue comme facile.

Figure 2  
Piochage sur des tranchées, les panneaux de polystyrène latéraux permettant de ne pas perdre de matière par projection lors de l'impact de la pioche



Figure 3  
Relation entre volume excavé (pour 90 coups de pioche) et difficulté de piochage perçue



Ceci permet de définir quantitativement des classes de difficulté d'excavation comme indiqué dans le tableau 1. Par exemple, pour qu'un matériau soit classé « facile à excaver » le volume décaissé au bout de 90 coups de pioche doit être au minimum de 26 litres.

Ainsi pour évaluer l'excavabilité d'un matériau en laboratoire, on va chercher à déterminer indirectement le volume de matériau décaissé par 90 coups de pioche.

Tableau 1  
Définition des classes d'excavabilité.  $V_{\text{seuil}}$  volume minimal à atteindre

Niveau d'excavabilité	Note	$V_{\text{seuil}}$ à 90 coups de pioche (l)
Très facile	1	43
Facile	2	26
Moyenne	3	15
Difficile	4	9
Très difficile	5	5
Impossible à la main	6	3

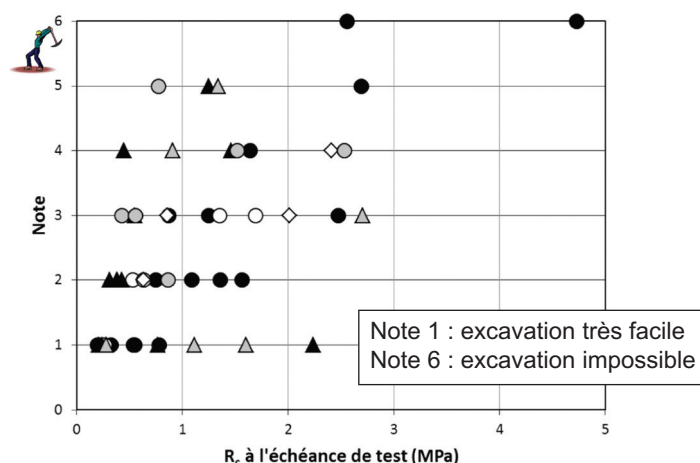
## 2.2 Travail fourni par un coup de pioche

Une caméra à haute vitesse (1000 images par seconde) a été utilisée pour filmer un professionnel lors de différentes interventions de piochage sur tranchées. On a pu ainsi mesurer la vitesse d'impact de la pioche et, à partir de sa géométrie et de sa masse, en déduire l'énergie cinétique transmise au matériau. Ces observations ont permis de montrer que le piocheur professionnel fournit un travail assez régulier de 340 J à chaque coup de pioche. C'est le travail de référence qui sera retenu dans le présent guide.

## 2.3 Le critère classique de la résistance à la compression n'est pas suffisant

Comme on peut le voir sur la figure 4, la résistance à la compression ne permet pas de décrire la facilité d'excavation à la pioche, comme classiquement suggéré dans le dossier du Certu [4] et le document de Cimbéton [5]. Ainsi on constate qu'une résistance à la compression inférieure à 0,7 MPa ne garantit pas une note de 2 (excavation facile) et à contrario certains matériaux de résistance supérieure à 0,7 MPa sont facilement excavables (note de 1 ou 2). Il est donc nécessaire d'utiliser un essai plus pertinent et décrivant mieux la physique du piochage.

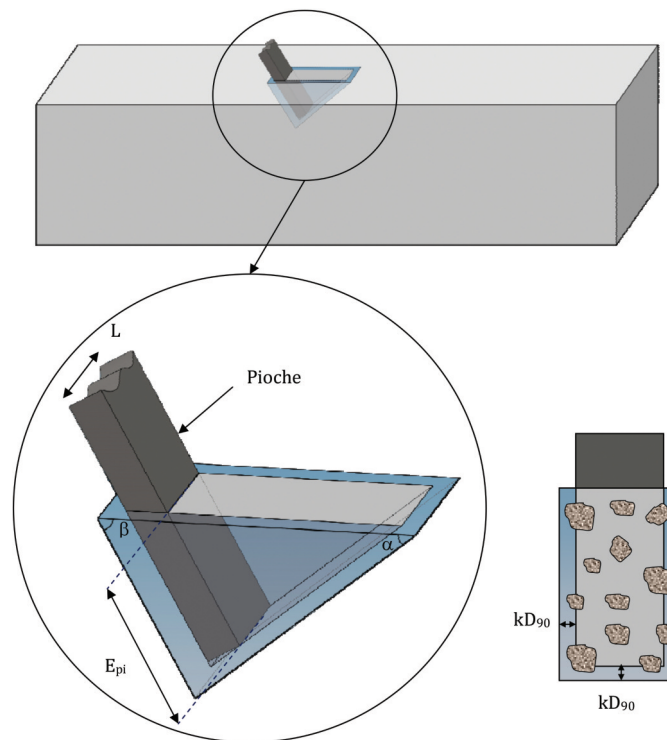
Figure 4  
Mauvaise relation entre la résistance à la compression  $R_c$  et l'excavabilité



## 2.4 Un modèle géométrique simple pour prédire le volume excavé

Il a été vérifié, au travers des deux thèses [1] et [2], et sur plus de 80 essais de piochage sur des tranchées remplies de matériaux traités aux liants hydrauliques, que le volume excavé à chaque coup de pioche peut être décrit par la somme des volumes gris et bleu schématisés sur le zoom de la figure 5. Le volume enveloppe bleu qui apparaît en surépaisseur, décrit l'effet d'engrènement lié à la présence des plus gros éléments du squelette granulaire, et permet à la pioche d'arracher un supplément de matériau. Plus le squelette est grossier, plus ce volume supplémentaire est important.

Figure 5  
Forme du volume du matériau excavé à chaque coup de pioche (à gauche)  
et schématisation de l'effet d'engrènement en coupe (à droite)



On déduit de ce modèle géométrique que le volume théorique arraché pour 90 coups de pioche est donné par l'équation 1. Le détail du calcul de cette équation est donné en annexe.

$$V_{\text{théo}} = 81 \cdot 10^{-6} (0,866 E_{\text{pi}} + 0,820 D_{90})^2 (L + 1,2 D_{90}) \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

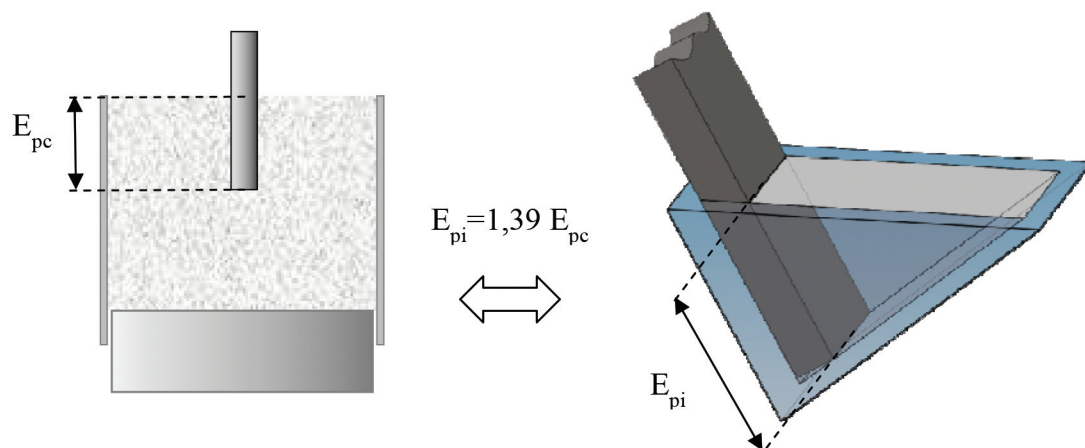
- $V_{\text{théo}}$  (en l) : volume excavé pour 90 coups de pioche.
- $E_{\text{pi}}$  (en mm) : enfoncement de la pioche.
- $D_{90}$  (en mm) : diamètre du tamis à travers lequel 90 % (en volume) du squelette complet du matériau (y compris les fines et les liants) passe. Plus le matériau est grossier plus cette valeur augmente.
- $L$  (en mm) : largeur de la tête de pioche. En général  $\approx 55$  mm.

