



Colonnes ballastées

Le point de vue d'un géotechnicien

Frédéric DURAND

Comment s'organisent les études géotechniques afférentes aux colonnes ballastées ?

- Au stade de l'avant projet (G12)
- Au stade du projet (G2)
- Au stade de l'exécution (G3 et G4)

Pour que le géotechnicien propose une solution de colonnes ballastées, il doit :

- identifier les aléas majeurs ou les limites d'utilisation
- définir les hypothèses géotechniques principales de calcul
- fournir les principes généraux de fondations adoptées aux colonnes ballastées
- préciser si des investigations complémentaires sont nécessaires pour cette solution
- et rappeler la nécessité de la mission G2 complémentaire.

Souvent la solution colonnes ballastées n'est pas la solution unique. Elle fait partie d'une série d'autres solutions.



Le document « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement » fait état d'un certain nombre de critères de limites d'utilisation.

Quels sont les aléas majeurs qui peuvent entraîner d'écarter cette solution ?

- La présence de matière organique ou d'une façon générale présentant une perte au feu supérieure à 5% au sens de la norme XP 94-047
- En général cet essai n'est pas réalisé au stade de la G12.
- On peut avoir identifié les horizons à caractère évolutifs mais il faudra lever ce point au stade d'une reconnaissance de sol adaptée (G2) et au stade de la mission de projet (G2).

- Pour les sols fortement compressibles, les recommandations font état d'un problème pour les sols présentant des caractéristiques inférieures à :

$$C_u < 20 \text{ kPa et } q_c < 300 \text{ kPa (} C_u \neq q_c/15 \text{)}$$

- Toutefois, les présentes recommandations n'écartent pas la solution colonnes ballastées mais font état de la nécessité :
 - d'une étude spécifique (=> G2)
 - de dispositions constructives (pré-chargement...)



Pré-forage

Il n'y a pas de seuil défini dans les recommandations.

Il s'agit toutefois d'un aléa important, car si des pré-forages sont nécessaires, ces derniers ont une incidence sur le coût des travaux.

Il s'agit d'un aléa au niveau du chiffrage de la solution (stade G2).

Il n'en demeure pas moins que cet aléa est difficile à gérer pour le géotechnicien car il dépend fondamentalement des caractéristiques performantielles du matériel de l'entreprise spécialisée.

Les essais CPT permettent toutefois d'identifier les bancs indurés qui peuvent poser des problèmes de pénétration (en particulier au niveau des remblais de surface).

Profondeur à atteindre

- Deux problèmes se posent :
 - 1) la profondeur à laquelle il faut descendre les colonnes
 - 2) la profondeur maximale susceptible d'être réalisée
- Sur ces derniers points, j'ai un avis très personnel (donc nécessairement limité à ma propre expérience) :
 - Je ne préconise pas des colonnes ballastées dites « flottantes ». A mon avis, on doit toujours rechercher à les arrêter au niveau d'un horizon présentant un contraste suffisant. La colonne ballastée doit être « pincée » entre la couche de forme et un substratum. Ce substratum n'est pas nécessairement très compact (qc 2 à 3 MPa suffisent souvent).
 - Pour les longueurs maximales, les limites performantielles du matériel évoluant, il est difficile d'arrêter un seuil. Au-delà de 15 mètres de profondeur, et ne serait-ce que pour des problèmes de contrôles, on sort des ouvrages courants.

On doit définir les caractéristiques principales géotechniques.

- A mon avis, cela passe nécessairement par une analyse assez fine du comportement du sol sans colonnes ballastées.
- En effet, le fait de réaliser des colonnes va diminuer les tassements mais dans un rapport relativement modéré (1,5 à 3).
- Comme le domaine d'application est fondamentalement les surfaces chargées (faiblement à moyennement), il y a lieu d'établir une différence entre :
 - les sols normalement consolidés
 - les sols sur consolidés, et le degré de surconsolidation.

Notre approche est faite avec les résultats CPT.

- Approche qualitative

Classification Robertson

q_c résistance de pointe

R_f friction ratio ($R_f = f_s/q_c$)

La classification Robertson permet de bien identifier les sols.

- Approche quantitative

Une fois établie la classification des sols, on peut caractériser les sols :

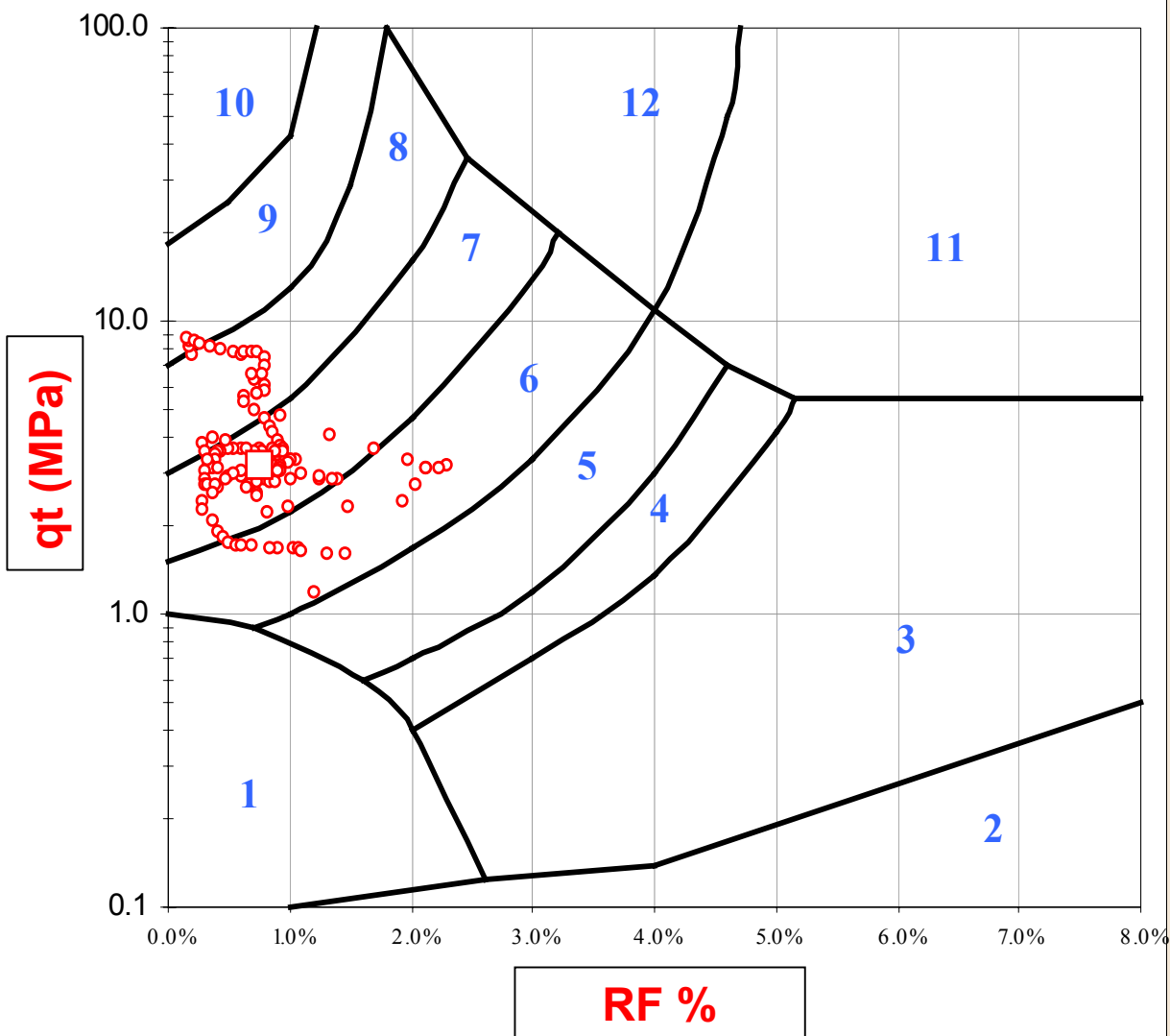
- Zone normalement consolidée

- Zone sur consolidée

par 2 paramètres adimensionnels et indépendants de σ_{v0}

$$Q_T = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$$

$$F_R = f_s / (q_t - \sigma_{v0})$$

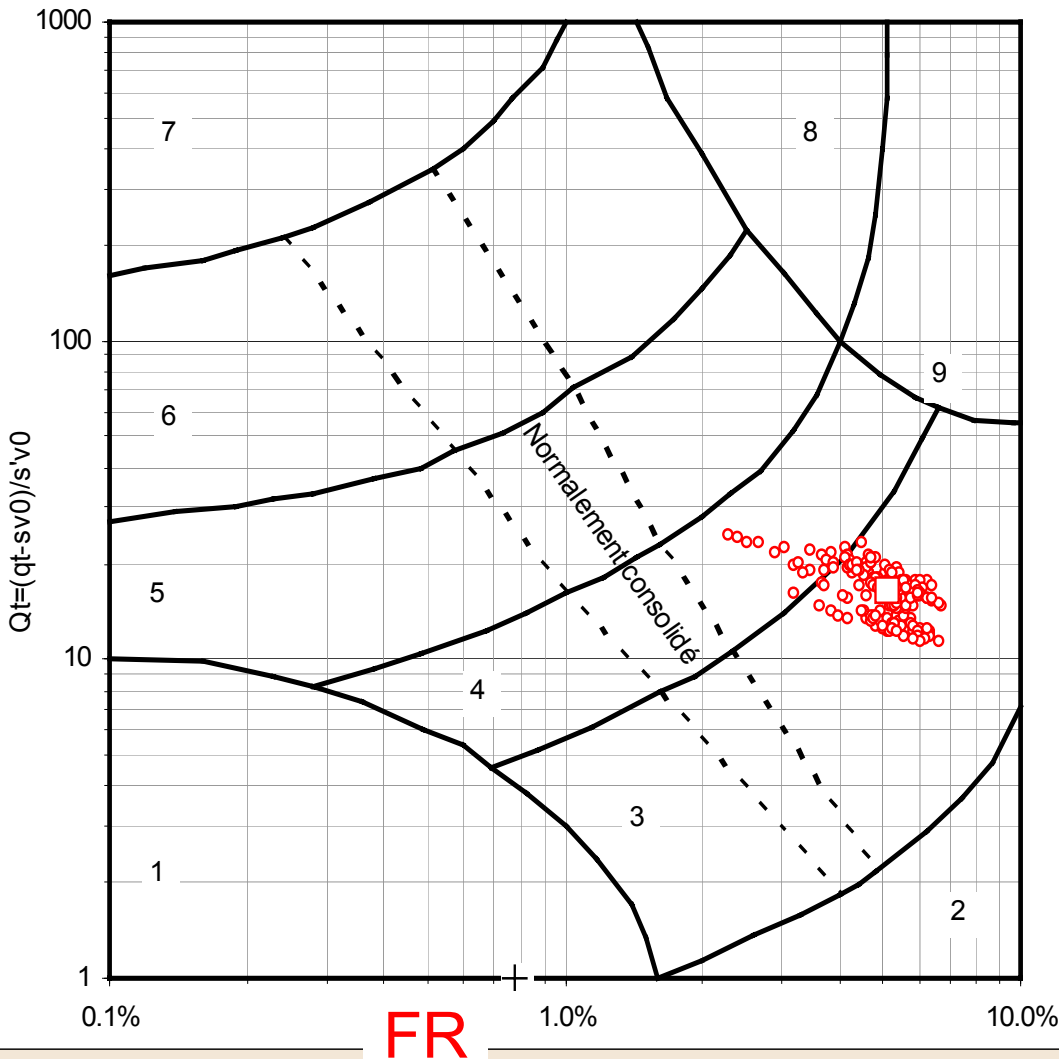


Abaque de ROBERTSON

qt fonction de **RF**

S1	Sol fin argile ou silt sensible
S2	Sols organiques et tourbes
S3	Argile
S4	Argile silteuse à argile
S5	Silt argileux à argile silteuse
S6	Silt sablonneux à silt argileux
S7	Sable silteux à silt sablonneux
S8	Sable silteux à sable
S9	Sable
S10	Sable graveleux à sable
S11	Sols fins intermédiaires très raides
S12	Sables cimentés ou dilatants

