



Journée d'information
Remblayage de tranchées

Les matériaux autocompactants: prescrire et mesurer leur excavabilité

Une nouvelle méthode pour évaluer l'excavabilité

E. GENNESSEaux - IFSTTAR



26 novembre 2019



Pas de définition précise de l'excavabilité

- Approches actuelles de l'excavabilité:
 - **Note d'appréciation qualitative:** basée sur la *durée* et les *volumes excavés* [Crouch et al., 1998]
 - **Critères empiriques:** seuils en *résistance à la compression simple* à 28 jours:
 - American Concrete Institute
 - SETRA/LCPC : $R_{c28} < 2 \text{ MPa}$
 - Indices d'excavabilité RE : [Du et al., 2002], [Puppala et al., 2007]

$$RE = \frac{w^{1,5} \cdot 104 \cdot R_{c28}^{0,5}}{10^6} \leq 1$$

Inconvénients de ces approches:

- Energie d'excavation non prise en compte
- Evolution de la résistance à long terme des matériaux non prise en compte
- Ne sont pas pertinents pour tous les matériaux [Krell, 1989], [NCHRP,2008]

Démarche adoptée



2 thèses de doctorat

Coulage de tranchées in-situ
Piochage manuel « à l'aveugle »
Evaluation de la difficulté de piochage

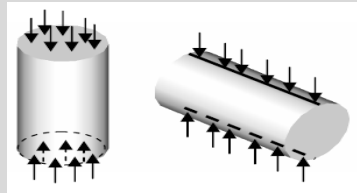


- Paramètres de formulation étudiés:
 - Résistances variables (âge et dosages en ciment)
 - Granulats:
 - D_{\max} variables (4 à 22 mm)
 - Nature variables (Gneiss, Calcaires, recyclés de béton)
 - LA variables (20 à 40)
 - Teneur en air

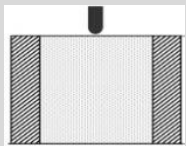


Essais réalisés

Laboratoire



→ R_c
→ R_{tb}



→ E_{pc}

Piochages *in situ*



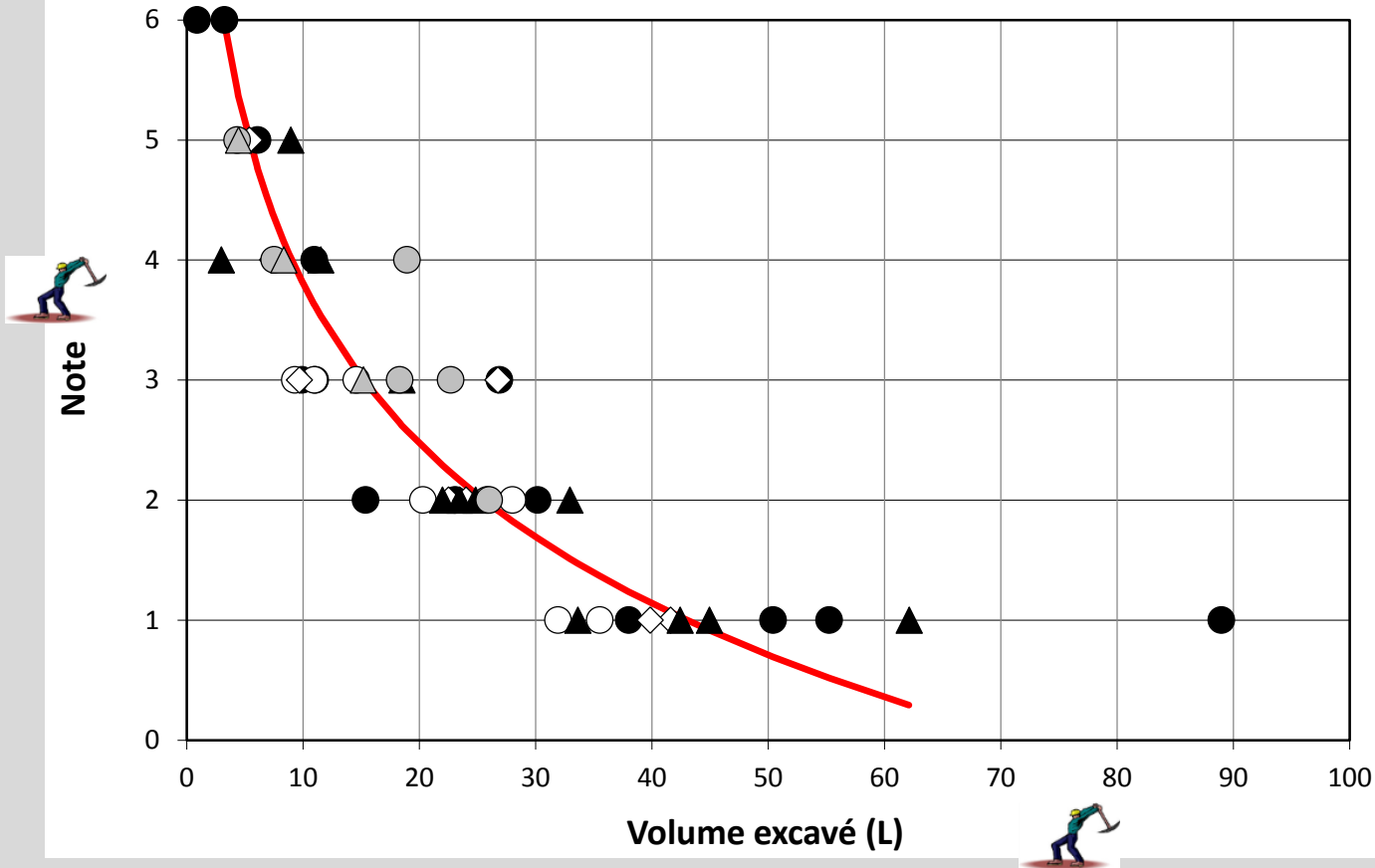
Professionnel
→ V excavé
→ Note



Machine
Energie d'impact contrôlée
→ E_{pi}

Analyse des résultats de laboratoire et *in situ*

Relation entre la note et le volume excavé



Lien direct

Niveaux d'excavabilité	Note	V _{seuil} à 90 coups (L)
Très facile	1	43
Facile	2	26
Moyenne	3	15
Difficile	4	9
Très difficile	5	5
Impossible à la main	6	3