La connaissance de l'enfoncement de la pioche  $E_{\text{pi}}$  et du diamètre  $D_{90}$  permet donc d'évaluer le volume excavé par la pioche. Si le diamètre peut être obtenu par la formule du matériau, il est nécessaire d'évaluer en laboratoire  $E_{\text{pi}}$

## 2.5 Un essai de poinçonnement pour prédire l'enfoncement de la pioche

Il a été démontré, sur plus de 80 formules de matériaux traités aux liants hydrauliques [1] et [2], que l'enfoncement d'un poinçon  $E_{pc}$  réalisé sur des éprouvettes confinées selon les conditions décrites dans le chapitre suivant, et développant le même travail qu'une pioche (soit 340 J), est égal, à un coefficient multiplicatif près, à l'enfoncement à la pioche  $E_{pi}$  (figure 6). On a ainsi  $E_{pi} = 1,39 E_{pc}$

Figure 6  
Équivalence entre enfoncement à la pioche ( $E_{pi}$ ) et l'enfoncement au poinçon ( $E_{pc}$ )



On peut donc déduire, de l'équation 1 et de l'essai de poinçonnement décrit dans le chapitre suivant, le volume de matériau excavé pour 90 coups de pioche, avec l'équation suivante :

$$V_{\text{théo}} = 81 \cdot 10^{-6} (1,204 E_{pc} + 0,820 D_{90})^2 (L + 1,2 D_{90}) \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

- $V_{\text{théo}}$  (en l) : volume théorique excavé pour 90 coups de pioche.
- $E_{pc}$  (en mm) : enfoncement au poinçon selon le protocole décrit ci-après.
- $D_{90}$  (en mm) : diamètre du tamis à travers lequel 90 % (en volume) du squelette complet du matériau (y compris les fines et les liants) passe. Plus le matériau est grossier plus cette valeur augmente.
- $L$  (en mm) : largeur de la tête de pioche. En général  $\approx 55$  mm.

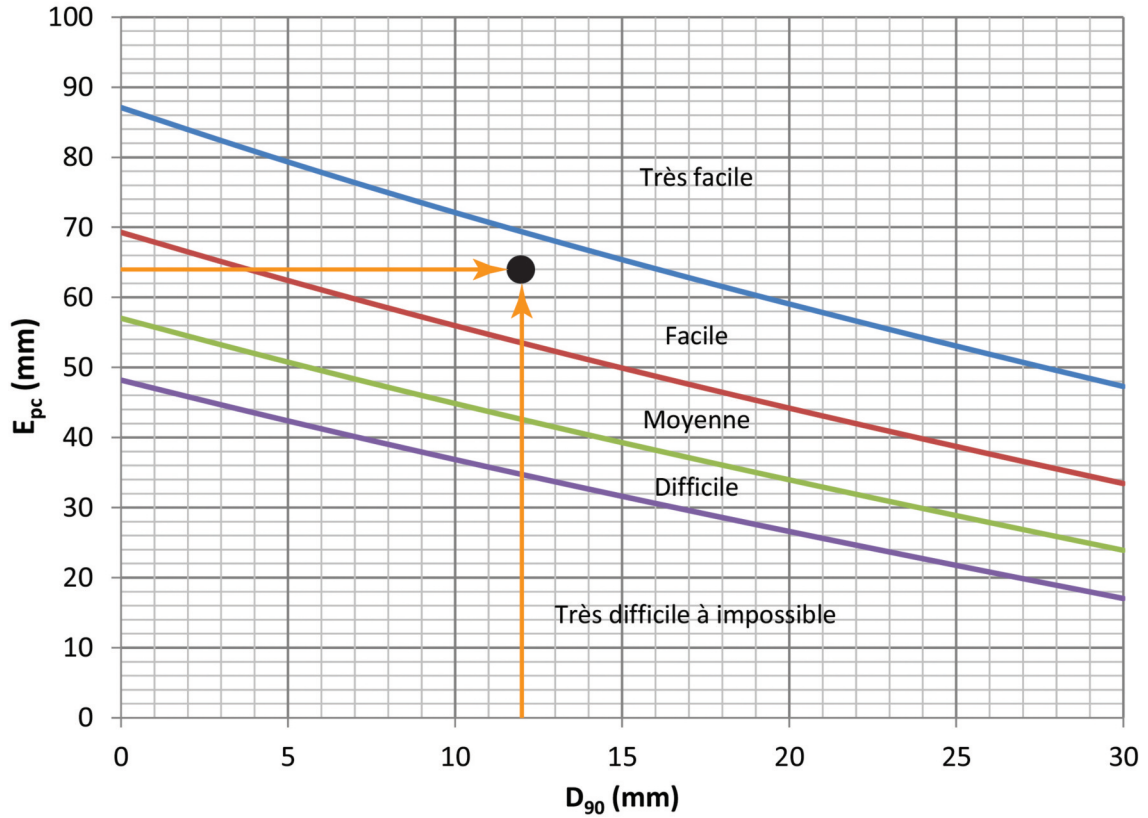
Ce modèle conduit à une erreur-type de 5,6 litres pour 90 coups de pioche. Pour garantir, à un niveau de confiance élevé ( $\approx 85$  %), qu'un matériau atteigne le niveau d'excavabilité visé, il est donc nécessaire de viser un volume théorique avec l'équation 2 qui soit inférieur de 5,6 litres au volume-seuil correspondant indiqué dans le tableau 1.

On construit ainsi l'abaque suivant (figure 7) qui permet d'évaluer en laboratoire l'excavabilité d'une formule, à une échéance donnée, en connaissant le  $D_{90}$  de la formule et l'enfoncement du poinçon  $E_{pc}$ , évalué à cette échéance selon le protocole d'essai décrit dans le chapitre suivant.

Figure 7

Abaque donnant l'excavabilité d'un matériau en fonction de son  $D_{90}$  et de l'enfoncement au poinçon ( $E_{pc}$ ) pour un travail de 340 J, pour une largeur de pioche de 55 mm

L'exemple montre qu'un matériau avec  $D_{90} = 12$  mm et un enfoncement de 62 mm est facilement excavable.





# Chapitre 3.

## Réalisation de l'essai de poinçonnement

### 3.1 Confection des éprouvettes

#### 3.1.1 Matériel nécessaire

Les éprouvettes doivent être coulées dans des moules en inox de dimensions  $\varnothing$  16 cm x 16 cm avec une paroi d'épaisseur minimale de 4 mm, afin d'assurer lors de l'essai de poinçonnement, un confinement représentatif de celui que subit le matériau dans sa masse, lors du piochage. Le fond de moule est en PVC. Il doit être amovible pour permettre le nettoyage du moule après essai. Ses dimensions sont ajustées pour qu'il assure une bonne étanchéité avec le moule et qu'il puisse être emboîté et déboîté, en le tapotant à l'aide d'un maillet (figure 8).