Q_t



$$Q_t = (q_t - \sigma'_{vo}) / \sigma'_{vo}$$

$$FR = f_s / (q_t - \sigma'_{vo})$$

S1	Sol fin argile ou silt sensible
S2	Sols organiques et tourbes
S3	Argiles : argile à argile silteuse
S4	Silts : silts argileux à argile silteuse
S5	Sables : Sables silteux à silts sableux
S6	Sables : Sables propres à sables silteux
S7	Sables à sable graveleux
S8	Sols fins intermédiaires très raides
S9	Sables cimentés ou dilatants

SOLS COHERENTS (ARGILE)

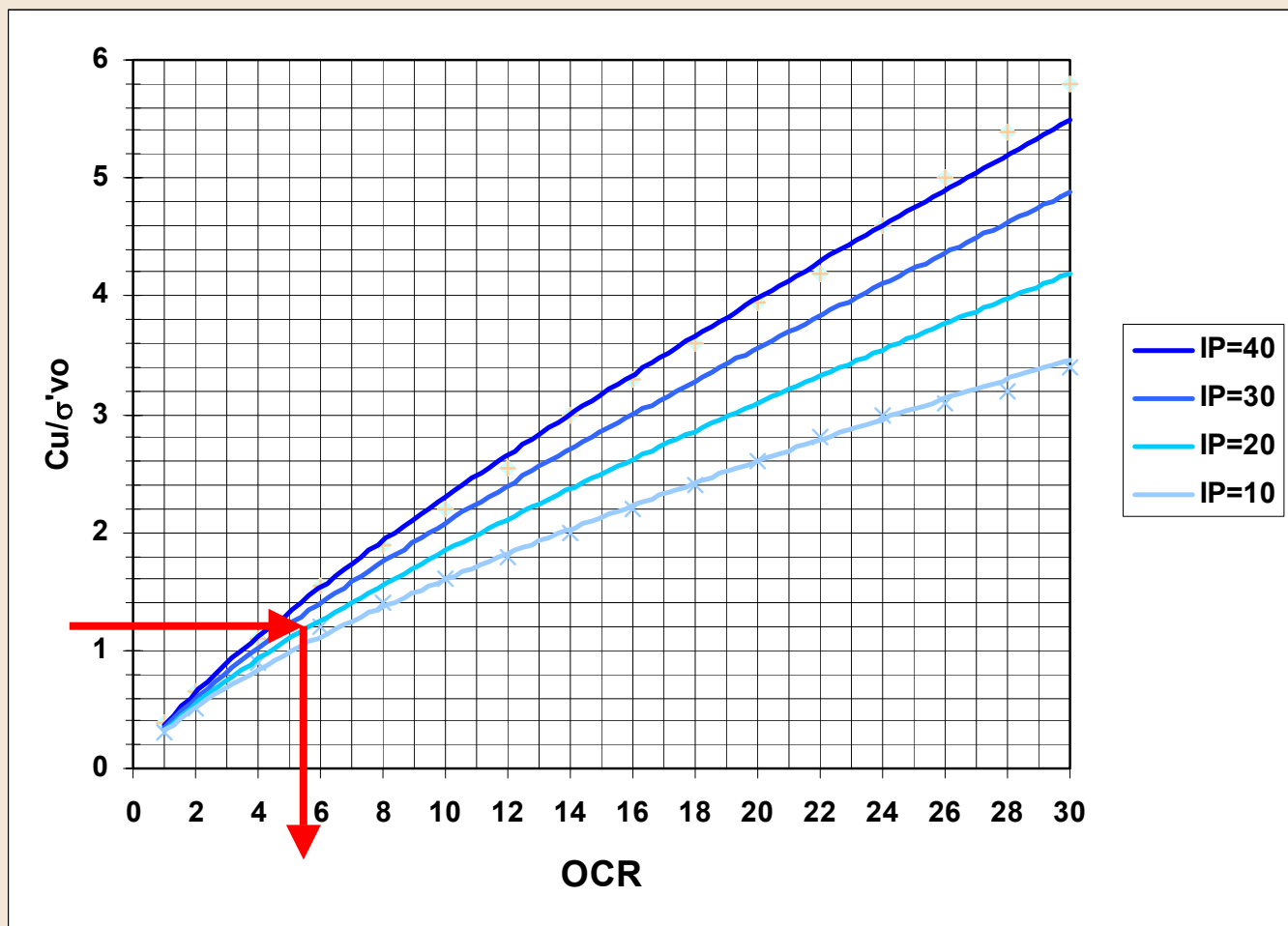
Un profil de cohésion plus détaillé peut être obtenu à partir de l'expression :

$$C_u = (q_t - \sigma_{vo}) / N_{kt}$$

Avec :

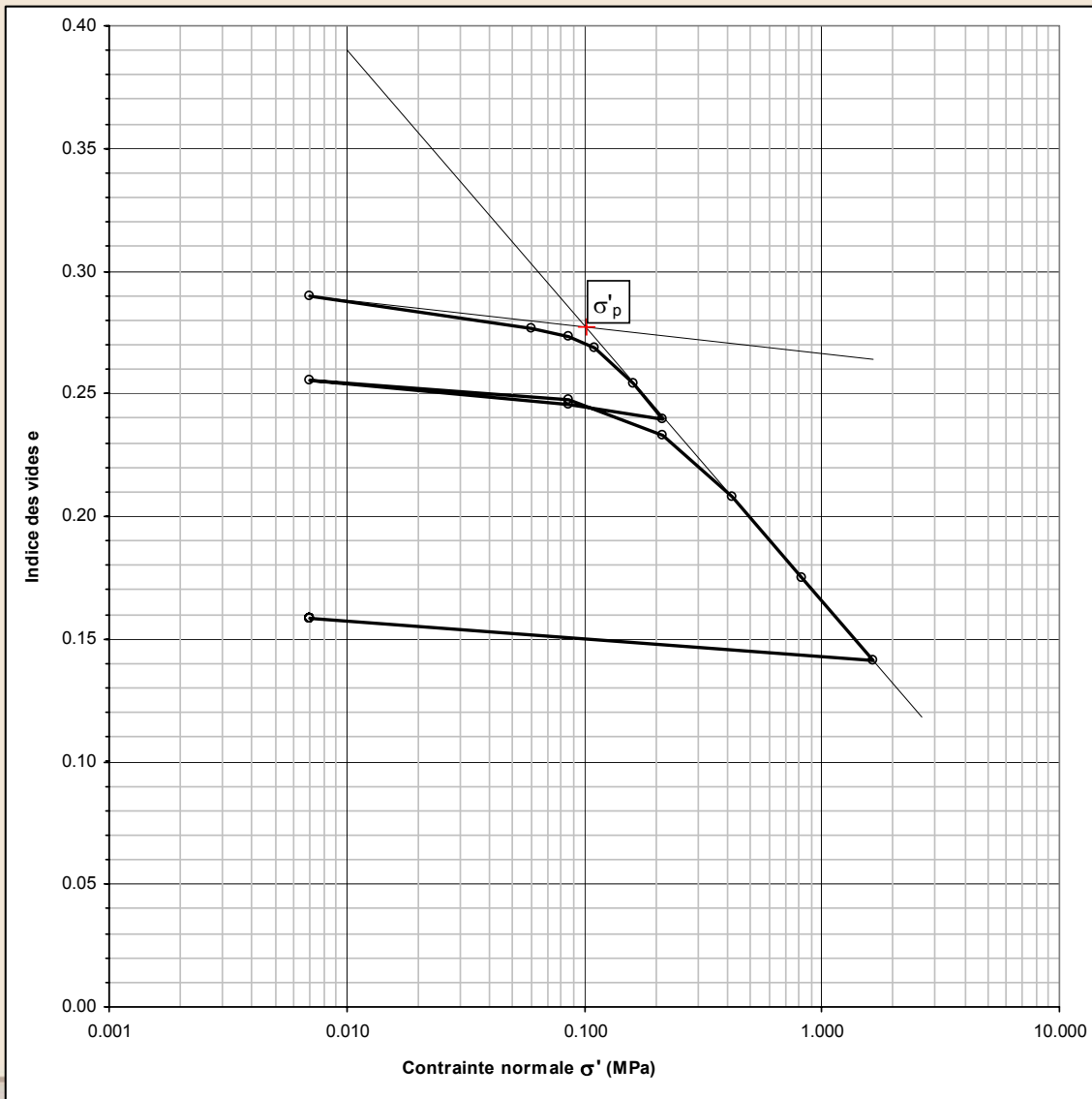
- σ_{vo} pression des terres (totale, estimée)
- $N_{kt} = 15$ à 16 pour des argiles normalement consolidées ($OCR < 2$)
- $N_{kt} = 18$ à 19 pour des argiles surconsolidées

SOLS COHERENTS (ARGILE)

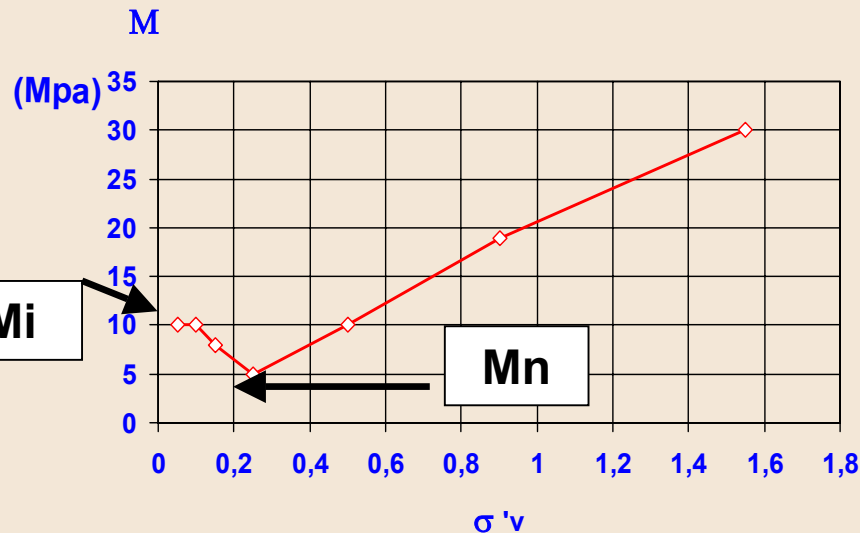
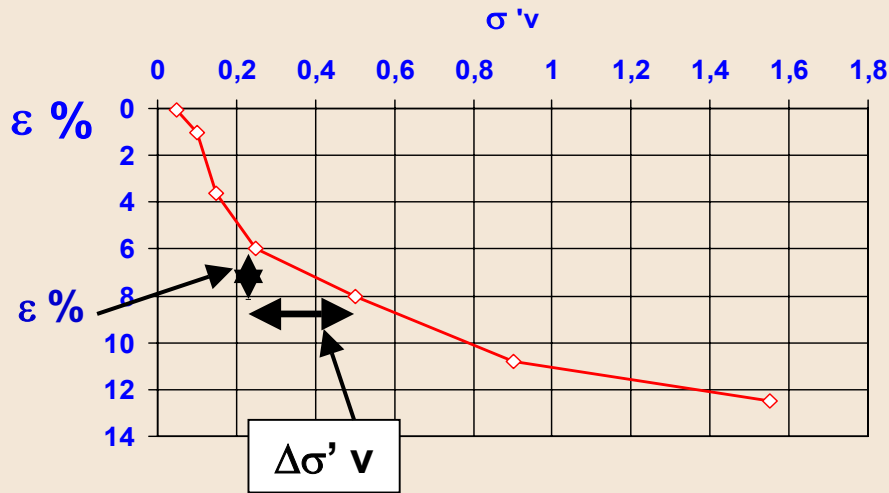