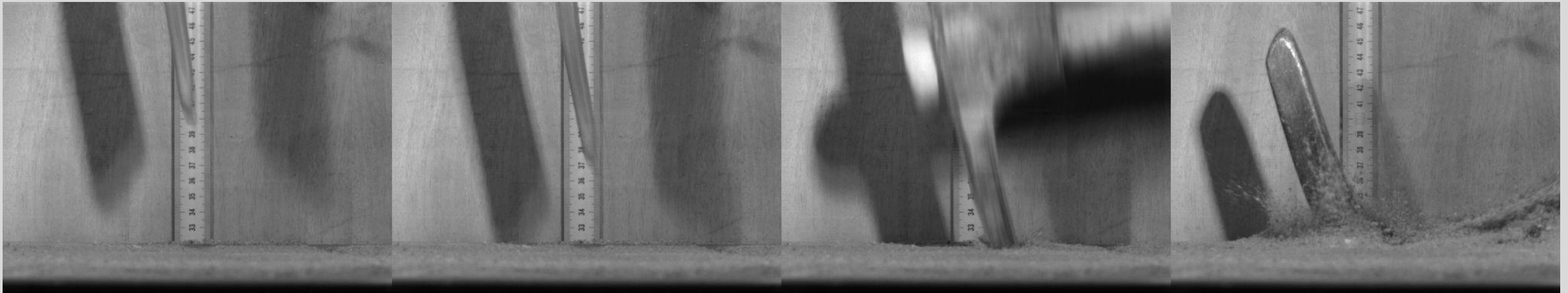
Confirmation du choix du volume excavé comme critère d'excavabilité → Calcul de seuils d'excavabilité

Travail fourni par un coup de pioche

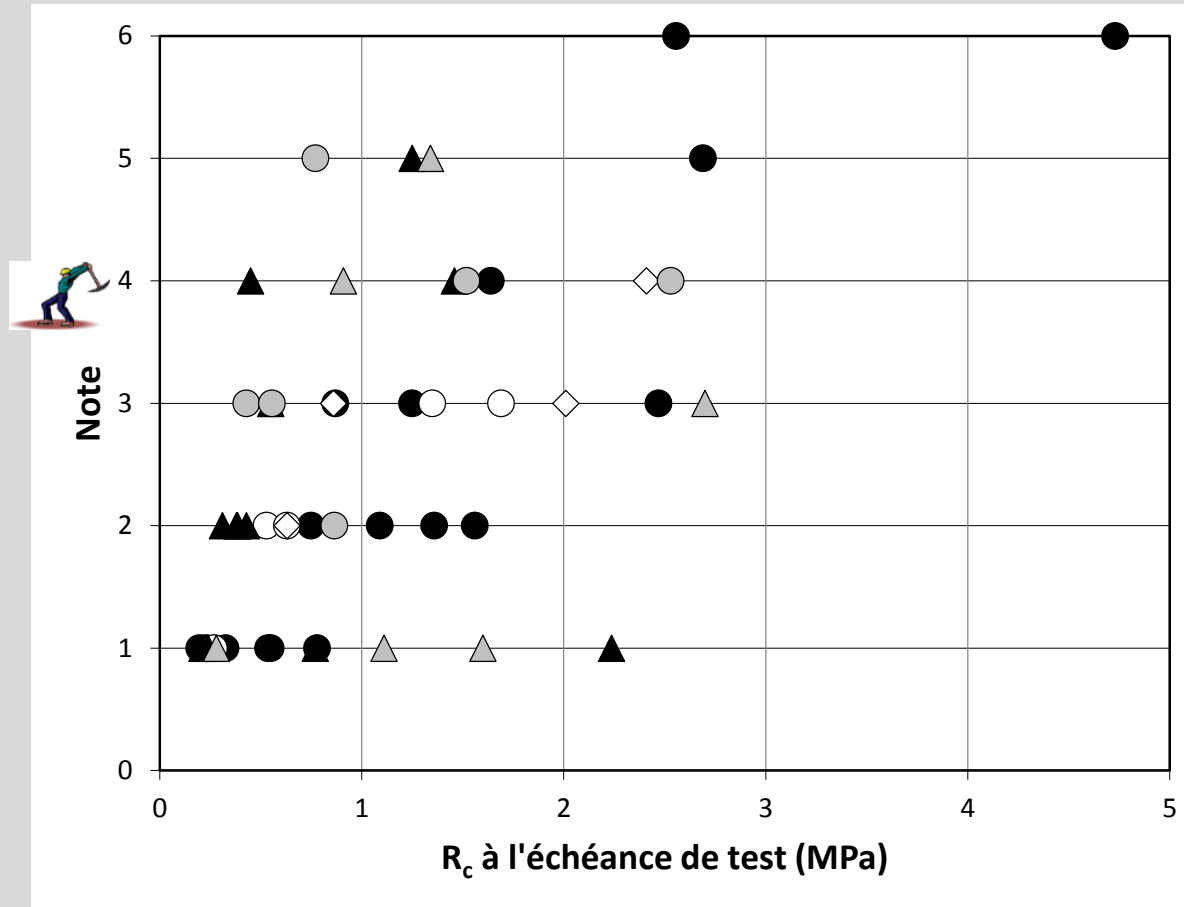
- Première phase de l'excavation

- Energie d'impact de la pioche juste avant l'enfoncement (caméra rapide (10000 images/s))