Les plans cotés des moules sont donnés en annexe.

Figure 8  
Moule métallique  $\varnothing$  16 cm x 16 cm et son fond en PVC



Figure 9  
Cône de l'appareil de Glanville, trappe inférieure ouverte

Lorsque le matériau à tester est autocompactant, le coulage est réalisé par l'intermédiaire d'un cône fixé sur une potence et muni d'une trappe pouvant s'ouvrir rapidement (figure 9).

Ceci permet d'avoir une mise en œuvre plus répétable. Les dimensions du cône sont celles du cône inférieur de l'appareil de Glanville (ou *compacting factor apparatus* de la norme BS 1881-103, 1970). Diamètre supérieur : 254 mm, diamètre inférieur : 127 mm, hauteur : 227 mm. Si un tel cône est difficilement disponible, il pourra être remplacé par un cylindre de diamètre intérieur de 127 mm.



### 3.1.2 Coulage

Figure 10  
Différentes étapes du coulage des éprouvettes





**Étape 1**

- Positionner le fond du moule en PVC sur le moule en acier Ø 16 cm x 16 cm (tapoter avec un maillet si nécessaire).
- Déposer un film plastique en fond de moule et enduire les parois du moule de produit de décoffrage pour faciliter le démoulage.
- Mesurer la masse à vide du moule M<sub>1</sub> (en kg).

**Étape 2**

- Positionner le moule en acier sous le cône en respectant une hauteur de chute de 20 cm (hauteur entre le bas du cône et le haut du moule en acier).
- Il est suggéré d'utiliser une tablette percée affleurant le sommet du moule pour limiter les projections de matériau sur le moule.
- Fermer la trappe du cône.

**Étape 3**

- Remplir le cône avec 3,5 litres de matériau, par simple versement à l'aide d'un seau.
- Le volume nécessaire est repéré au préalable par un trait dans le cône.

**Étape 4**

- Ouvrir la trappe rapidement et laisser tomber le matériau dans le cylindre.

**Étape 5**

- Enlever le surplus à la truelle en évitant au mieux tout tassement du matériau.
- Lisser délicatement la surface de l'éprouvette.

**Étape 6**

- Bien nettoyer l'extérieur du moule.
- Mesurer la masse du moule plein M<sub>2</sub> (en kg).
- En déduire la masse volumique en place du matériau M<sub>v</sub> (en kg/l) :

$$M_v = \frac{4000 (M_2 - M_1)}{\pi H D^2}$$

Avec H et D respectivement la hauteur et le diamètre intérieur du moule en cm. La masse volumique ainsi calculée peut être utilisée pour vérifier l'homogénéité des différents échantillons testés et le caractère autocompactant du matériau (par comparaison avec sa masse volumique théorique sans vide).

**Étape 7**

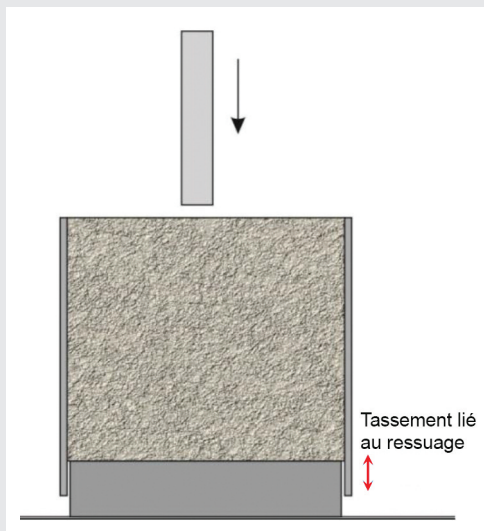
- Positionner l'éprouvette à plat et la fermer avec un capuchon en plastique.
- Conserver à 20 ± 2 °C jusqu'à l'échéance du test qui sera fixée par le prescripteur (voir le chapitre 4).

*Si le matériau n'est pas autocompactant, le mode de remplissage des moules doit être adapté pour être représentatif de la mise en œuvre de chantier.*