Détermination OCR avec Cu / σ'_{vo}

**Exemple:
Sol peu compressible**



$$M = \Delta \sigma' / \varepsilon$$



module oedométrique :

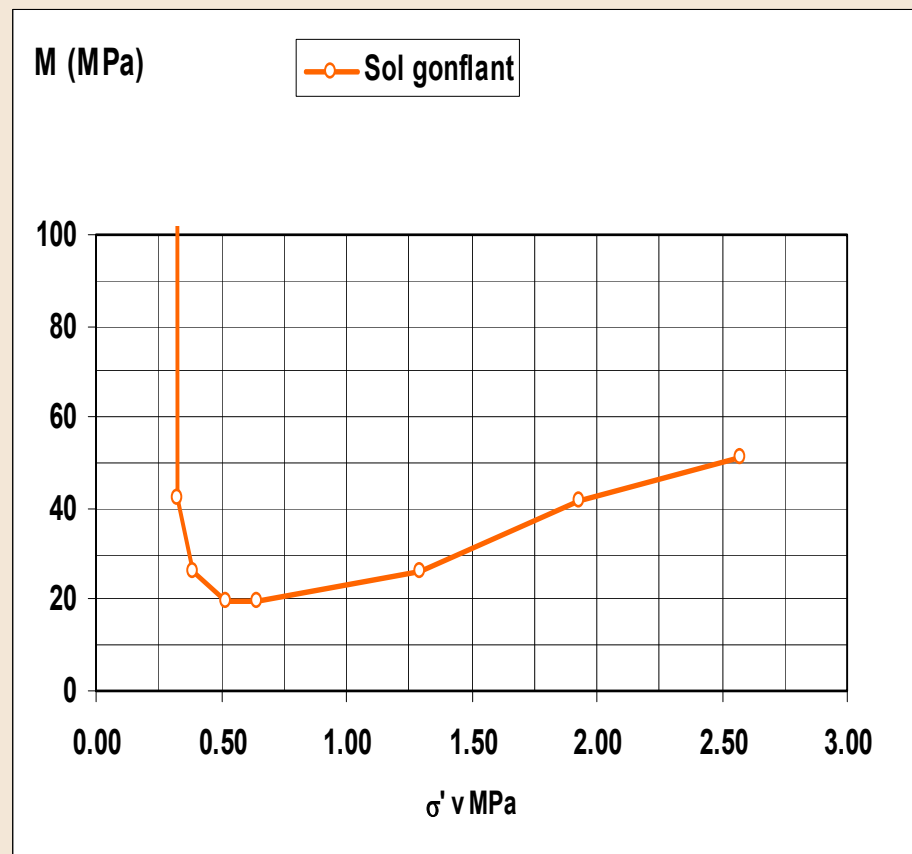
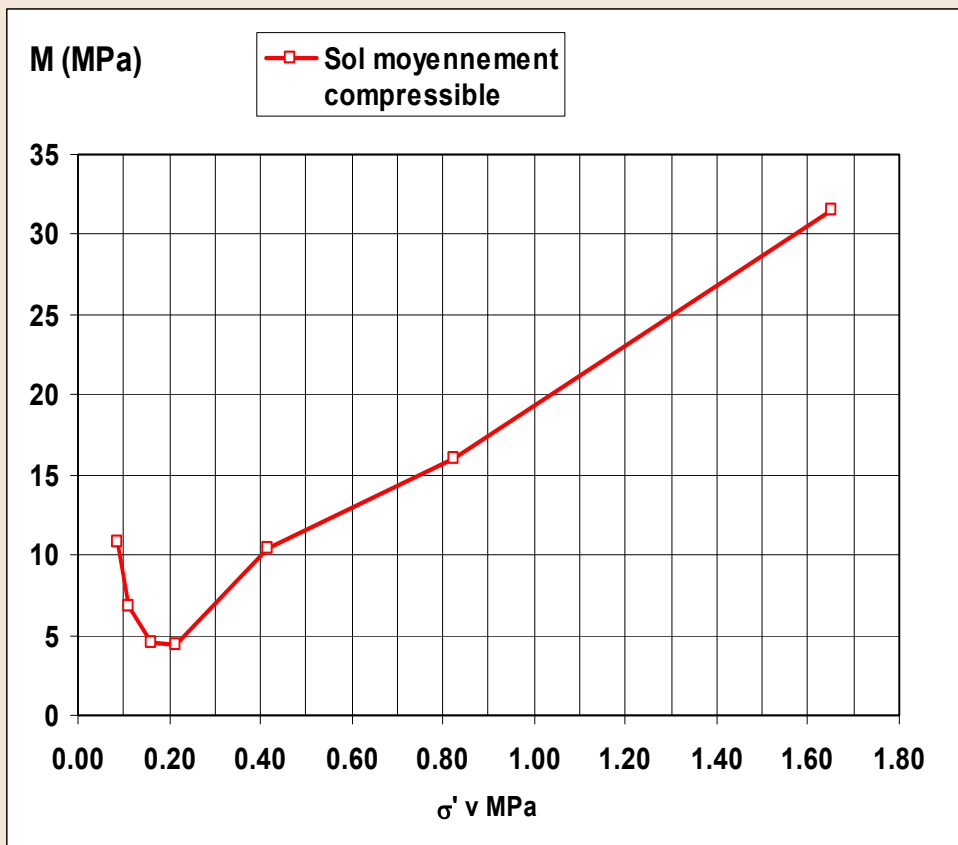
- $E_{oed} (M) = (F/S) / (\Delta h/h)$
 $= \sigma / (\Delta h/h)$
- à déformation latérale bloquée
- $m_v = 1/E_{oed}$

M_i (zone sur consolidée)

$>$

M_n (à $\sigma'p$)

Modules oedométriques



Zone normalement consolidée

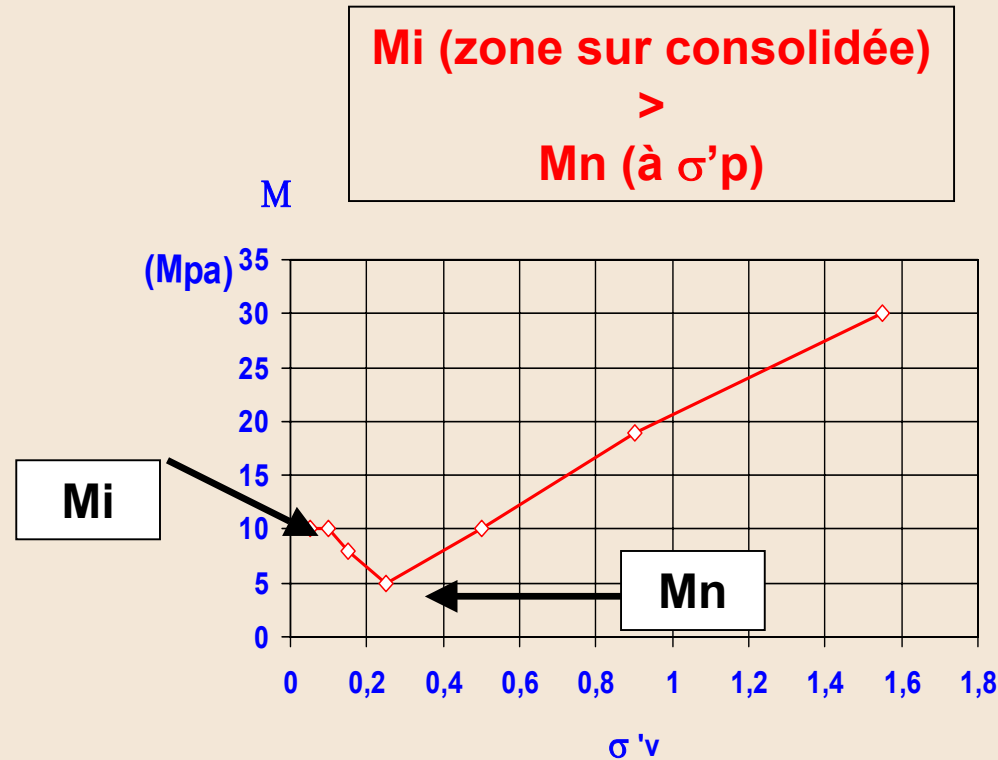
$$Mn = \alpha_n(qc - \sigma_{v0}) \quad 4 \leq \alpha_n \leq 8$$

$$\alpha_n = 5$$

Zone sur consolidée

$$Mi = \alpha_i(qc - \sigma_{v0}) \quad 5 \leq \alpha_i \leq 15$$

$$\alpha_i = 8$$





Exemple CPT

FUGRO GEOTECHNIQUE

SENS

CPT 16

Région Ile-de-France Nord

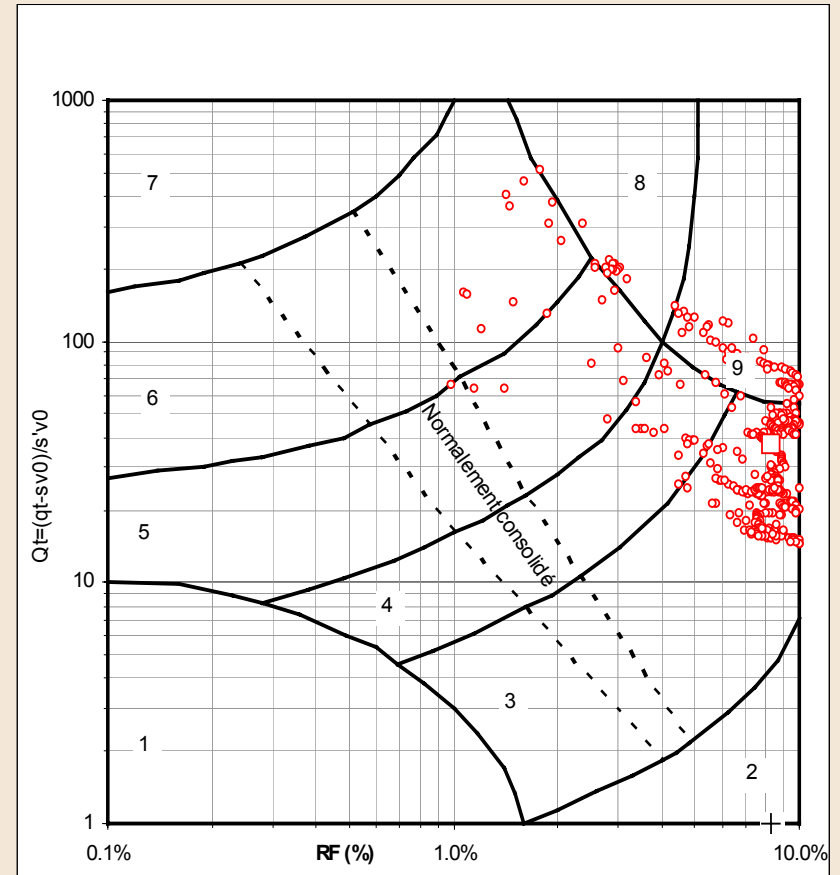
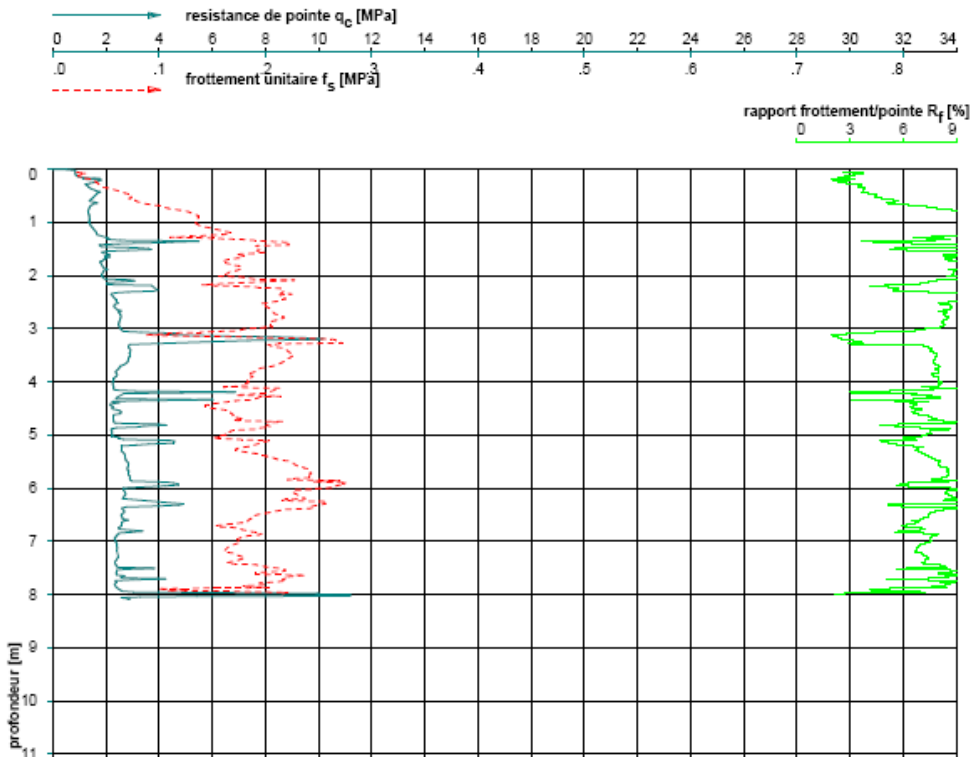
Rapport No: 411C376MK