Energie d'impact moyenne ≈ 340 J

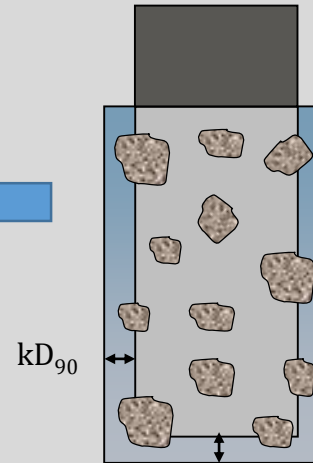
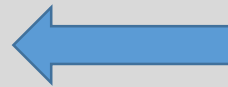
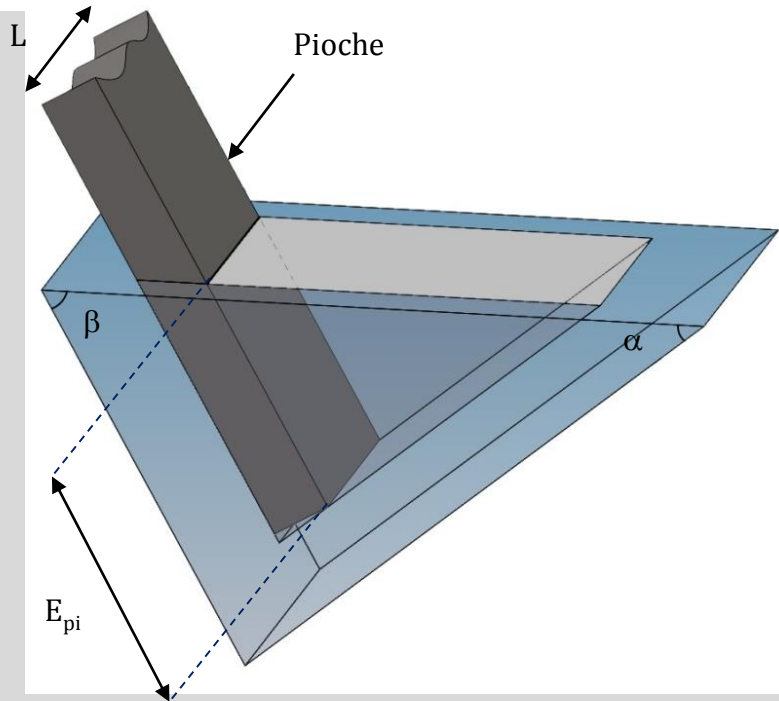


Corrélation entre Note et résistance à la compression (R_c)



Mauvaise corrélation → R_c n'est pas un critère permettant de caractériser l'excavabilité

Un modèle de prédiction du volume excavé



β donnée du problème

α déterminé par analyse limite, supposé constant à chaque coup

k paramètre décrivant l'effet d'engrènement

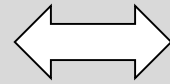
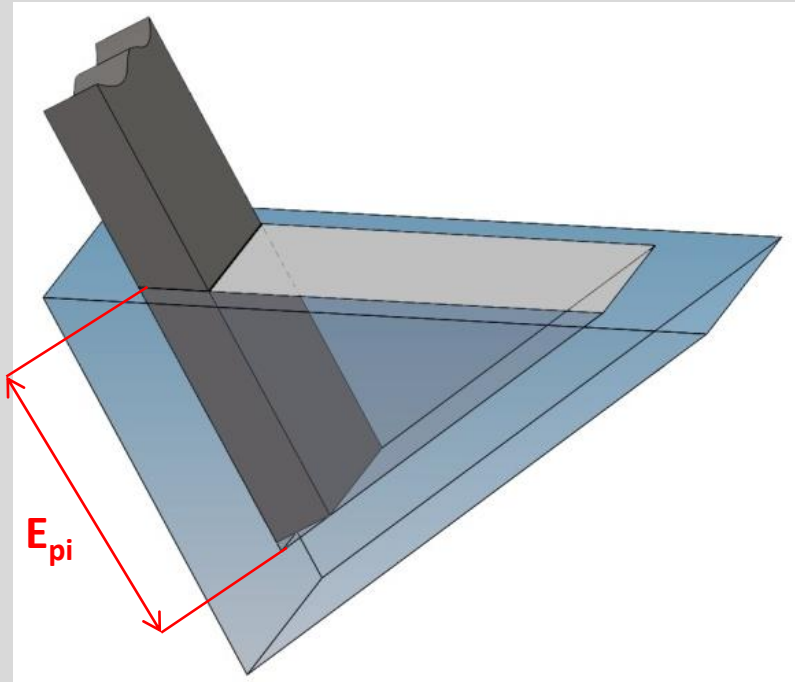
$$V_{\text{théorique}} = \frac{1}{2} a'^2 \left(\frac{1}{\tan(\beta)} + \frac{1}{\tan(\alpha)} \right) (L) + 2k.D_{\text{max}}$$

$$a' = a + k.D_{\text{max}} [\sin(\beta) + \cos(\beta)]$$

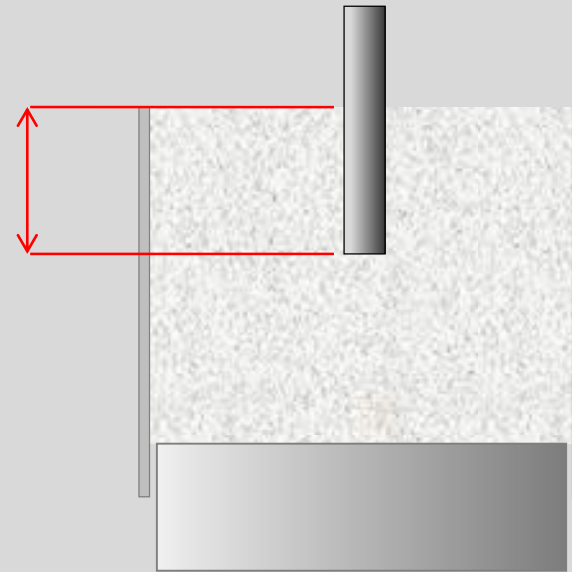
$$a = E_{pi} \times \sin(\beta)$$

$$V_{\text{théo}} = 81.10^{-6} (0,866. E_{pi} + 0,820. D_{90})^2 (L + 1,2. D_{90})$$