## 3.2 Réalisation de l'essai

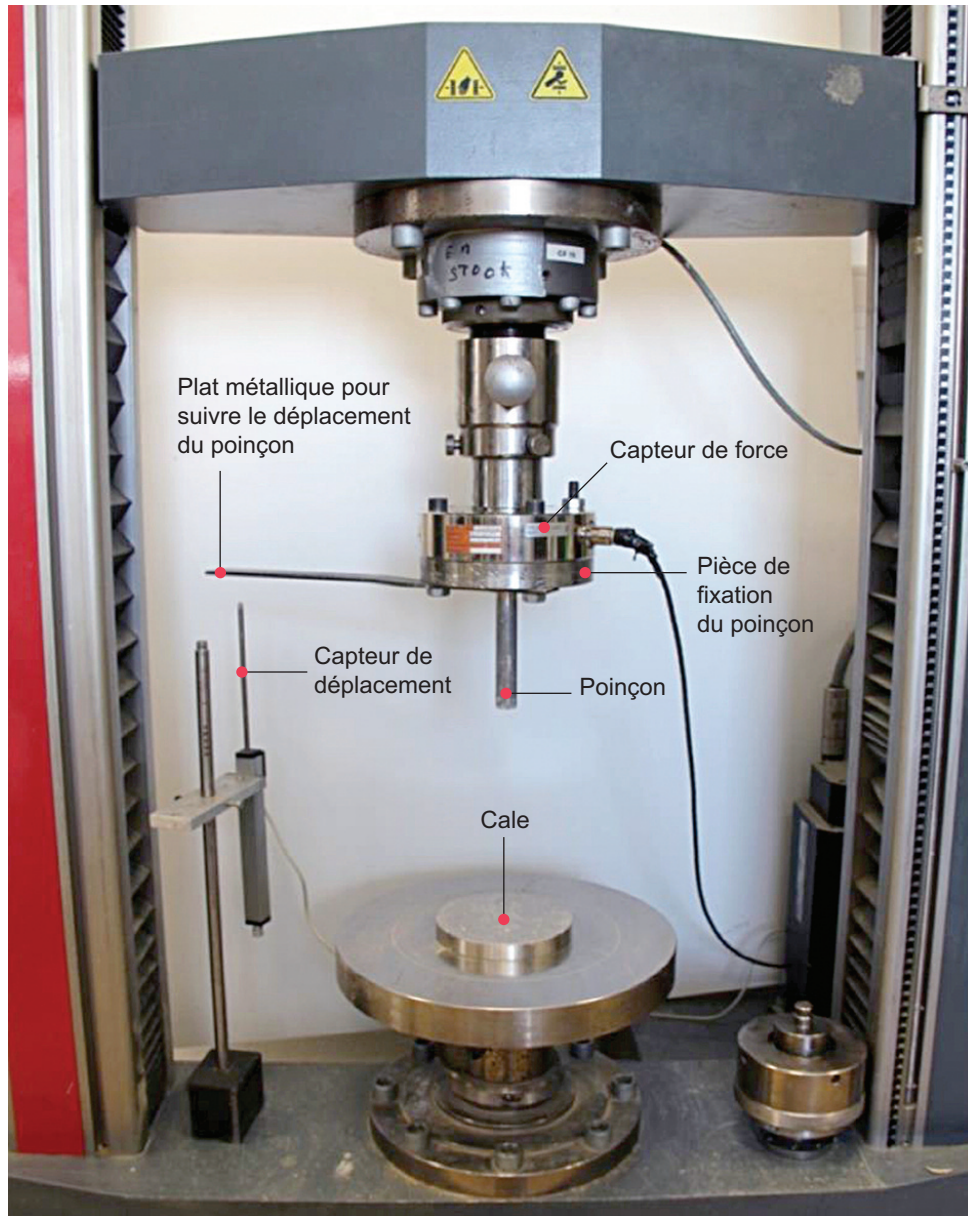
### 3.2.1 Matériel nécessaire

- Une presse mécanique de capacité minimale de 100 kN pilotée en déplacement (rampe minimale de 100 mm/min) (figure 11).
- Un capteur de force de capacité 100 kN (précision minimale :  $\pm 0,5 \%$ ).
- Un capteur de déplacement de 120 mm de course minimum (précision minimale :  $\pm 0,5 \%$ ) muni de son support.
- Un poinçon métallique à **bout plat** de 18 mm de diamètre et 10 cm de long en **acier dur de type 42CD4T** pour limiter les risque de flexion et d'attrition, à visser dans une pièce de fixation au capteur de force (voir un exemple de plan de poinçon en annexe).
- Un plat métallique rigide à fixer sur la pièce de fixation du poinçon. Ce plat permet de suivre le déplacement du poinçon en s'appuyant sur le capteur de déplacement.
- Une cale métallique circulaire d'au moins 2 cm d'épaisseur et de diamètre inférieur de 4 à 6 mm au diamètre intérieur des moules contenant les matériaux à tester.
- Un système d'acquisition permettant d'enregistrer à 20 Hz au minimum, le temps, le déplacement et la force. Le système doit afficher en temps réel l'effort et l'enfoncement du poinçon, et si possible le travail total exercé par le poinçon, à partir de sa mise en contact avec la surface du matériau (voir le chapitre 3.4).



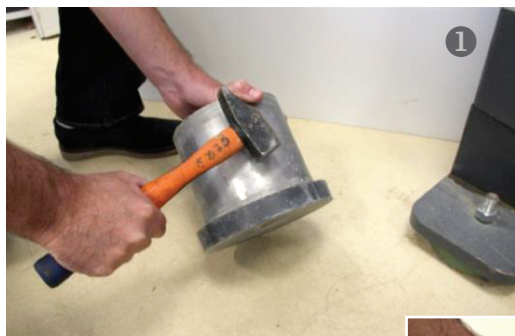
*Lors de la confection des éprouvettes, on observe parfois un tassement de la surface lié à du ressuage. Lorsque l'éprouvette est retournée pour réaliser l'essai, le matériau peut ne pas se trouver en contact avec le plateau inférieur de la presse ; l'échantillon s'appuie alors uniquement sur le bord du moule. Lors de l'enfoncement du poinçon, cela peut conduire à un glissement du matériau sur les parois du moule, faussant, dans ce cas, les mesures de poinçonnement. C'est pour cette raison qu'une cale métallique est utilisée.*

Figure 11  
Montage pour l'essai de poinçonnement



### 3.2.2 Protocole d'essai

Figure 12  
Différentes étapes du protocole d'essai



### Étape 1

- Enlever le fond du moule en PVC (tapoter avec un maillet si nécessaire).

### Étape 2

- Retirer le film plastique de la face moulée de l'échantillon.

### Étape 3

- Centrer la cale métallique sur le plateau inférieur de la presse.
- Mettre en place l'éprouvette sur la cale métallique, **face talochée vers le bas, donc face moulée vers le haut.**

Ainsi le poinçon sera centré sur l'échantillon.

### Étape 4

- Régler la hauteur du capteur de déplacement de telle sorte qu'il soit en contact avec le plat métallique lorsque le poinçon est environ à 5 mm au-dessus de la surface de l'échantillon.
- Faire le zéro du capteur de force lorsqu'il n'est pas en contact avec l'échantillon, si nécessaire.
- Lancer de façon simultanée :
  - Le déplacement du poinçon à une vitesse constante comprise entre 100 et 900 mm/min.
  - L'acquisition et l'enregistrement du temps, du déplacement et de la force à une fréquence minimale de 20 Hz.
- Arrêter l'essai dès qu'un des critères suivants est atteint :
  - Enfoncement du poinçon supérieur à 95 mm.
  - Effort appliqué sur le poinçon supérieur à 90 kN.
  - Travail supérieur ou égal à 400 J (si le système d'acquisition permet cet affichage en temps réel).

### Étape 5

Une fois l'essai terminé, remonter la traverse de la presse et tirer l'échantillon vers le bas pour dégager le poinçon. Il peut être nécessaire d'appliquer une rotation de l'éprouvette pour la dégager.

Nettoyer le poinçon et s'assurer qu'il n'est pas trop endommagé (rayures millimétriques, bout arrondi). Dans le cas contraire changer de poinçon.

### 3.3 Démoulage et nettoyage des moules

Le démoulage des échantillons peut être effectué à l'aide d'un marteau et d'un burin mais cela est fastidieux.

Il est plus rapide d'utiliser une presse, en poussant l'échantillon comme indiqué sur la figure 13 (l'orifice peut être remplacé par une rehausse sur laquelle la paroi du cylindre vient s'appuyer).

Nettoyer les moules à l'aide d'une brosse métallique, si nécessaire (figure 14).

Figure 13  
Démoulage des moules à l'aide d'une presse



Figure 14  
Nettoyage des moules à l'aide d'une brosse métallique, si nécessaire



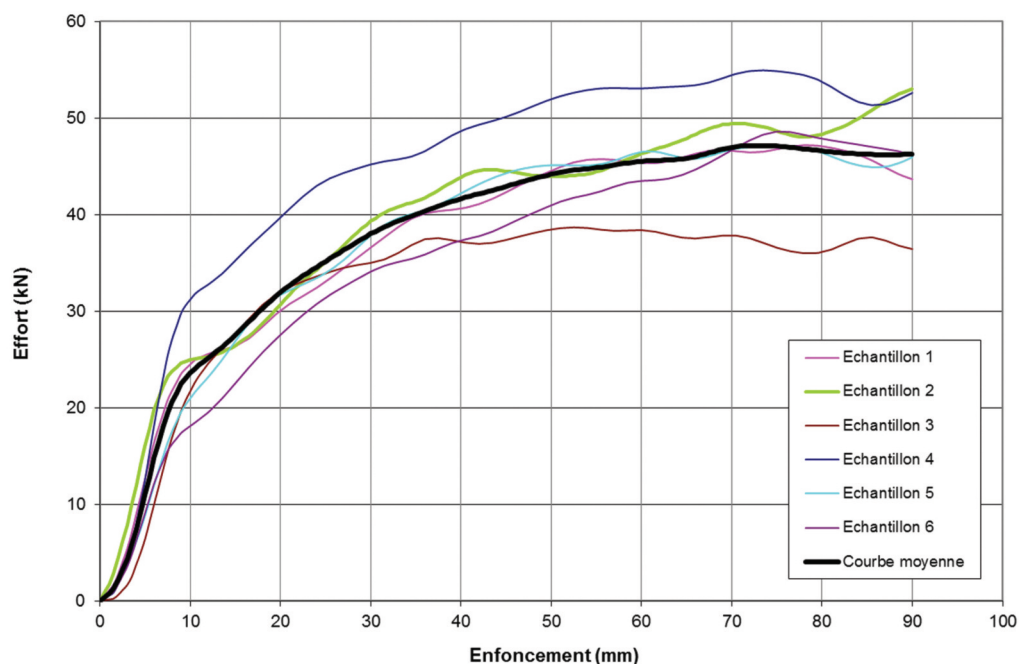
### 3.4 Traitement des données

À l'aide d'un tableur ou d'un outil intégré au système d'acquisition, calculer le travail (en Joules) exercé par le poinçon en calculant l'intégrale sous la courbe « effort en kN en fonction de l'enfoncement en mm » (figure 15).