Date: 15-Dec-2004

X:

Y:

Z:



FUGRO GEOTECHNIQUE
Région Ile de France Nord

Chantier : **LONGUEIL SAINTE MARIE**

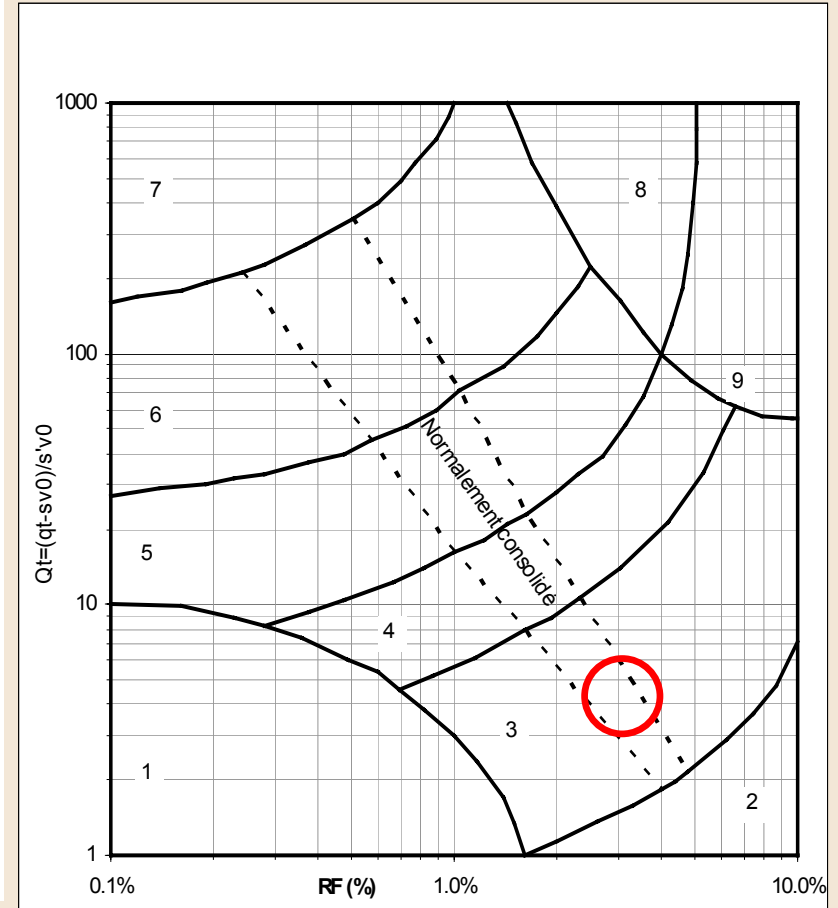
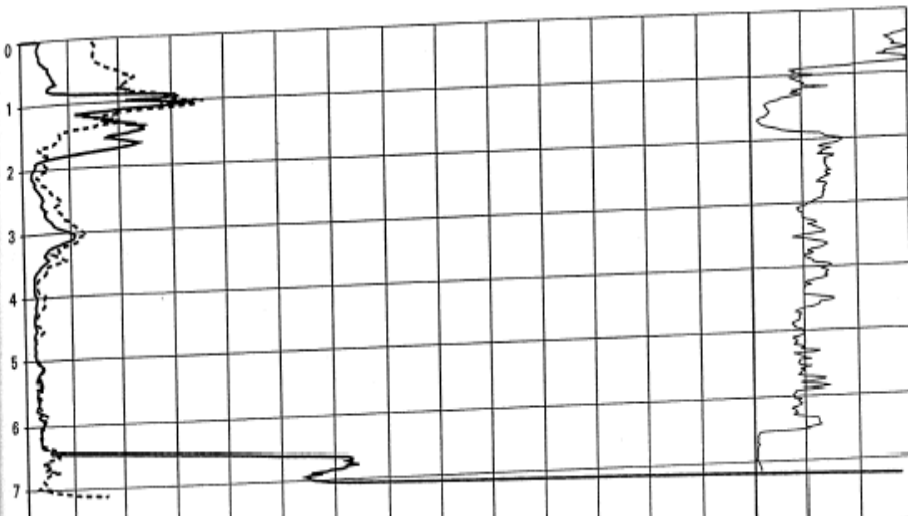
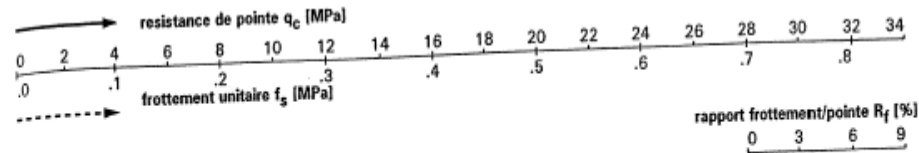
ZAC PARIS - OISE

Bâtiments B,C et D



CPT
D10
+31.09

dossier : 2 1 PJG 236 B



Définition :

- des couches normalement consolidées,
- des couches surconsolidées,
- des modules oedométriques correspondants.

Les approches de calculs peuvent être alors simplifiées :

- calcul sans colonnes ballastées
- calcul avec colonnes ballastées et sol homogénéisé.

- A ce stade, on ne peut se limiter uniquement à l'étude des colonnes ballastées et il importe d'étudier le complexe :
 - colonnes ballastées
 - matelas de répartition avec la couche de forme
 - dallage.
- En effet, nous sommes confrontés à plusieurs interventions (voire intervenants) :
 - l'entreprise spécialisée pour les colonnes ballastées
 - l'entreprise VRD qui va réaliser le matelas de répartition
 - le dallagiste ou l'entreprise générale.
- La solution la plus économique d'un projet n'est pas la solution la plus économique pour les 3 interventions.

Les questions à résoudre sont :

- le maillage des colonnes ballastées (profondeur déjà connue au niveau de la G12)
- les épaisseurs et la nature des différentes couches constituant le matelas en répartition (couche de répartition et couche de forme)
- l'épaisseur et les efforts dans le dallage



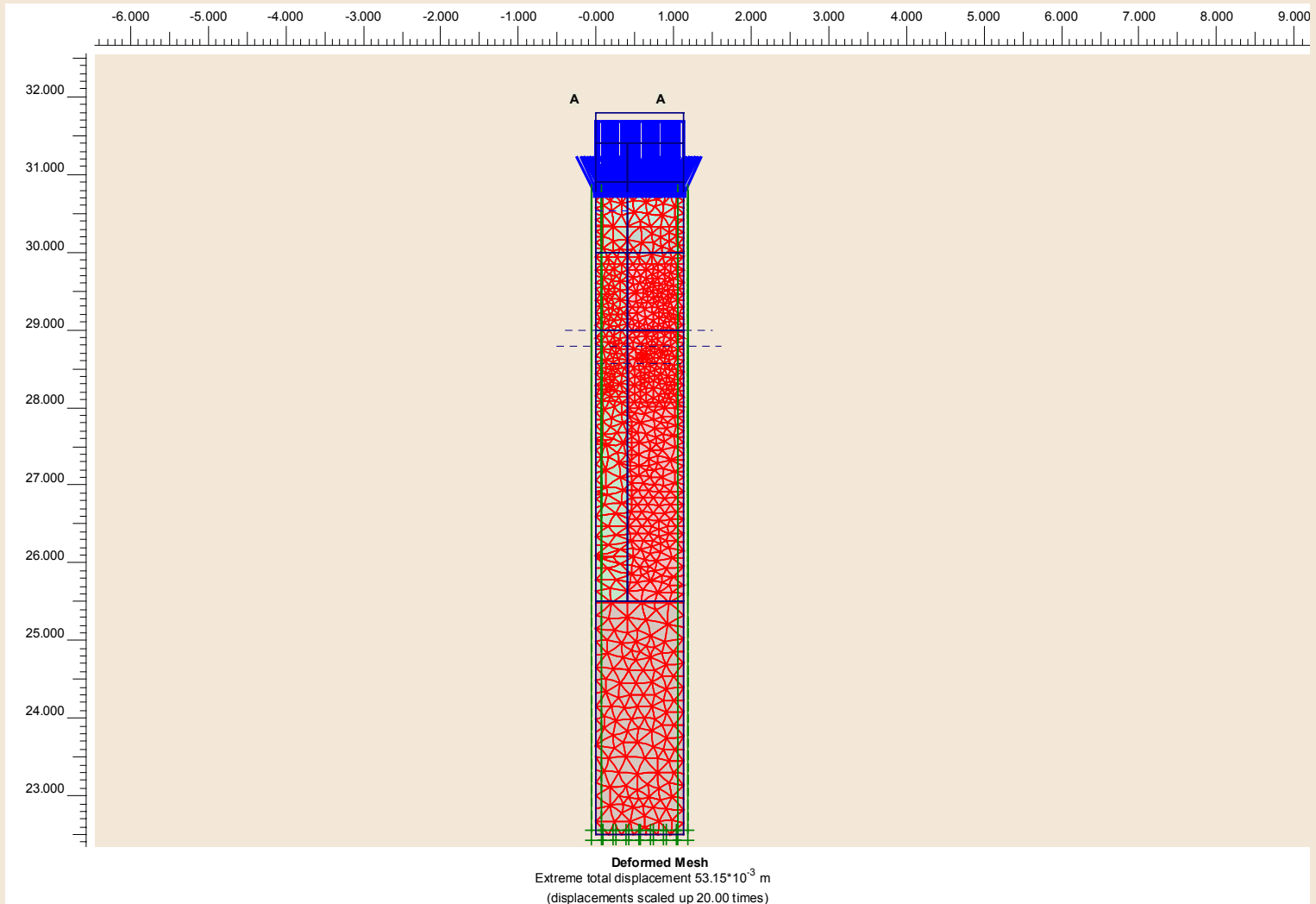
Nous allons montrer avec un exemple plusieurs résultats de calculs réalisés :