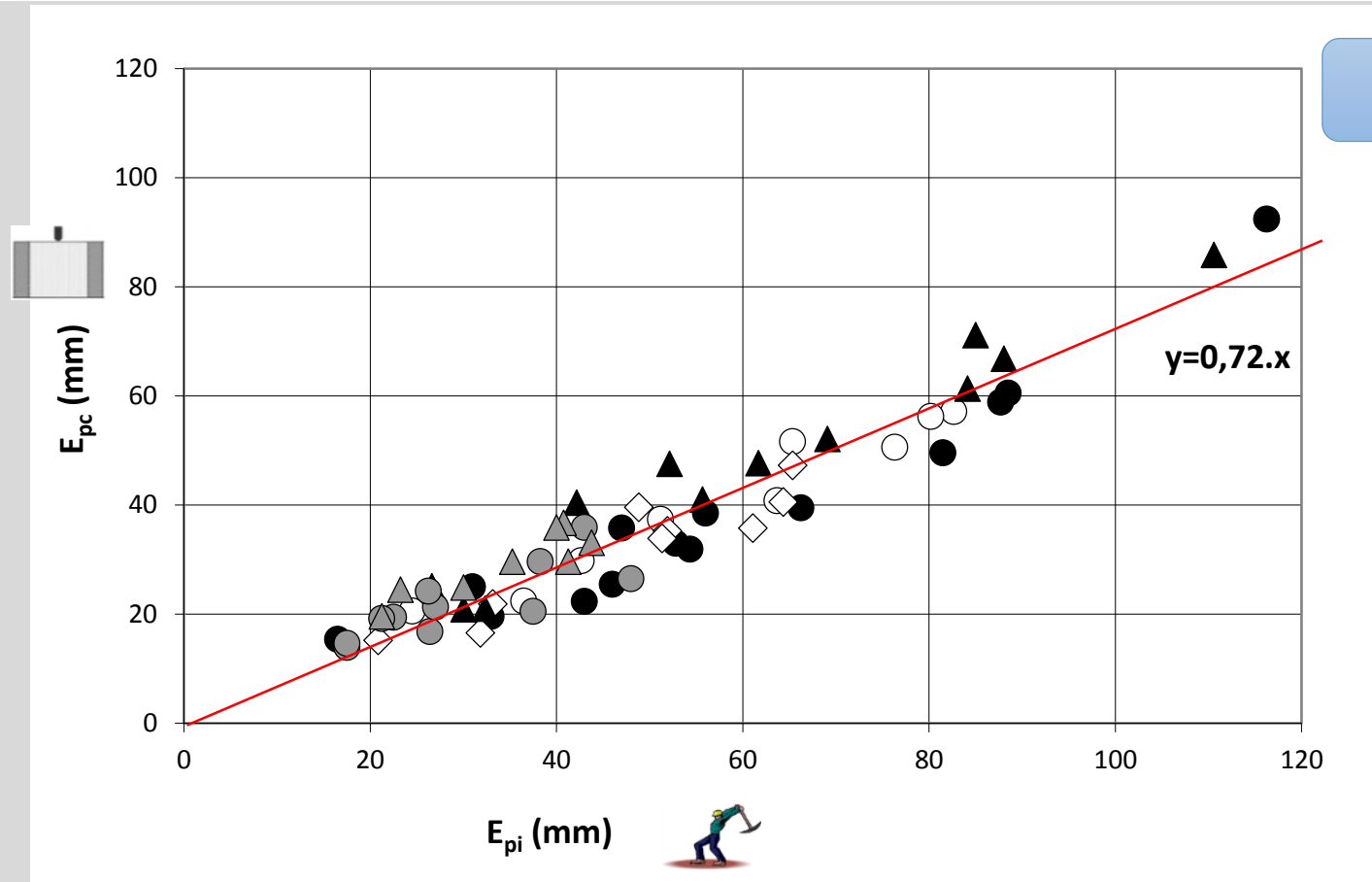
Un essai de prédiction de l'enfoncement à la pioche



$$E_{pc} = (?) E_{pi}$$



Corrélation entre E_{pc} et E_{pi}

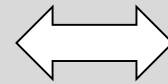
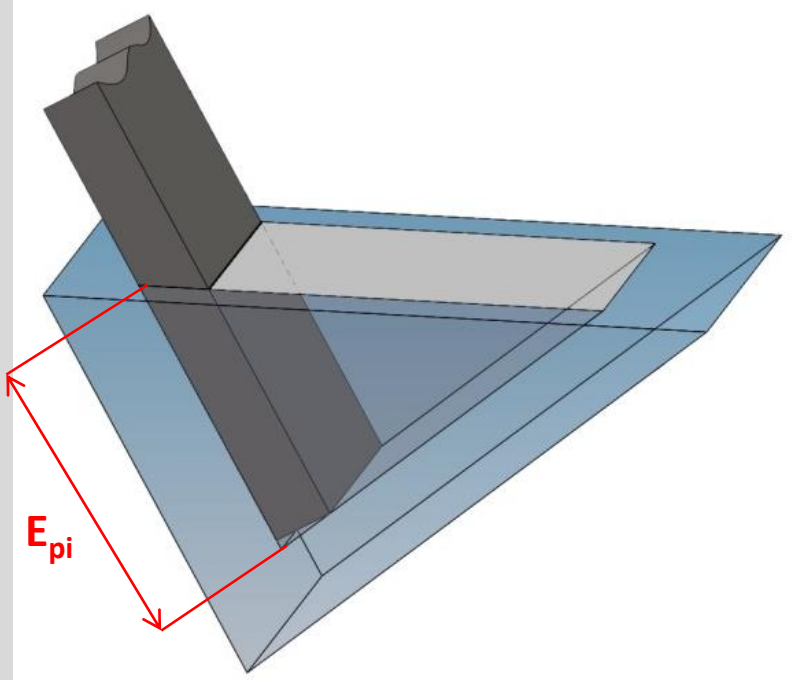


Droite unique pour
toutes les données testées

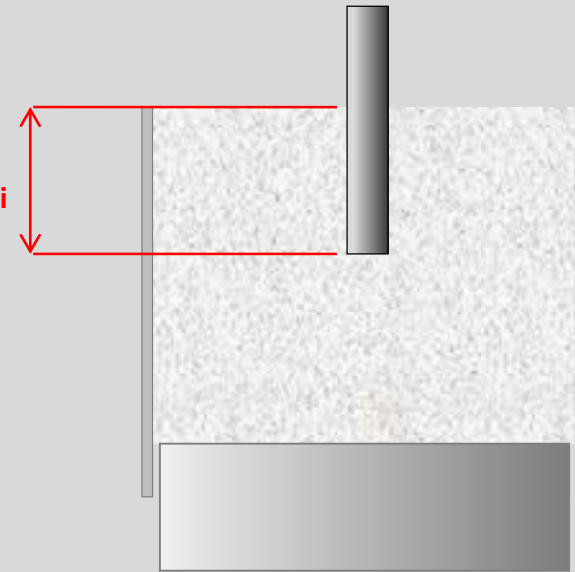
Pente $\neq 1$

Validation de l'essai de poinçonnement
comme outil prédictif de l'enfoncement à la pioche avec $P_{\text{poinçon}}=0,72$