Pour caractériser un matériau, il est nécessaire de répéter l'essai sur **6 échantillons différents**. Un même échantillon ne peut pas servir à faire deux essais de poinçonnement car dans ce cas les conditions de confinement sont perturbées.

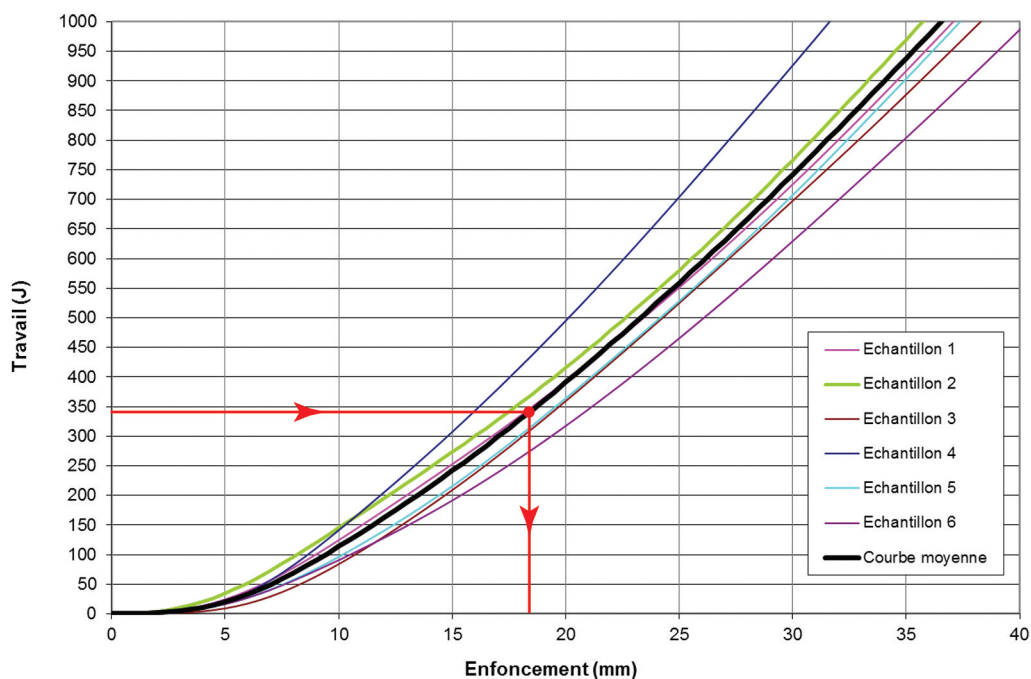
La figure 15 donne un exemple des courbes « effort en fonction de l'enfoncement » obtenues pour un même matériau (6 échantillons). Pour chaque courbe, le zéro du déplacement est défini par le moment où le poinçon entre en contact avec le matériau, c'est-à-dire quand le travail devient non nul.

Figure 15  
Ensemble des 6 courbes « effort en fonction de l'enfoncement » pour un matériau donné et détermination de la courbe moyenne du matériau



Compiler l'ensemble des courbes « travail en fonction du déplacement » sur un même graphe. La courbe moyenne de travail est calculée point par point en faisant la moyenne des enfoncements pour un travail donné (figure 16).

Figure 16  
Ensemble des 6 courbes « travail en fonction de l'enfoncement » pour un matériau donné et détermination de la courbe moyenne du matériau



Lire l'enfoncement moyen correspondant à un travail de 340 J sur cette courbe moyenne.

Si la valeur de travail de 340 J n'est pas atteinte pour un enfoncement de 95 mm, le matériau est très facile à excaver.

Si l'enfoncement est inférieur à 10 mm pour un effort de 90 kN alors le matériau est considéré impossible à excaver.

Sur la figure 16, l'enfoncement à 340 J est de 18 mm. Ceci correspond, d'après la figure 7, à une excavabilité « très difficile à impossible » pour un matériau avec un  $D_{90} = 16$  mm.

### 3.5 Compte rendu d'essai

Le compte-rendu d'essai doit obligatoirement faire apparaître :

- Les références de la formule étudiée.
- La date de l'essai et l'âge des éprouvettes au moment de l'essai.
- La masse volumique des éprouvettes à la fabrication ainsi que la valeur moyenne.
- La valeur du  $D_{90}$  de la formule. Pour rappel cette valeur est le diamètre du tamis à travers lequel 90 % (en volume) du squelette complet du matériau (y compris les fines et les liants) passe. Plus le matériau est grossier plus cette valeur augmente. La granulométrie du squelette est calculée en faisant la moyenne des granulométries des différents composants pondérées par la proportion volumique de chaque constituant dans le mélange :

$$P(d) = \sum_i v_i P_i(d)$$

Avec :

- $P(d)$ , pourcentage de passant du squelette au diamètre  $d$ .
- $V_i$ , pourcentage volumique du constituant  $i$ .
- $P_i(d)$ , pourcentage de passant du constituant  $i$  au diamètre  $d$ .
- Les courbes de travail (figure 16).
- La valeur d'enfoncement  $E_{pc}$  à 340 J pour chaque éprouvette et la valeur pour la courbe moyenne.
- La qualification du matériau suivant l'abaque de la figure 7. À noter que si la valeur de 340 J n'est pas atteinte pour un enfoncement de 95 mm, le matériau est qualifié de très facile à excaver. De même si l'enfoncement est inférieur à 10 mm pour un effort de 90 kN alors le matériau est qualifié d'impossible à excaver.

Il peut être intéressant de faire également apparaître sur le compte rendu la résistance à la compression du matériau. Celle-ci est déterminée selon la norme NF EN 12390-3 sur 3 cylindres  $\varnothing 16$  cm x 32 cm coulés à l'aide de l'appareil de Glanville (voir chapitre 3.1). Toutefois étant donnée la faiblesse des matériaux, il est difficile de procéder à un surfacage au soufre ou par rodage. On surface en conséquence les éprouvettes à l'aide de 2 feuilles de carton dense de 2 mm d'épaisseur et de densité supérieure à 1230 kg/m<sup>3</sup> [2].

Un exemple de compte-rendu d'essai est donné en annexe.



# Chapitre 4.

## Prise en compte de l'évolution à long terme des matériaux

L'excavabilité d'un matériau à l'âge « t » est évalué par l'essai de poinçonnement au même terme.

Ce qui intéresse en général un gestionnaire de réseau c'est l'excavabilité à long terme, puisque les interventions sur tranchées ont en général lieu au bout de quelques mois voire quelques années, après le remplissage des tranchées. Dans la mesure du possible il est donc souhaitable que le matériau soit testé à longue échéance. Or il est difficile au stade de l'étude de laboratoire de faire des essais au-delà de quelques mois.

Des essais préliminaires [2] semblent montrer que pour un liant à base de clinker et éventuellement de filler calcaire, on a :

- $E_{pc}(1 \text{ an}) \approx E_{pc}(28 \text{ jours}) / 1,4$
- $E_{pc}(10 \text{ ans}) \approx E_{pc}(28 \text{ jours}) / 1,6$
- $E_{pc}(20 \text{ ans}) \approx E_{pc}(28 \text{ jours}) / 1,7$

Pour de tels liants, un essai de poinçonnement à 28 jours pourrait ainsi permettre d'estimer l'excavabilité d'un matériau à 1, 10 et 20 ans. Ces relations sont toutefois à confirmer et il reste préférable, quand cela est possible, de faire des mesures à des échéances importantes, notamment pour des liants lents (CEM III, CEM V, liants hydrauliques routiers, etc.).