- en calcul axisymétrique
- en calcul 2D

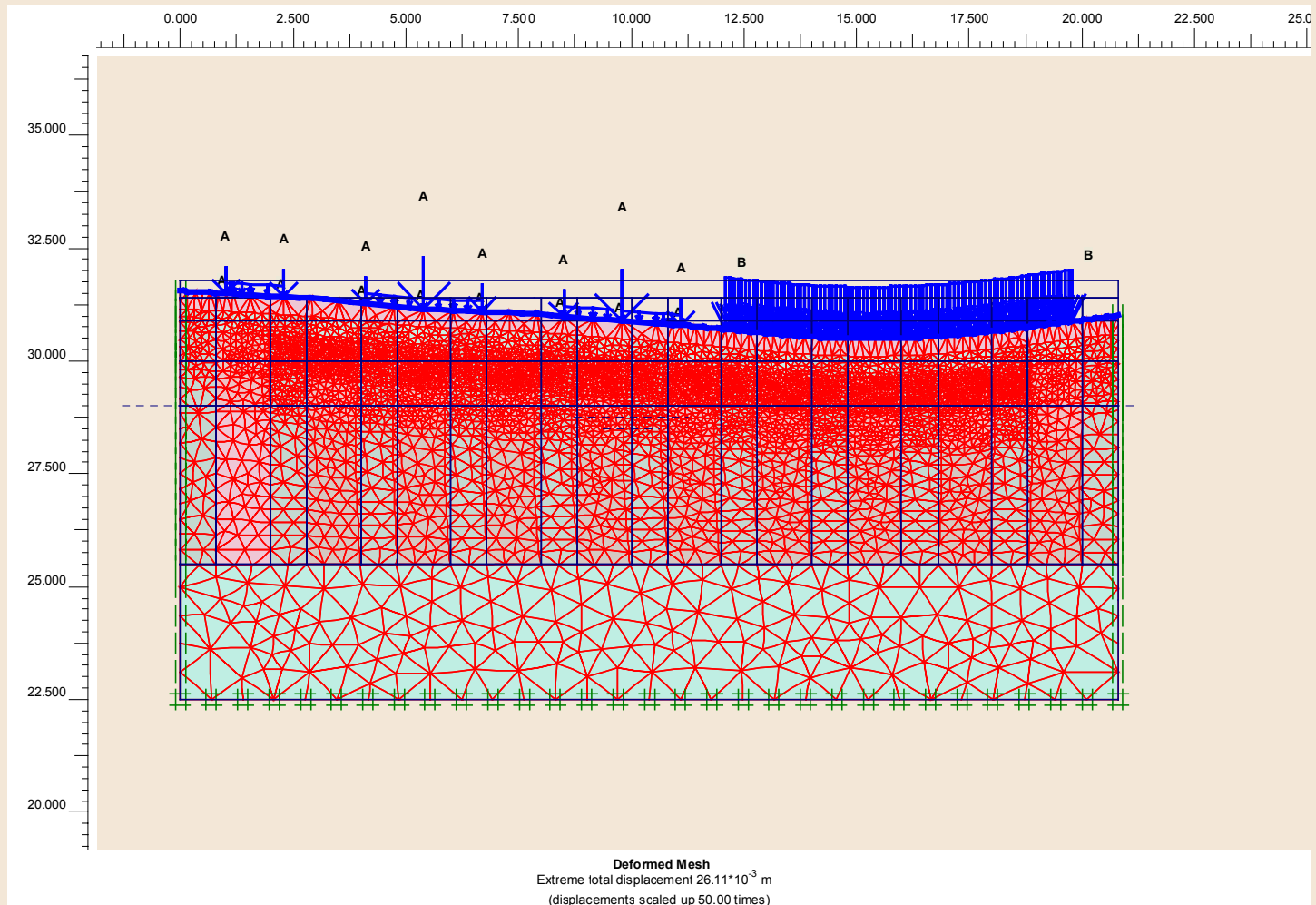


Exemples de calculs de colonnes ballastées

Calculs 1 à 4 : calculs axisymétriques avec une surcharge uniforme



Calculs 101 à 103 : calculs 2D avec une surcharge en vrac et en rack





Exemples de calculs de colonnes ballastées

- **Calcul 1** **Calcul axisymétrique**
- Colonnes $E=60 \text{ MPa}$ $\nu = 0.3$
- Remblais $E=15 / E= 6$ et $E= 1.85 \text{ MPa}$ $\nu =0.33$
- Rayon de la colonne $r = 0.40 \text{ m}$
- Rayon de la maille $r = 1.12 \text{ m}$ maille $2\text{m} \times 2\text{m}$
- **Résultats : $w = 5.3 \text{ cm}$ et $M= 0.1 \text{ tm/ml}$**



Exemples de calculs de colonnes ballastées

- **Calcul 2** **Calcul axisymétrique**
- Colonnes $E=60 \text{ MPa}$ $\nu = 0.49$
- Remblais $E=15 / E= 6$ et $E= 1.85 \text{ MPa}$ $\nu =0.33$
- Rayon de la colonne $r = 0.40 \text{ m}$
- Rayon de la maille $r = 1.12 \text{ m}$ maille $2\text{m} \times 2\text{m}$
- **Résultats :** **$w = 1 \text{ cm}$ et $M= 0.1 \text{ tm/ml}$**

Ce calcul est seulement là pour montrer que bien évidemment le coefficient de Poisson est très important pour ce type de schématisation.



Exemples de calculs de colonnes ballastées

- **Calcul 3** **Calcul axisymétrique**
- Colonnes $E=60 \text{ MPa}$ $\nu = 0.3$
- Remblais $E=15$ / $E= 6$ et $E= 1.85 \text{ MPa}$ $\nu =0.33$
- Rayon de la colonne $r = 0.40 \text{ m}$
- Rayon de la maille $r = 1.12 \text{ m}$ maille $2\text{m} \times 2\text{m}$
- **Tous les sols élastiques**
- **Résultats :** **$w = 2.4 \text{ cm}$ et $M= 0.12 \text{ tm/ml}$**

La non prise en compte de la plasticité peut réduire considérablement les déformations.



Exemples de calculs de colonnes ballastées

- **Calcul 4** **Calcul axisymétrique**
- **Sol homogène (barycentre des modules entre la colonne et le sol environnant)**
- Rayon de la colonne $r = 0.40$ m
- Rayon de la maille $r = 1.12$ m maille $2\text{m} \times 2\text{m}$
- **Résultats : $w = 1.9$ cm et $M = 0.00$ tm/ml**
- Un calcul en sol homogène réduit également les déformations.



Exemples de calculs de colonnes ballastées

- **Calcul 101** **Calcul 2D avec stockage vrac et rack**
- **Avec réduction également de Φ dans la colonne pour tenir compte de la troisième dimension**
- Rayon de la colonne $r = 0.40$ m
- Rayon de la maille $r = 1.12$ m maille 2m x 2m
- **Résultats vrac + rack :** **$w = 3.3$ cm et $M = 2.4$ tm/ml**
- **Résultats vrac seul :** **$w = 3.5$ cm et $M = 1.8$ tm/ml**



Exemples de calculs de colonnes ballastées

- **Calcul 102** **Calcul 2D avec stockage vrac et rack**
- Colonnes $E=60 \text{ MPa}$ $\nu = 0.30$
- Remblais $E=15$ / $E= 6$ et $E= 1.85 \text{ MPa}$ $\nu =0.33$
- Rayon de la colonne $r = 0.40 \text{ m}$
- Rayon de la maille $r = 1.12 \text{ m}$ maille $2\text{m} \times 2\text{m}$
- **Tous les sols élastiques**
- **Résultats vrac + rack :** **$w = 2.2 \text{ cm}$ et $M= 1.5 \text{ tm/ml}$**
- **Résultats vrac seul :** **$w = 2.2 \text{ cm}$ et $M= 1.3 \text{ tm/ml}$**



Exemples de calculs de colonnes ballastées

- **Calcul 103** **Calcul 2D avec stockage vrac et rack**
- **Sol homogène (barycentre des modules entre la colonne et le sol environnant)**
- Rayon de la colonne $r = 0.40$ m
- Rayon de la maille $r = 1.12$ m maille $2\text{m} \times 2\text{m}$
- **Résultats vrac + rack :** **$w = 1.5$ cm et $M = 1.40$ tm/ml**
- **Résultats vrac seul :** **$w = 1.5$ cm et $M = 0.95$ tm/ml**

On constate les points suivants :

- Les calculs en sol homogène ne permettent pas d'appréhender correctement les efforts dans le dallage, ce qui pose le problème général suivant :
On ne peut pas appliquer directement le DTU Dallage en considérant une homogénéisation du sol (sauf éventuellement en cas de matelas de répartition très épais).
- Les efforts maximaux dans le dallage peuvent être appréhendés avec un calcul 2D et sont obtenus entre une zone chargée en vrac et une zone non chargée, ce qui veut dire que malgré la complexité des cas de charges, les moments fléchissants maximaux sont obtenus entre une zone chargée et une zone non chargée.

Le géotechnicien a donc en charge de définir :

- le maillage et la profondeur des colonnes ballastées
- les épaisseurs et les caractéristiques des différentes couches appartenant au matelas de répartition
- l'épaisseur et les effets dans le dallage liés aux charges

Il faut intégrer également :

- le phasage avec éventuellement la présence de lots séparés
- les essais de réception et les critères de réception
- les formes de pente pour les plateformes, la « fermeture » des plateformes pour éviter ou minimiser leur altération.

Au stade de l'exécution, le géotechnicien a en charge :

- d'analyser et de donner un avis sur les notes d'exécution.
Il peut y avoir à ce stade des variantes entreprises ou adaptations maillage / matelas de répartition / autres. Dans tous les cas, il ne faut pas perdre de vue qu'il faut examiner le projet dans sa globalité. Une économie sur les colonnes ballastées (maillage) peut entraîner un surcoût important sur les autres ouvrages (dallage, épaisseur et ferrailage).
- le contrôle d'exécution.



Au stade de l'exécution (G3 et G4)

Les recommandations précitées font état des contrôles suivants :

- contrôle de diamètre
- contrôle de continuité
- contrôle de compacité
- essai de chargement.



Au stade de l'exécution (G3 et G4)

Les principales difficultés sont liées :

- aux contrôles de continuité
- aux contrôles de compacité

Les essais CPT constituent effectivement un bon outil pour ce contrôle.



Au stade de l'exécution (G3 et G4)

Pour que le contrôle soit pertinent, la mesure de la résistance de pointe doit être accompagnée :

- du frottement sur manchon, ce qui permettra de calculer le friction ratio et de déterminer dans quel type de matériau la résistance de pointe est mesurée
- l'inclinaison du cône, ce qui permettra de vérifier si le train de tiges dévie et sort de la colonne ballastée.

(La mesure du frottement sur manchon et de l'inclinaison ne sont pas systématiques avec la norme NFP 94-113.)



Au stade de l'exécution (G3 et G4)

- Le CPT est un outil très appréciable pour le contrôle de la compacité.
- Il est difficile toutefois de contrôler des colonnes ballastées profondes – supérieur à 15 mètres par exemple – car il y a un risque très important de sortir ou d'être tangent à la colonne.
- La profondeur et la continuité de la colonne ne peuvent être garanties que par l'entreprise d'exécution et les enregistrements éventuels des paramètres, en particulier pour les colonnes supérieures à 15 mètres.