Un essai de prédiction de l'enfoncement à la pioche



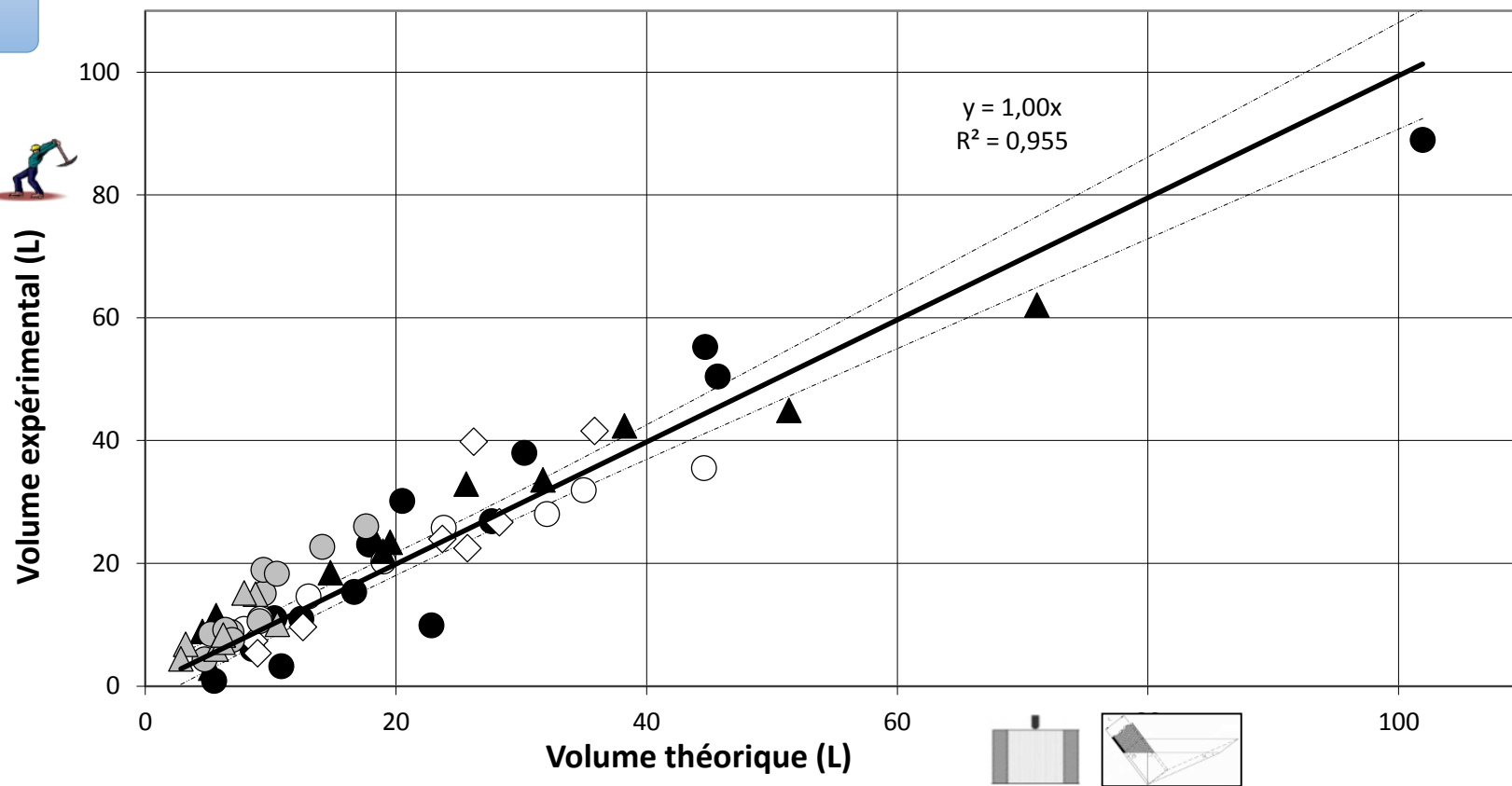
$$E_{pc} = 1,39 E_{pi}$$



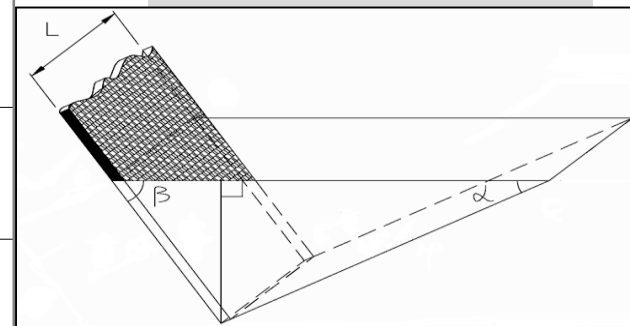
$$V_{théo} = 81. 10^{-6} (1,204. E_{pc} + 0,820. D_{90})^2 (L + 1,2. D_{90})$$