# Références

- [1] MORIN C., *Étude de l'excavabilité des matériaux traités aux liants hydrauliques*, thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie-Curie de Paris, **2009**.
- [2] GENNESSEUX É., *Excavabilité et formulation des matériaux traités aux liants hydrauliques pour tranchées*, thèse de doctorat de l'École centrale de Nantes, sous le label de L'Unam, **2015**.
- [3] *Remblayage des tranchées et réfection des chaussées*, guide technique Sétra-LCPC, 80 p., **1994**.
- [4] BONNET G., GALVADA A., et QUIBEL A., *Remblayage des tranchées : utilisation de matériaux autocompactants*. États des connaissances. Dossier du Certu n° 78, 36 p., **1998**.
- [5] *Remblayage des tranchées. Les matériaux autocompactants à base de ciment*, collection technique Cimbéton n° T 62, 15 p., **2002**.

## Normes

NF P 98-331, norme française, *chaussées et dépendances - tranchées : ouverture, remblayage, réfection*, éd. Afnor, février **2005**.

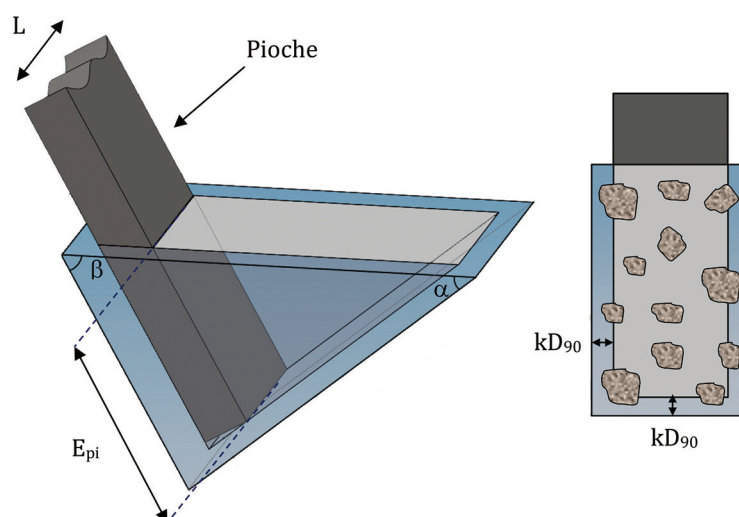
BS 1881-103, norme anglaise abrogée, *Testing concrete. Method for determination of compacting factor*, **1983**.

NF EN 12390-3, norme française, *essais pour béton durci - partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes*, éd. Afnor, avril **2012**.



# Annexes

## Détails du calcul du volume excavé par un coup de pioche [2]



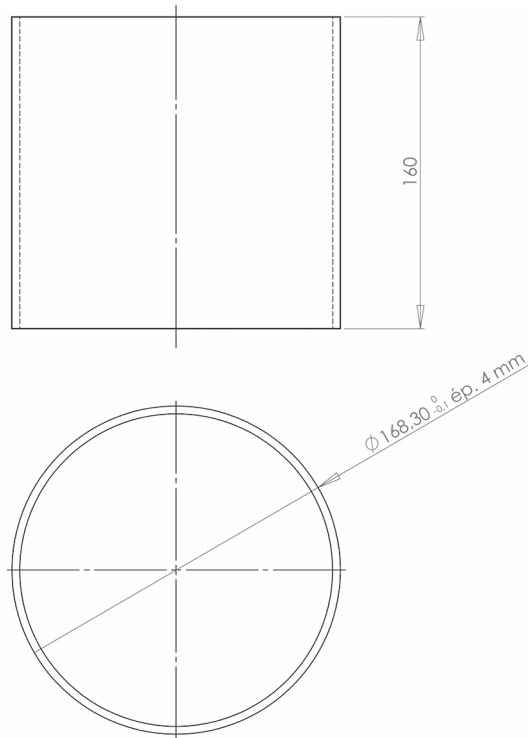
Le volume théorique arraché à chaque coup de pioche est ainsi donné par l'équation suivante, avec les données du tableau.

$$V_{\text{théo}} = \frac{10^{-6}}{2} \left[ E_{\text{pi}} \sin(\beta) + k D_{90} (\sin(\beta) + \cos(\beta)) \right]^2 \left[ \frac{1}{\tan(\beta)} + \frac{1}{\tan(\alpha)} \right] (L + 2k D_{90})$$

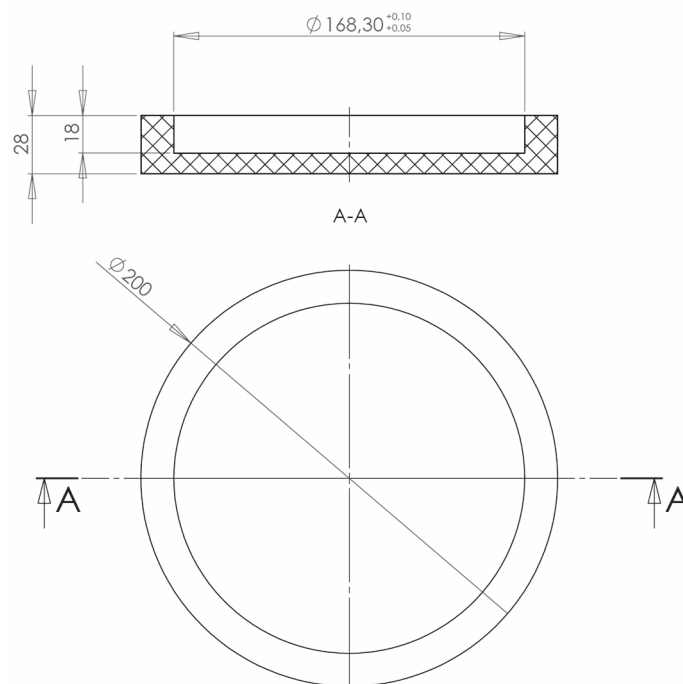
Paramètre	Signification	Valeur	Unité
$V_{\text{théo}}$	Volume excavé à chaque coup de pioche	-	l
$E_{\text{pi}}$	Profondeur d'enfoncement de la pioche dans le matériau	-	mm
$D_{90}$	Diamètre du tamis à travers lequel 90 % (en volume) du squelette complet du matériau (y compris les fines et les liants) passe. Plus le matériau est grossier plus cette valeur augmente	-	mm
$\beta$	Angle d'attaque de la pioche	60	degré
$\alpha$	Angle déterminé par analyse limite $\alpha = 90 - \frac{(\beta + \varphi)}{2}$ avec $\varphi$ angle de frottement interne du matériau estimé à $41,5^\circ$ (valeur moyenne observée sur les matériaux étudiés dans [1] et [2])	39,25	degré
$k$	Paramètre calibré pour prendre en compte l'effet d'engrènement	0,6	sans
$L$	Largeur de la tête de pioche	$\approx 55$	mm