Fréquence essais (extrait des recommandations précitées)

Fluide de lançage	EAU		AIR	
	Avec enregistrement	Sans enregistrement	Avec enregistrement	Sans enregistrement
Contrôle diamètre	1 par tranche de 50 colonnes jusqu'à 100, minimum 3 au-delà			
Contrôle continuité	1/50	1/20	Seulement en cas d'anomalie	1/50
Contrôle compacité	1/80 sous dallage ou radier + 1/20 sous massif avec un minimum de 5			
Essai chargement	1 essai jusque 800m et un autre par tranche au-delà		1 essai jusque 2000m et 400 colonnes et un autre au moins au-delà	

LONGUEIL SAINTE MARIE
Bâtiment B

Réf. dossier 511C278c DM

Page n° 1

Essai de pénétration statique

CPT électrique (norme NFP 94-113)

Pointe 44 mm Type et n° F7.5CKE/V 1649

Sections: Pointe 1500 mm² Manchon 20002 mm²



12112

Date d'exécution: 03-Aug-2006

Dessinateur: OME

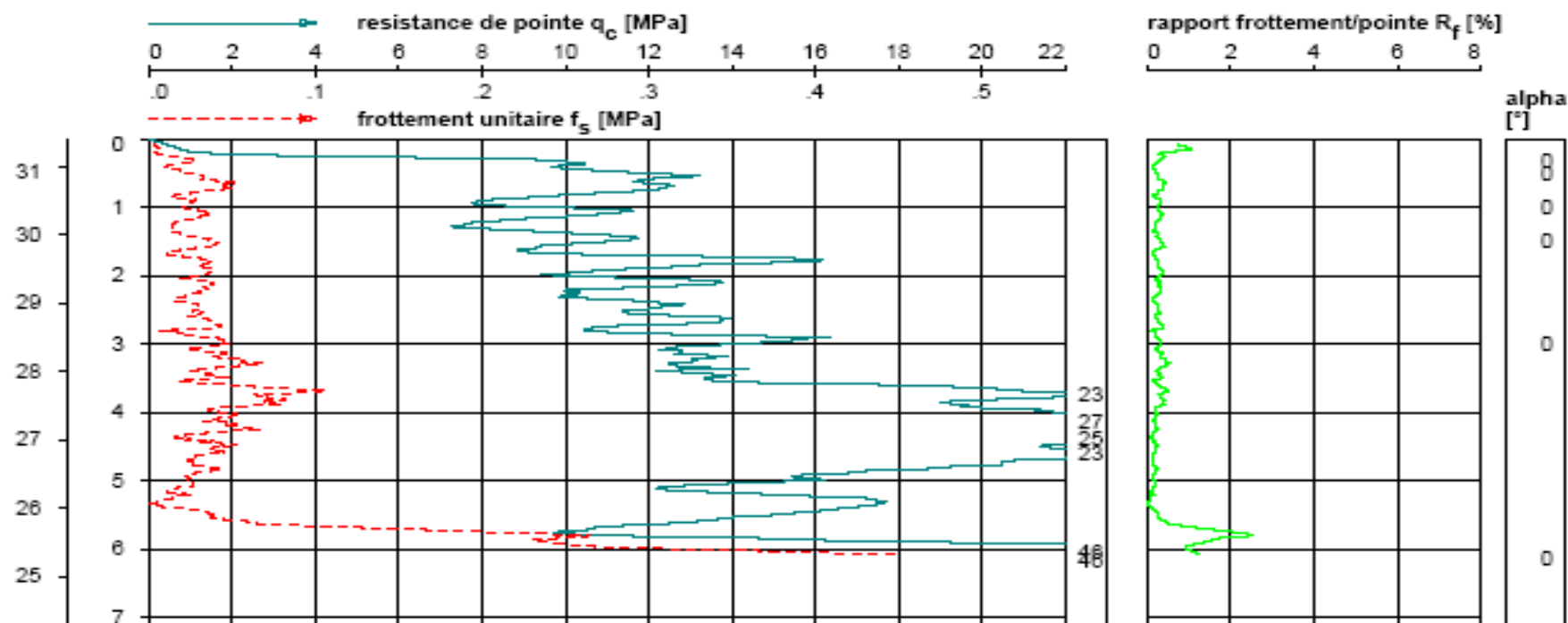
Opérateur: JARVIS

Fin sondage: 6.19 m

X=

Y=

Z= +31.40 mNGF



LONGUEIL SAINTE MARIE
Bâtiment B

Réf. dossier 511C278c DM

Page n° 1

Essai de pénétration statique CPT électrique (norme NFP 94-113)

Pointe 44 mm Type et n° F7.5CKE/V 1724

Sections: Pointe 1500 mm² Manchon 20002 mm²



10127

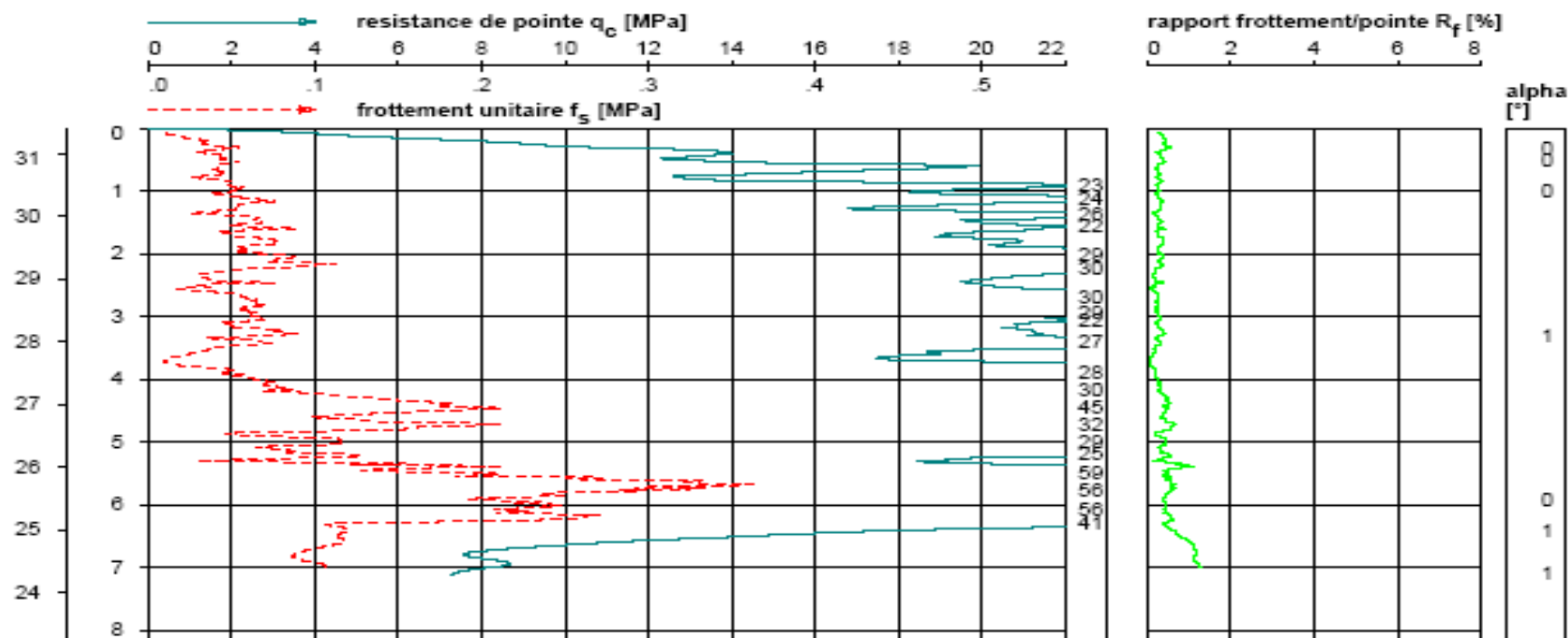
Date d'exécution: 27-Jun-2006

Dessinateur: OME

Opérateur: canu

Fin sondage: 7.12 m

X= Y= Z= +31.40 mNGF



LONGUEIL STE MARIE

Bâtiment B

Réf. dossier 511C278c DM

Page n° 1

Essai de pénétration statique CPT électrique (norme NFP 94-113)

Pointe 44 mm Type et n° F7.5CKE/V 1709
Sections: Pointe 1500 mm² Manchon 20002 mm²



7871.

Date d'exécution: 09-Jun-2006

Dessinateur: OME

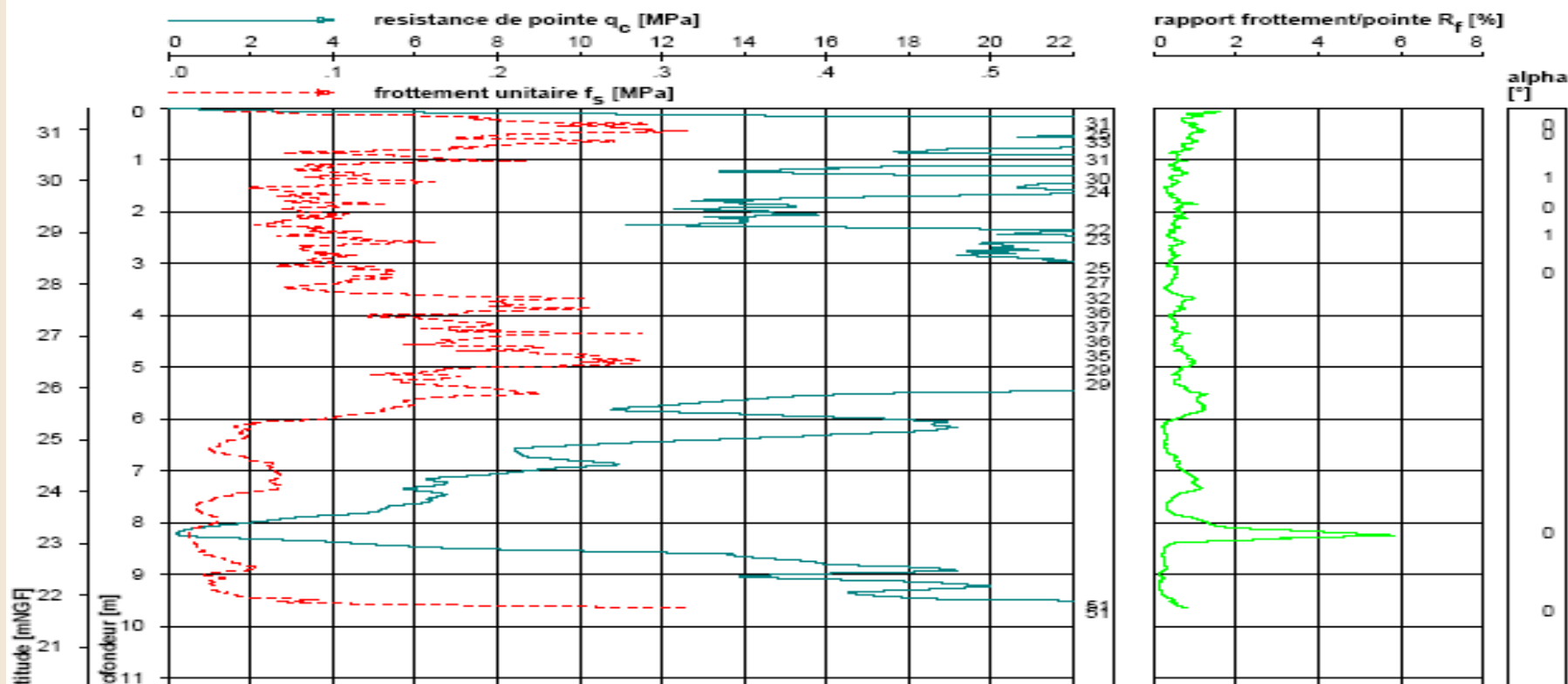
Opérateur: JARVIS

Fin sondage: 9.75 m

X=

Y=

Z= +31.40 mNGF



LONGUEIL SAINTE MARIE
Bâtiment B

Réf. dossier 511C278c DM

Page n° 1

Essai de pénétration statique CPT électrique (norme NFP 94-113)