Corrélation entre le volume expérimental et le volume théorique

MAE = 4,5 L

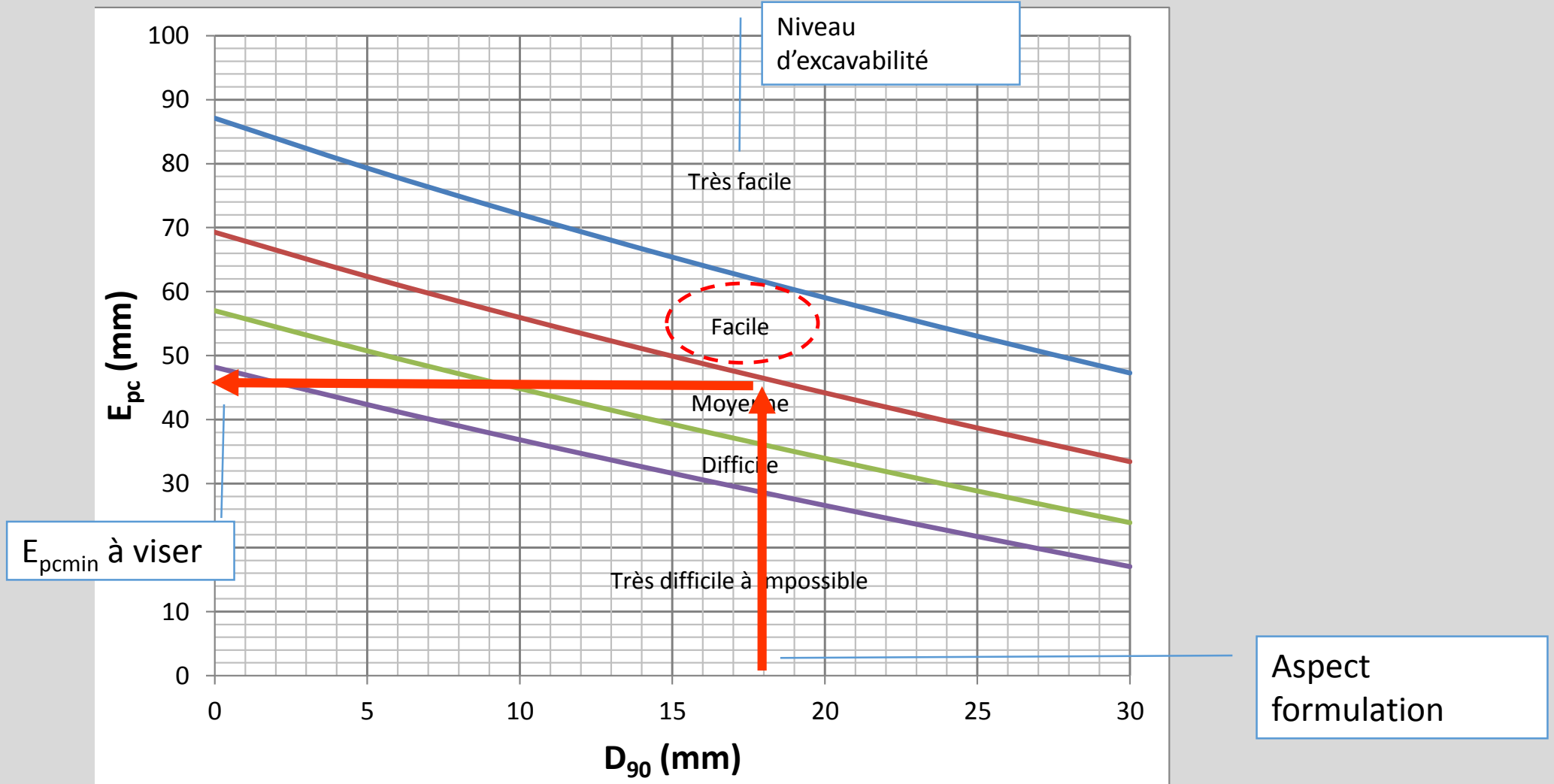


$k = 0,6$
 $\varphi = 41,5^\circ$
 $\beta = 60^\circ$
 $D_{\max} = D_{90}$
 $P_{\text{poinçon}} = 0,72$



Courbe commune à tous les matériaux → Justifie la démarche
Ajustement des paramètres

Définition de seuils d'excavabilité



Confection des éprouvettes



- Eprouvettes $\text{Ø}16 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$
- Inox épaisseur 4mm
- Fond de moule PVC

- Remplissage à l'aide de l'appareil de Glanville



Confection des éprouvettes



Mise en place de l'éprouvette



Remplissage du cône



Remplissage éprouvette



Pesée de l'éprouvette

Matériel nécessaire



- But de l'essai
 - Prédiction de l'enfoncement de la pioche
- Principe de l'essai
 - Poinçon $\varnothing 18$ mm \leftrightarrow section de pioche
 - Confinement par un moule en inox représentatif de l'état triaxial dans la tranchée
 - Une calle métallique circulaire de dimensions $\varnothing 155$ mm x 20 mm
- Caractéristiques de l'essai
 - Vitesse de déplacement entre 100 mm/min et 900 mm/min
 - Presse de 100 kN
- Acquisition:
 - Effort (capteur de 100 kN minimum)
 - Déplacement (capteur de 120mm de course) \rightarrow Enfoncement au poinçon (E_{pc})