## Dimensions des moules, des fonds de moules et poinçon

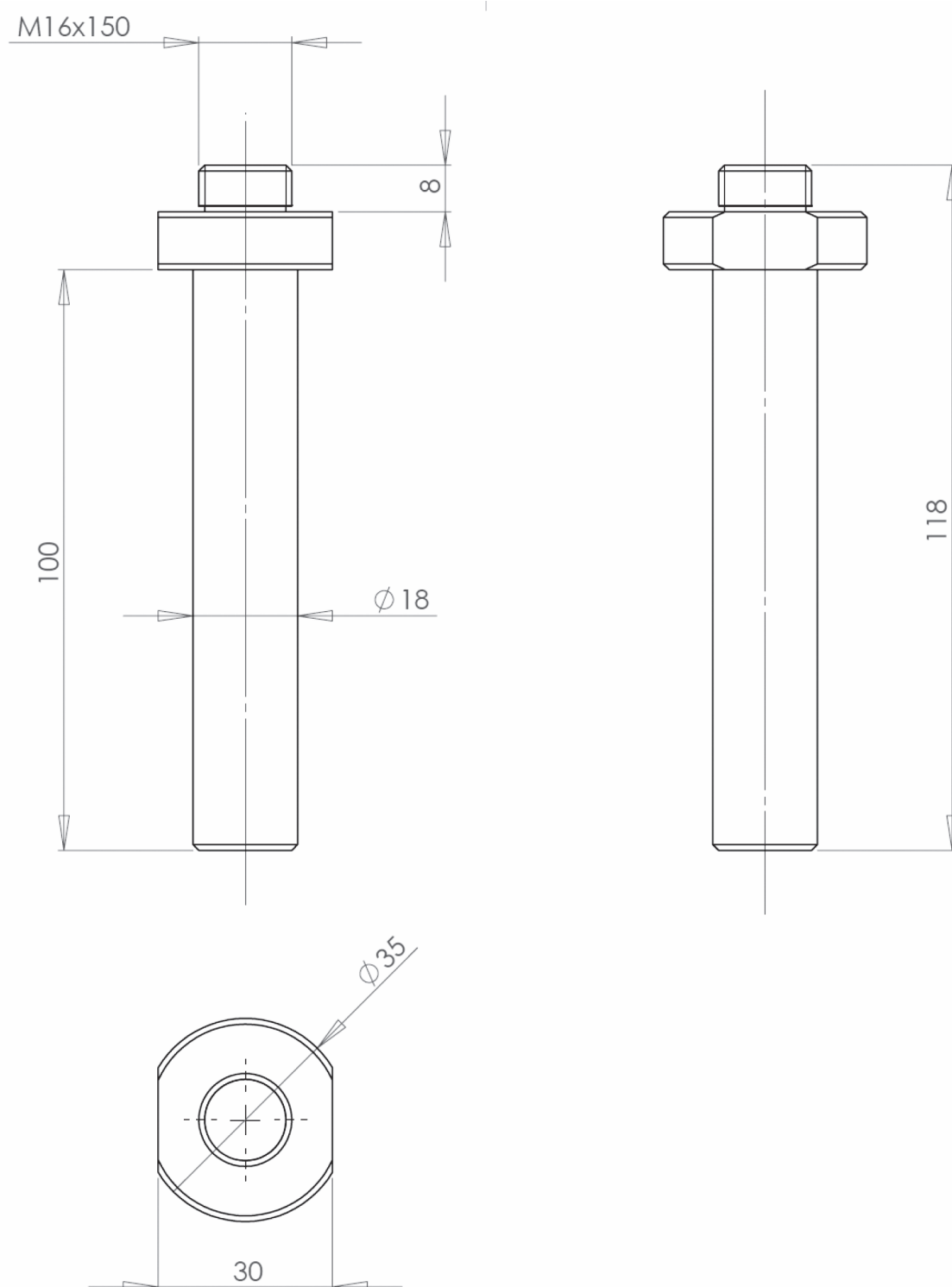
### Plan des moules en Inox



### Plan des fonds de moules en PVC



**Exemple de plan du poinçon en 42CD4T, à adapter en fonction du système de fixation au capteur de force**



## Compte rendu d'essai de poinçonnement

### Caractérisation de l'excavabilité d'un matériau suivant la méthode du poinçonnement

Référence de la formule	
D <sub>90</sub> (mm)	

Date des essais de poinçonnement	
Age des éprouvettes lors des essais (jours)	

Eprouvette	Masse volumique à la fabrication (kg/m <sup>3</sup> )	Enfoncement (mm) à 340 J
<b>Moyenne</b>		

- Travail de 340 J non atteint pour un enfoncement de 95 mm  
 Enfoncement de 10 mm non atteint pour un effort de 90 kN

#### Qualification de l'excavabilité du matériau

- Très facile  
 Facile  
 Moyenne  
 Très difficile à impossible

#### Résistance à la compression (à titre informatif)

Date des essais	
Age des éprouvettes (jours)	

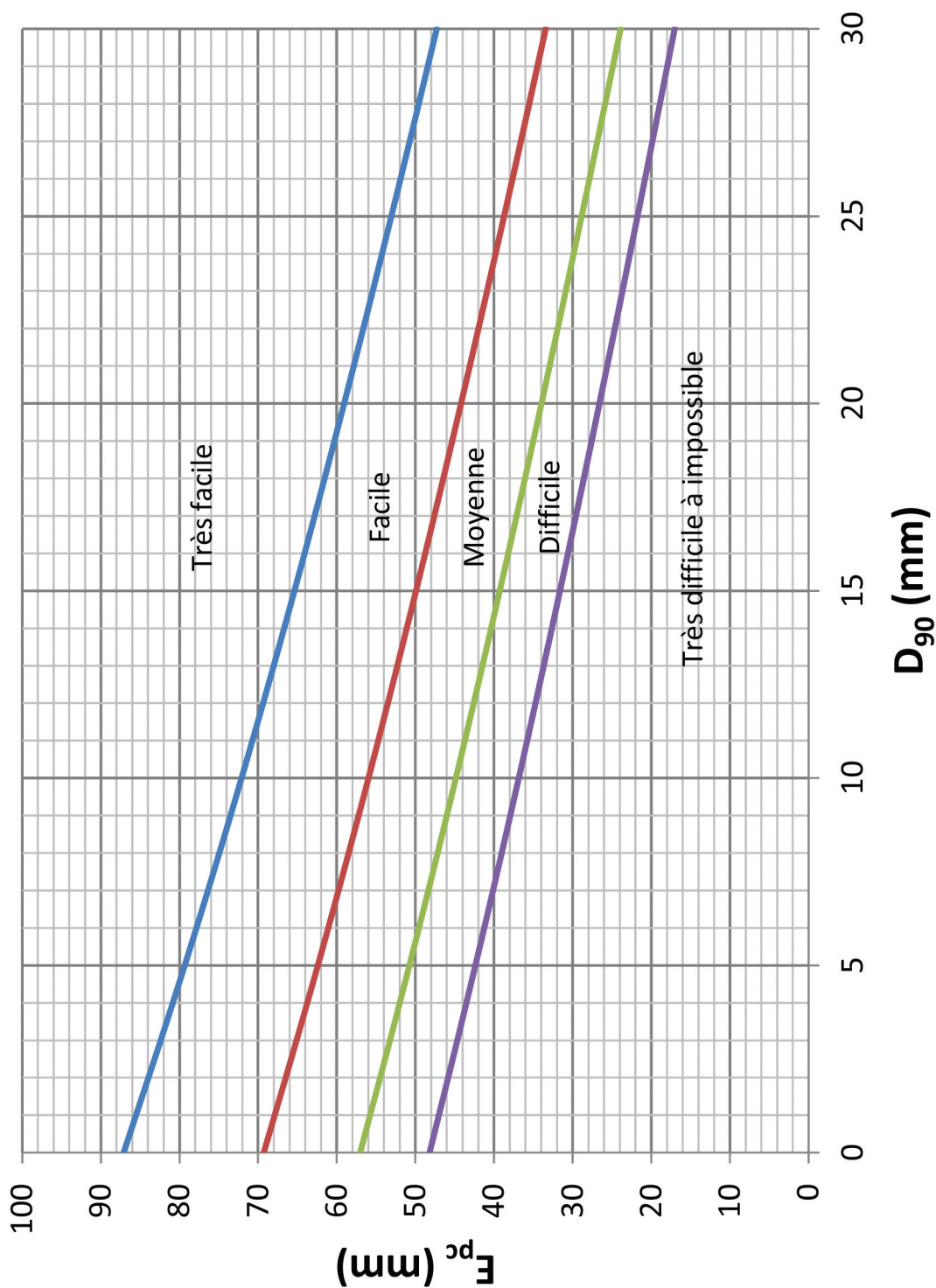
Eprouvette	Rc (MPa)
<b>Moyenne</b>	

#### Commentaires

Courbes enfoncement-travail (6 éprouvettes + moyenne)