Pointe 44 mm Type et n° F7.5CKE/V 1724

Sections: Pointe 1500 mm² Manchon 20002 mm²



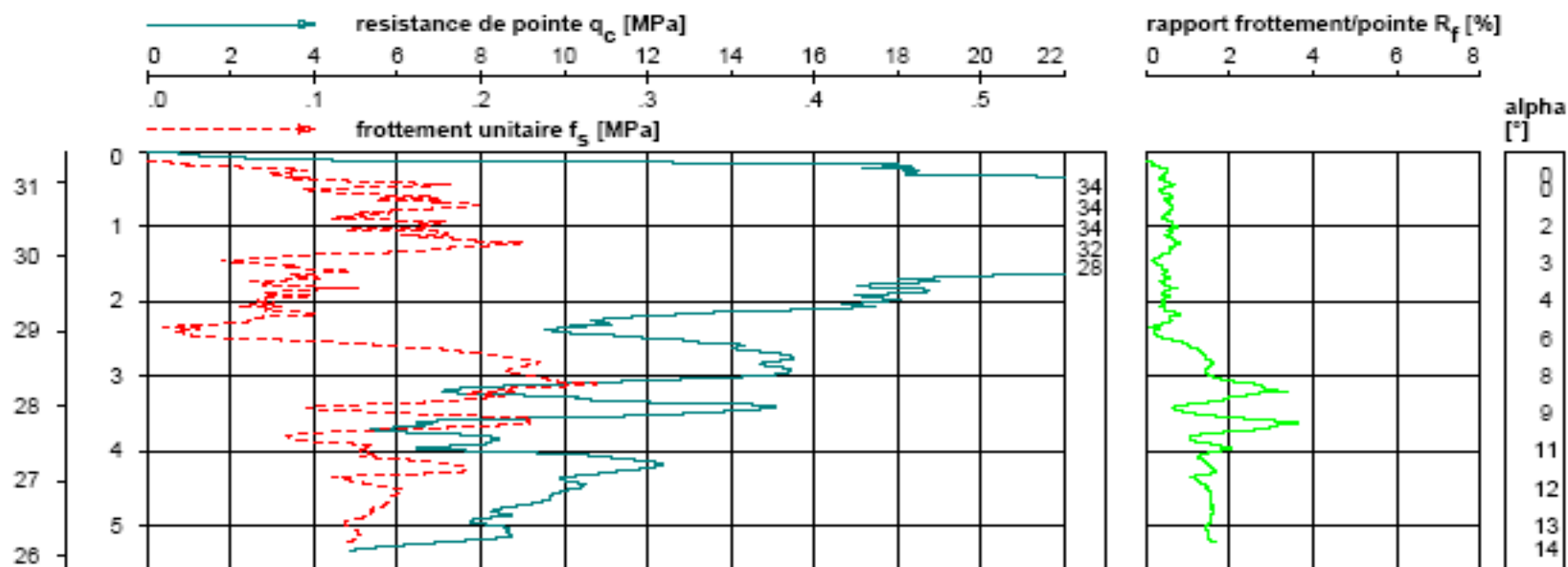
12413

Date d'exécution: 22-Jun-2008

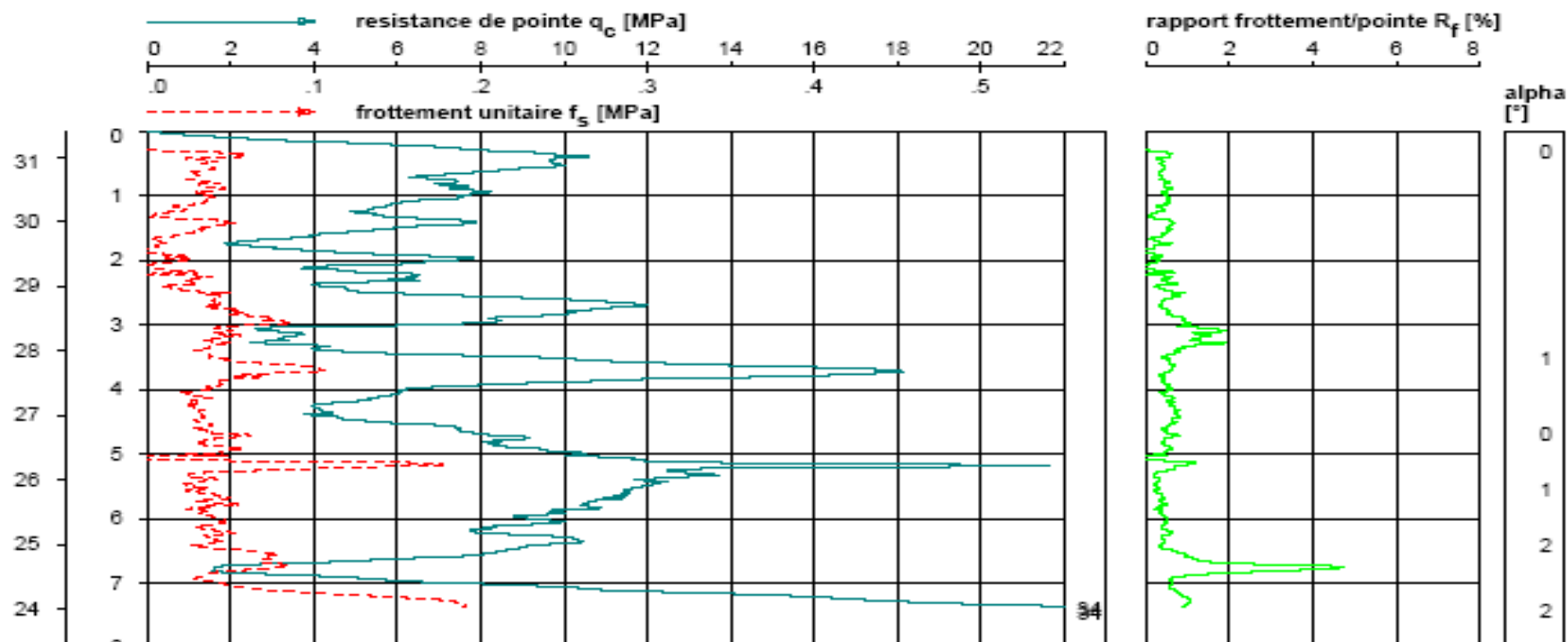
Dessinateur: OME

Opérateur: JARVIS Fin sondage: 5.32 m

X= Y= Z= +31.40 mNGF



LONGUEIL STE MARIE Bâtiment B Réf. dossier 511C278c DM Page n° 1	Essai de pénétration statique CPT électrique (norme NFP 94-113) Pointe 44 mm Type et n° F7.5CKE/V 1649 Sections: Pointe 1500 mm² Manchon 20002 mm²	 7506 Date d'exécution: 03-Aug-2006 Dessinateur: OME Opérateur: JARVIS Fin sondage: 7.47 m X= Y= Z= +31.40 mNGF
--	--	--



LONGUEIL SAINTE MARIE
Bâtiment B

Réf. dossier 511C278c DM

Page n° 1

Essai de pénétration statique CPT électrique (norme NFP 94-113)

Pointe 44 mm Type et n° F7.5CKE/V 1710

Sections: Pointe 1500 mm² Manchon 20002 mm²



8304

Date d'exécution: 18-Jul-2006

Dessinateur: OME

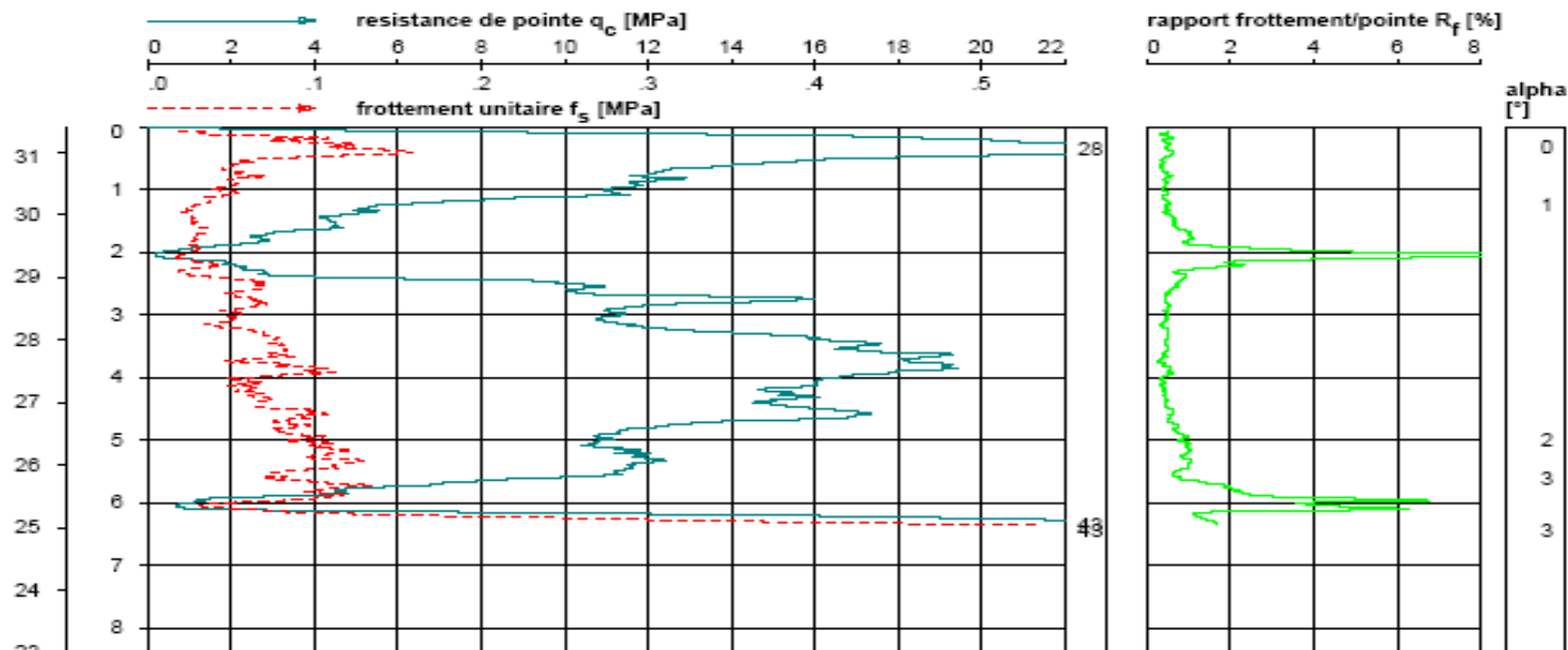
Opérateur: JARVIS

Fin sondage: 6.47 m

X=

Y=

Z= +31.40 mNGF



LONGUEIL SAINTE MARIE
Bâtiment B

Réf. dossier 511C278c DM

Page n° 1

Essai de pénétration statique CPT électrique (norme NFP 94-113)