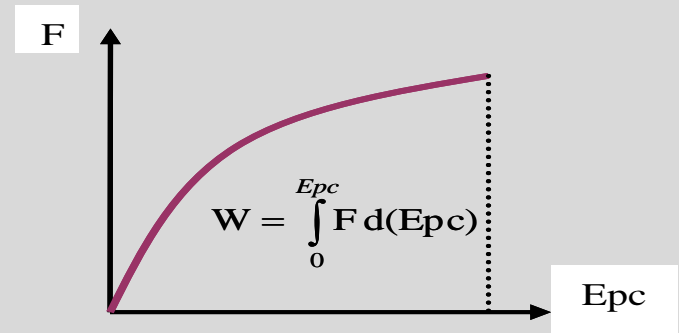
Protocole d'essai



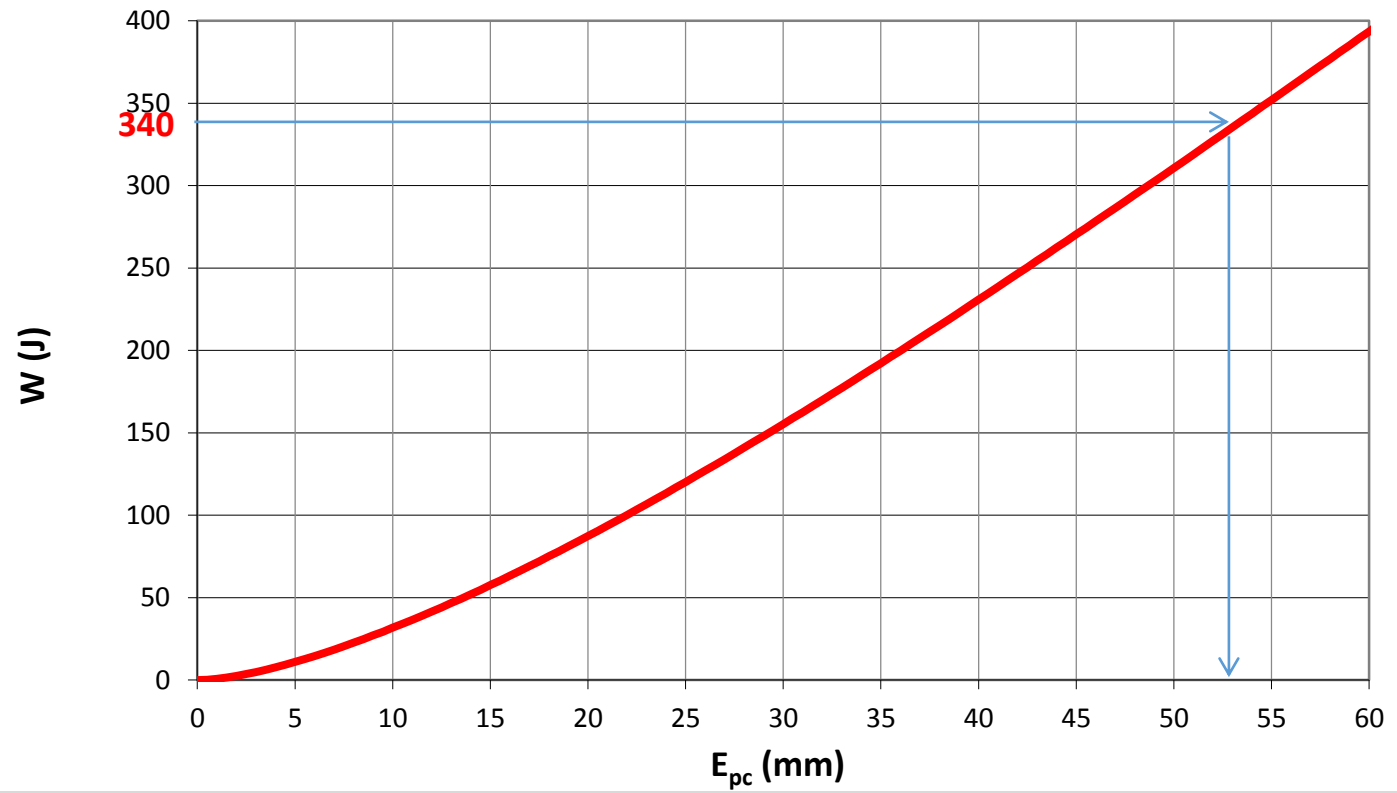
Démoulage des éprouvettes



Traitement des données

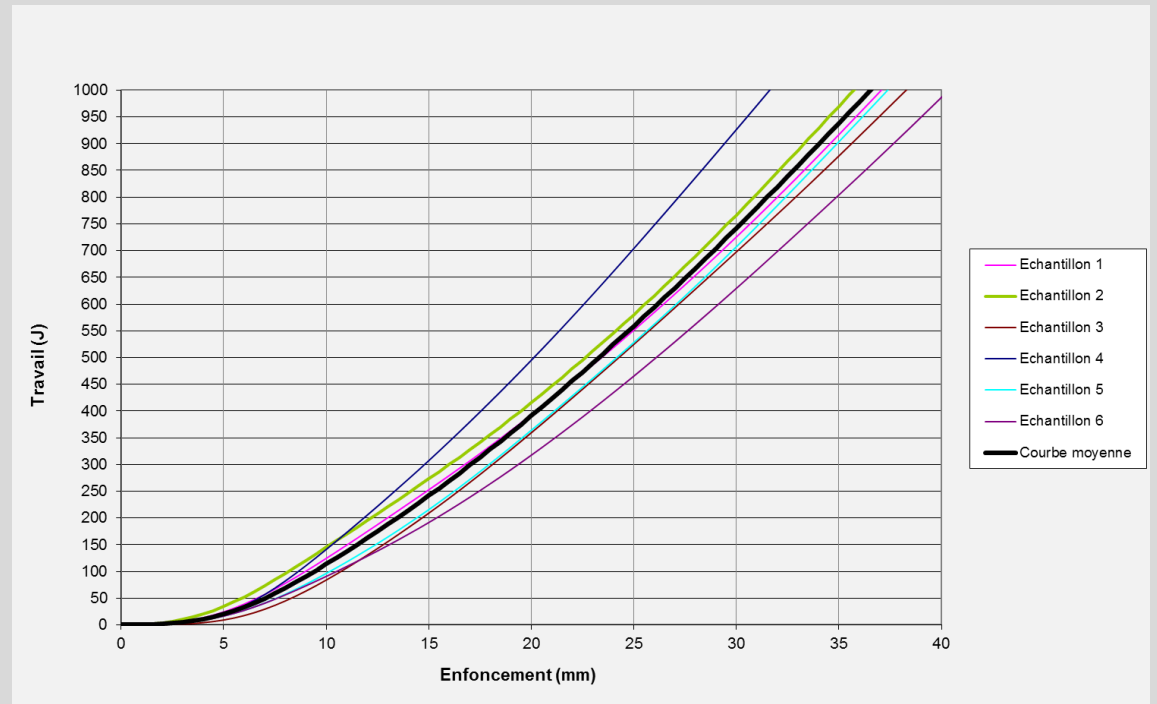
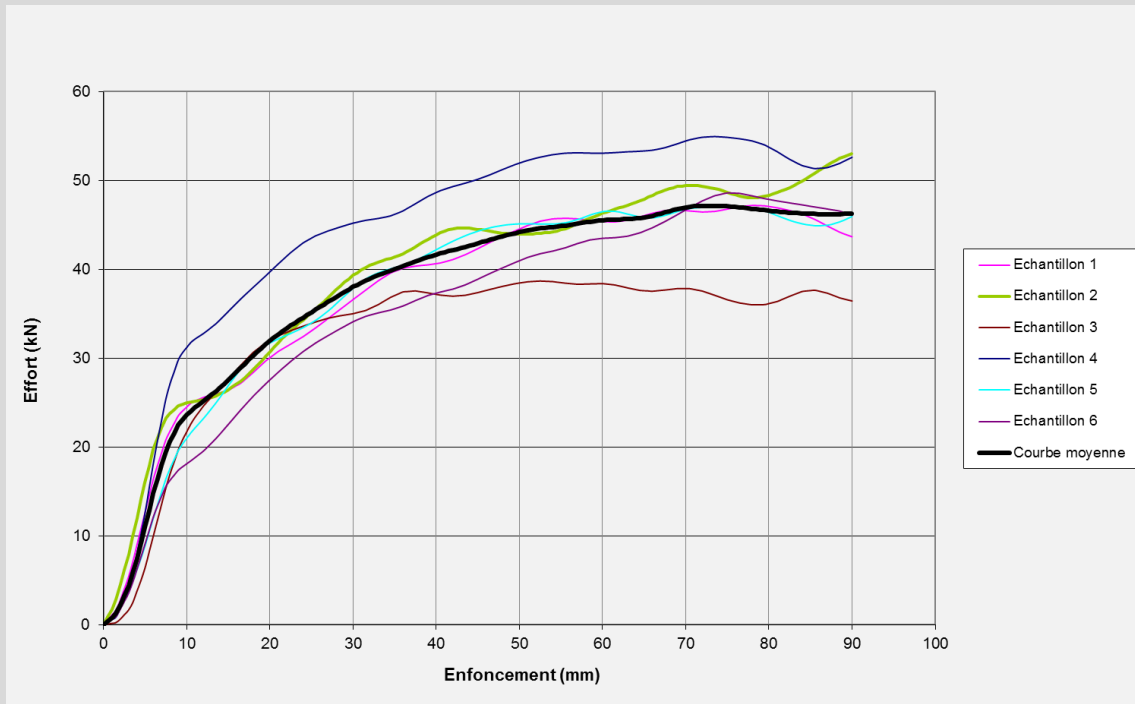