## Abaque pour l'estimation de l'excavabilité d'un matériau



Abaque donnant l'excavabilité d'un matériau en fonction de son  $D_{90}$  et de l'enfoncement au poinçon ( $E_{pc}$ ) pour un travail de 340 J, pour une largeur de pioche de 55 mm.



# Liste des figures

Figure 1 - Encombrement du sous-sol urbain .....	5
Figure 2 - Piochage sur des tranchées, les panneaux de polystyrène latéraux permettant de ne pas perdre de matière par projection lors de l'impact de la pioche ....	7
Figure 3 - Relation entre volume excavé (pour 90 coups de pioche) et difficulté de piochage perçue .....	7
Figure 4 - Mauvaise relation entre la résistance à la compression $R_c$ et l'excavabilité ..	8
Figure 5 - Forme du volume du matériau excavé à chaque coup de pioche (à gauche) et schématisation de l'effet d'engrènement en coupe (à droite).....	9
Figure 6 - Équivalence entre enfoncement à la pioche ( $E_{pi}$ ) et l'enfoncement au poinçon ( $E_{pc}$ ).....	10
Figure 7 - Abaque donnant l'excavabilité d'un matériau en fonction de son $D_{90}$ et de l'enfoncement au poinçon ( $E_{pc}$ ) pour un travail de 340 J, pour une largeur de pioche de 55 mm .....	11
Figure 8 - Moule métallique $\varnothing$ 16 cm x 16 cm et son fond en PVC.....	13
Figure 9 - Cône de l'appareil de Glanville, trappe inférieure ouverte .....	13
Figure 10 - Différentes étapes du coulage des éprouvettes .....	14
Figure 11 - Montage pour l'essai de poinçonnement.....	17
Figure 12 - Différentes étapes du protocole d'essai .....	18
Figure 13 - Démoulage des moules à l'aide d'une presse.....	20
Figure 14 - Nettoyage des moules à l'aide d'une brosse métallique, si nécessaire ....	20
Figure 15 - Ensemble des 6 courbes « effort en fonction de l'enfoncement » pour un matériau donné et détermination de la courbe moyenne du matériau .....	21
Figure 16 - Ensemble des 6 courbes « travail en fonction de l'enfoncement » pour un matériau donné et détermination de la courbe moyenne du matériau .....	21



# Fiche bibliographique

<b>Collection</b> techniques et méthodes		<b>Sous collection</b> guide technique	
<b>ISSN</b> 2492-5438	<b>ISBN</b> Papier : 978-2-85782-718-4 Pdf : 978-2-85782-719-1		<b>Référence</b> GTI3
<b>Titre</b> Évaluation de l'excavabilité à la pioche des matériaux granulaires traités avec un liant hydraulique à l'aide d'un essai de poinçonnement			
<b>Auteurs</b> Ifsttar et Engie			
<b>Rédacteurs</b> Thierry Sedran, Ifsttar Éric Genesseeux, Ifsttar Michel Hardy, Engie Lab			
<b>Date de publication</b> Septembre 2016	<b>Langue</b> Français		
<b>Résumé</b> <p>Les matériaux granulaires traités avec un liant hydraulique présentent un intérêt certain en comblement de tranchées, et notamment pour éviter les problèmes de post-compactage. Dans un grand nombre de cas, ces matériaux doivent toutefois rester faciles à excaver à la pioche, pour que les gestionnaires puissent intervenir sur leurs réseaux, rapidement et en toute sécurité.</p> <p>Ce guide décrit comment quantifier et mesurer cette excavabilité à la pioche. Il montre que le critère de résistance à la compression traditionnellement utilisé n'est pas adapté et propose un essai de poinçonnement bien plus pertinent.</p> <p>Issu du travail de deux thèses, ce guide devrait permettre de faciliter le dialogue entre prescripteurs et fournisseurs de matériaux traités au liant hydraulique pour tranchées excavables, sur la base d'une approche performantielle validée.</p>			
<b>Mots clés</b> Matériaux à faible résistance, matériaux autocompactants, matériaux cimentaires, excavation, excavabilité, pioche, test de poinçonnement, tranchée			
<b>Nombre de pages</b> 36			

# Publication data form

<b>Collection</b> technics and methods		<b>Sub collection</b> technical guide	
<b>ISSN</b> 2492-5438		<b>ISBN</b> Print : 978-2-85782-718-4 Pdf : 978-2-85782-719-1	<b>Reference</b> GTI3
<b>Title</b> Evaluation of the excavatability with a pick of granular materials treated with hydraulic binder with the help of a punching test			
<b>Authors</b> Ifsttar and Engie			
<b>Writers</b> Thierry Sedran, Ifsttar Éric Gennesseaux, Ifsttar Michel Hardy, Engie Lab			
<b>Publication date</b> September 2016		<b>Language</b> French	
<b>Summary</b> Granular materials treated with hydraulic binder are convenient to fill trenches, and especially to avoid the post-compaction issues. In many cases however, these materials must remain easy to excavate manually with a pick, so that owners can maintain their underneath networks, quickly and safely. This guide describes how to measure and quantify this excavatability with a pick. It shows that the criterion of compressive strength traditionally used is not suitable, and propose a punching test which is much more relevant. Result of two Phd thesis, this guide should facilitate the dialogue between prescribers and materials suppliers of excavatable materials treated with hydraulic binder for trenches, on the basis of a validated performance-based approach.			
<b>Key words</b> Controlled low-strength materials, self-compacting materials, cement based materials, excavation, excavatability, pick, punching test, trench			
<b>Number of pages</b> 36			



Les matériaux granulaires traités avec un liant hydraulique présentent un intérêt certain en comblement de tranchées, et notamment pour éviter les problèmes de post-compaction. Dans un grand nombre de cas, ces matériaux doivent toutefois rester faciles à excaver à la pioche, pour que les gestionnaires puissent intervenir sur leurs réseaux, rapidement et en toute sécurité.

Ce guide décrit comment quantifier et mesurer cette excavabilité à la pioche. Il montre que le critère de résistance à la compression traditionnellement utilisé n'est pas adapté et propose un essai de poinçonnement bien plus pertinent.

Issu du travail de deux thèses, ce guide devrait permettre de faciliter le dialogue entre prescripteurs et fournisseurs de matériaux traités au liant hydraulique pour tranchées excavables, sur la base d'une approche performantielle validée.



LES COLLECTIONS DE L'IFSTTAR



ISSN : 2492-5438  
Référence : GTI3  
Crédit photo : Ifsttar  
Septembre 2016