Pointe 44 mm Type et n° F7.5CKE/V 1649

Sections: Pointe 1500 mm² Manchon 20002 mm²



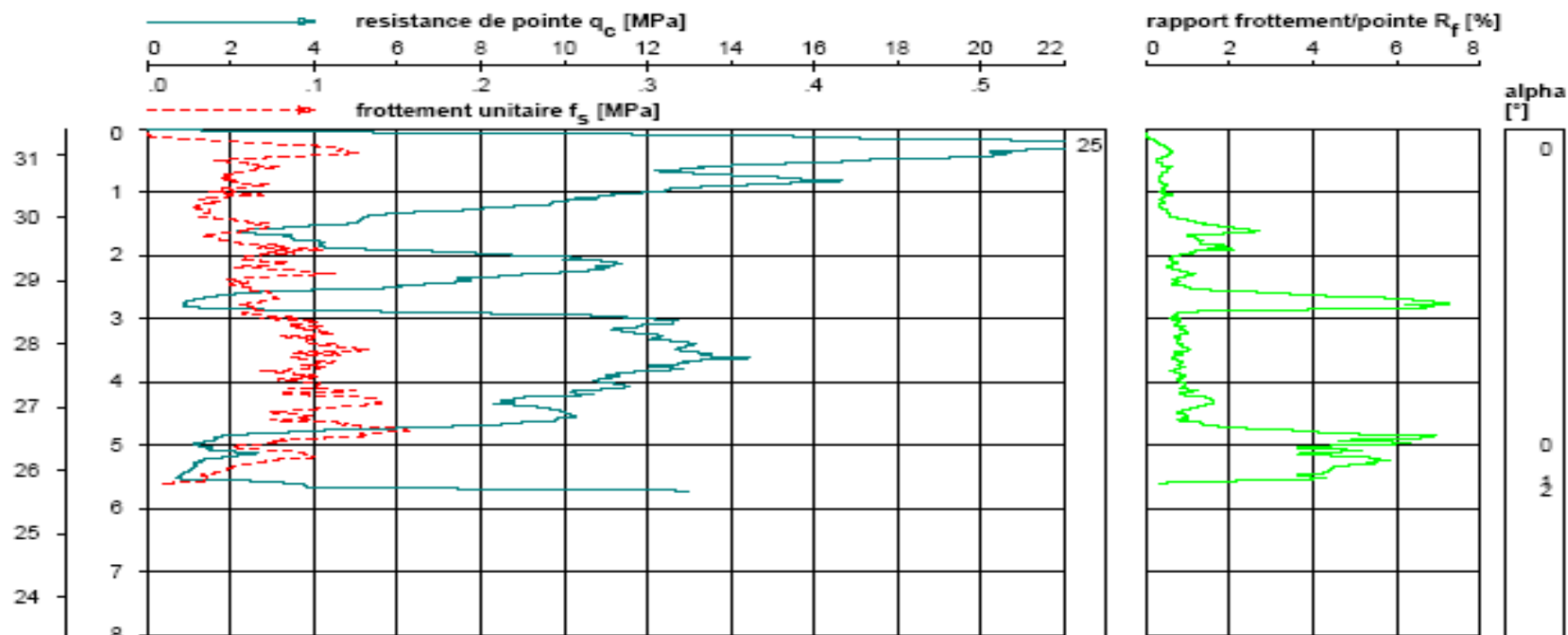
10073

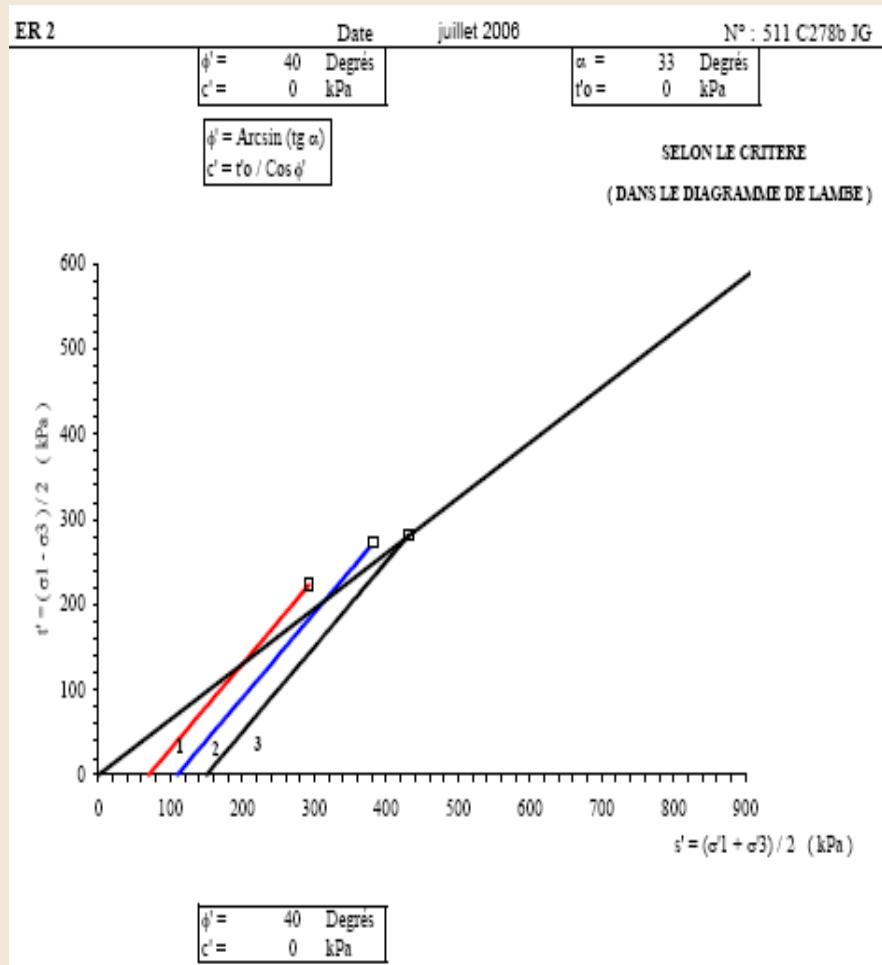
Date d'exécution: 03-Aug-2006

Dessinateur: OME

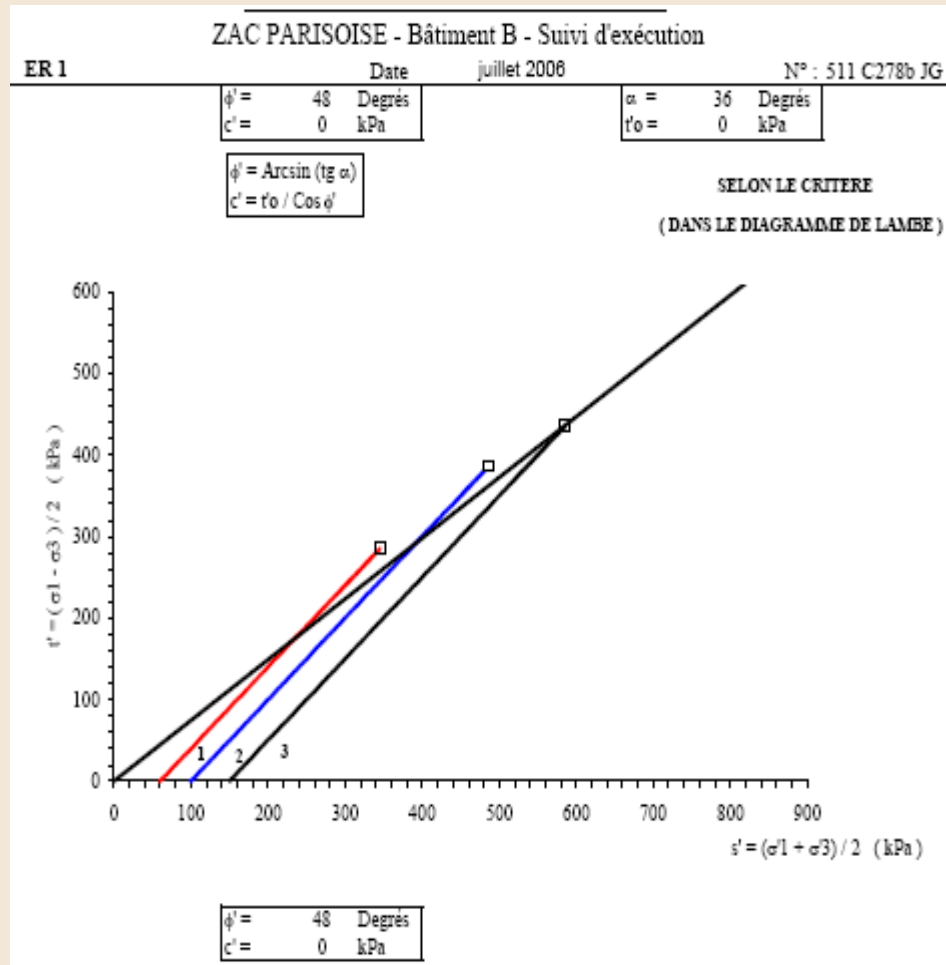
Opérateur: JARVIS Fin sondage: 5.72 m

X= Y= Z= +31.40 mNGF

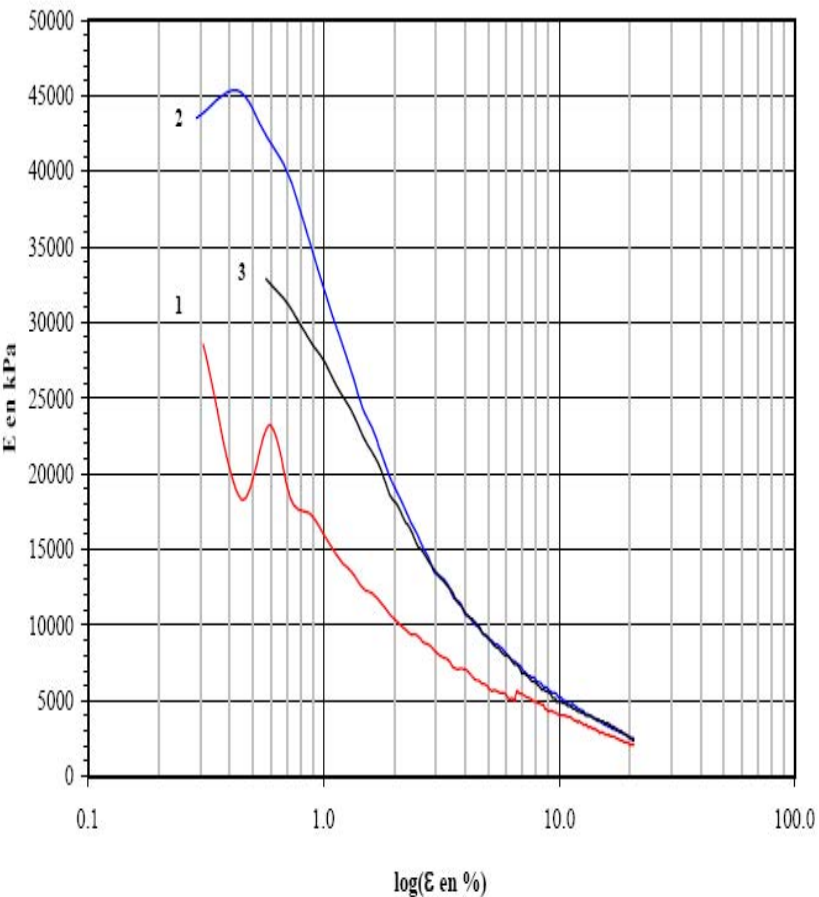




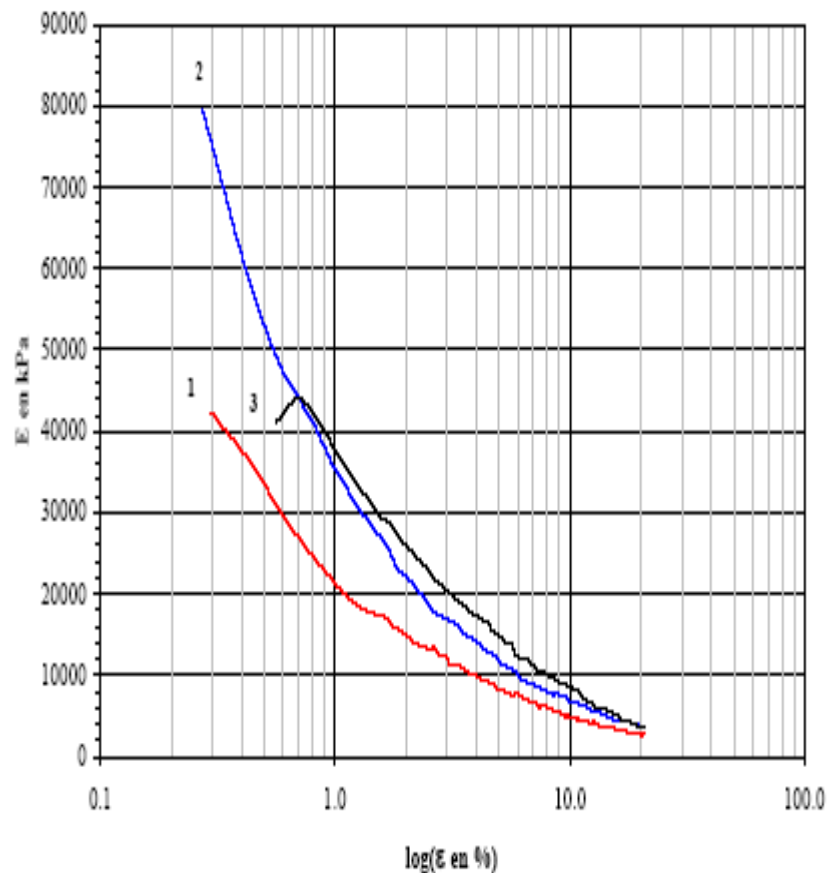
matériaux roulés



matériaux concassés



matériaux roulés



matériaux concassés



Merci pour votre attention