Energie d'impact de référence
340J



Mesure possible à plusieurs niveaux d'énergie

Traitement des données



6 éprouvettes de matériau à tester
→ Mesure sur courbe moyenne

Compte rendu d'essai

Référence de la formule		
D ₉₀ (mm)		
Date des essais de poinçonnement		
Age des éprouvettes lors des essais (jours)		
Eprouvette	Masse volumique à la fabrication (kg/m ³)	Enfoncement (mm) à 340 J
Moyenne		

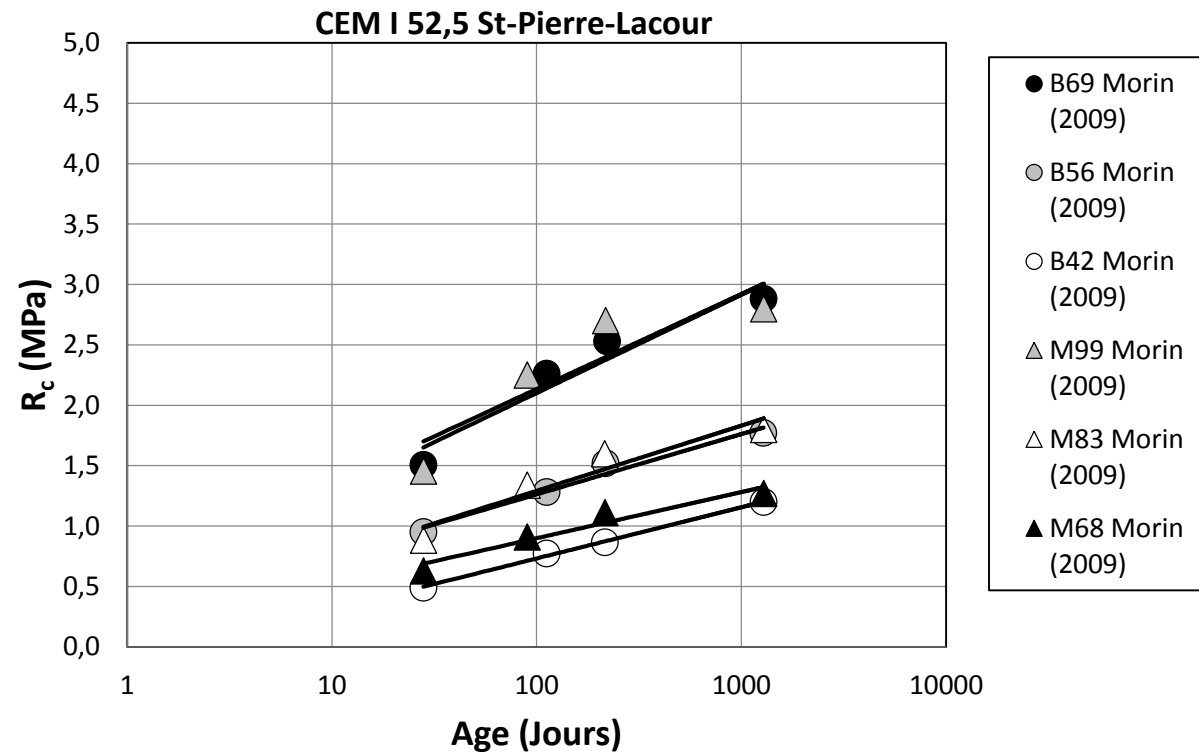
- Travail de 340 J non atteint pour un enfoncement de 95 mm
- Enfoncement de 10 mm non atteint pour un effort de 90 kN

<u>Qualification de l'excavabilité du matériau</u>	
<input type="checkbox"/> Très facile <input type="checkbox"/> Facile <input type="checkbox"/> Moyenne <input type="checkbox"/> Très difficile à impossible	
<u>Résistance à la compression (à titre informatif)</u>	
Date des essais	
Age des éprouvettes (jours)	
<u>Eprouvette</u>	<u>Rc (MPa)</u>
Moyenne	
<u>Commentaires</u>	

Courbes enfoncement-travail (6 éprouvettes + moyenne)

Evolution de la Rc à long terme

- Conservation d'éprouvettes coulées en tranchées



Evolution linéaire en log du temps
Pente dépendante de la résistance initiale

Evolution de la Rc à long terme

- Dispositions de prise en compte actuelle:
 - Pour un liant à base de clinker:
 - $E_{pc}(1 \text{ an}) \approx E_{pc}(28 \text{ jours}) / 1,4$
 - $E_{pc}(10 \text{ ans}) \approx E_{pc}(28 \text{ jours}) / 1,6$
 - $E_{pc}(20 \text{ ans}) \approx E_{pc}(28 \text{ jours}) / 1,7$
 - Vérification expérimentale pour d'autres types de liants

Conclusion

- Validation d'un essai de poinçonnement comme moyen de prédiction de l'enfoncement d'une pioche
 - Validation d'un modèle de volume reliant l'enfoncement au poinçon au volume excavé
- Démarche inédite de caractérisation de l'excavabilité
- Possibilité de s'appuyer sur un essai simple de laboratoire uniquement
 - Possibilité de formuler des matériaux réellement excavables
 - Possibilité d'utiliser la méthode à des fins de contrôle de production

Guide technique

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 téléchargeable gratuitement à l'adresse
suivante:**

http://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/ifsttar/guidetechnique/2016-GTI3-guidetechnique-Ifsttar.pdf

Merci de votre attention