



[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

## PROCEEDINGS

### **Journée d'étude** **« La pratique du pressiomètre en Belgique »**

28.09.2017



# Journée d'étude

## La pratique du pressiomètre en Belgique



www.sbgimr-bvigrm.be



www.normes.be/geotechnique



www.bggg-gbms.be

### PROGRAMME : SESSION 1 – L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE EN Belgique

09h00-09h30	<b>Accueil</b>
09h30-09h40	<b>Introduction</b> par le Président de la SBGIMR ( <i>Ph. Welter, SWP</i> )
09h40-10h00	<b>Le rôle du professeur A. Van Wambeke dans la promotion du pressiomètre Ménard en Belgique</b> ( <i>J-F. Thimus, UCL</i> )
10h00-10h30	<b>L'essai pressiométrique aujourd'hui en Belgique</b> ( <i>G. Jaspar, SPW</i> )
10h30-11h00	<b>PAUSE</b>
11h00-11h25	<b>Les aspects technologiques du pressiomètre</b> ( <i>MM. Varaskin et Brechot, Apageo</i> )
11h25-11h50	<b>La qualité d'exécution est déterminante</b> ( <i>MM. V. Fiquet – OREX et R. Heintz – Eurasol</i> )
11h50-12h15	<b>Exploitation des mesures pressiométriques vers des paramètres</b> ( <i>P. Debauche et N. Lambert, Tractebel</i> )
12h15-13h30	<b>LUNCH</b>



**PROGRAMME : SESSION 2 – LES METHODES DE CALCULS BASEES SUR L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE**

13h30-13h40	<b>Introduction</b> par le Président du GBMS ( <i>M. Bottiau – Franki Foundations</i> )
13h40-14h00	<b>L'utilité d'un cadre normatif belge</b> ( <i>N. Huybrechts, CSTC-WTCB-BBRI</i> )
14h00-14h35	<b>Dimensionnement des fondations superficielles</b> ( <i>N. Charue – Geocos</i> )
14h35-15h00	<b>PAUSE-CAFE</b>
15h00-15h35	<b>Dimensionnement des fondations profondes</b> ( <i>M. Allani, CSTC-WTCB-BBRI</i> )
15h35-15h55	<b>Cases histories</b> ( <i>G. Laurent – Franki Foundations</i> )
15h55-16h15	<b>Cases histories</b> ( <i>P. Debauche – Tractebel</i> )
16h15-16h20	<b>CONCLUSIONS DE LA JOURNEE</b>
16h20-17h00	Verre de l'amitié



# Introduction à la JE du 28 09 2017

(Ph. WELTER – Président de la SBGIMR)

## La pratique du pressiomètre en Belgique

### 3 motifs et objectifs

- Hommage au Professeur A. Van Wambeke
- Suites à la JE du 24 février 2011
- Développement des méthodes de calcul pour les fondations superficielles et profondes



[www.sbgimr-bvigm.be](http://www.sbgimr-bvigm.be)



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)







[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

# **Le rôle du professeur A. Van Wambeke dans la promotion du pressiomètre Ménard en Belgique**

*J-F. Thimus, UCL*



# Le rôle du professeur A. Van Wambeke dans la promotion du pressiomètre Ménard en Belgique



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



1

## Louis Ménard



Louis Ménard à sa table de travail (1974)  
au Centre d'Études Géotechniques de Paris  
(Saulx-les-Chartreux, près de Longjumeau, Essonne, France)



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



2

# Développement du pressiomètre en Belgique

- Van Wambeke A. (1990) – Trente ans de pressiomètre, de la théorie à la pratique, aller et retour, Bulletin de Liaison des Laboratoires des P & C, Paris, Janv.-Fev. 1990, pp.93-99, introduction de S. Amar, division de la Mécanique des sols et Fondations, LCPC.
- Van Wambeke A. (2005) – Cinquante ans de pressiométrie ISP5 – PRESSIO 2005, Symposium international - 50 ans de pressiomètre, LCPC, Vol 2, p 51-52
- 



# Calcul des tassements à partir de l'essai pressiométrique

- Rooryck, R., Temmerman, M., Van Wambeke A. (1979) Les fondations de l'ouvrage de rachat de la chute de Ronquières\*, Sols – Soils, Paris, N°29
- Cordary, D., Gambin M., Van Wambeke A. (1981) - Prédiction des tassements à l'aide du Pressiomètre, X ICSMFE, Stockholm



# Les corrélations entre essais géotechniques

- Van Wambeke A.(1962)  
Méthodes d'investigations des sols en place,étude d'une campagne d'essais comparatifs. Sols – Soils 2
- Van Wambeke A. (1975) – Les corrélations entre caractéristiques géotechniques, Annales des Travaux Publics de Belgique, N°4
- Van Wambeke A. (1980) Comparaison entre observation et prévision de la capacité portante et des tassements des pieux isolés battus dans une argile raide et fissurée à partir des essais pressiométriques, Sols – Soils, Paris, N°33, 1980, suivi d'une discussion de M. Gambin.



# Les corrélations entre essais géotechniques

- Van Wambeke A., d'Hemricourt J. (1982)  
Correlation between the results of static or dynamic probings and pressuremeter tests, in Proceedings of the second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam,
- Van Wambeke, A., d'Hemricourt, J. (1988) - Corrélation entre les mesures et les prévisions de la capacité portante et du tassement de pieux forés chargés axialement par application des méthodes pressiométriques, 1st International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent



# Interprétation de la courbe pressiométrique

- Van Wambeke A., d'Hemricourt J. (1974) Exploitation des résultats donnés par les essais géotechniques.  
*MINISTÈRE DE LA DEFENSE NATIONAL C.C.A.S. F26 – Rapport partiel*
- Van Wambeke A., d'Hemricourt J. (1978) - Courbes pressiométriques inverses : Méthode d'interprétation de l'essai pressiométrique. *SOLS-SOILS (VII), 25, 15-25*
- Van Wambeke A., d'Hemricourt J. (1978) - Evolution dans l'interprétation de l'essai pressiométrique. *Proceeding of the II International Congress I.A.E.G.. Madrid, 4-8 septembre 1978, Sec IV, vol 1, 91-98.*



# Interprétation de la courbe pressiométrique

- Van Wambeke A., d'Hemricourt J. (1979) - Méthode globale d'interprétation de l'essai pressiométrique.  
*Compte rendus de la 7ème Conférence Européenne de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations.*  
*BRITISH GEOTECHNICAL SOCIETY - vol 22, 279-282.*
- d'Hemricourt J. (2005) - L'interprétation de l'essai pressiométrique de la courbe inverse à la double hyperbole.  
*ISP5 - PRESSIO 2005, Symposium international - 50 ans de pressiomètre, LCPC, Vol 1, p 319-328*





[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

# L'essai pressiométrique aujourd'hui en Belgique

*G. Jaspar, SPW*



Wallonie  
infrastructures  
SPW  
Ir G. JASPAR

## L'essai pressiométrique aujourd'hui en Belgique. Cas d'applications.



[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

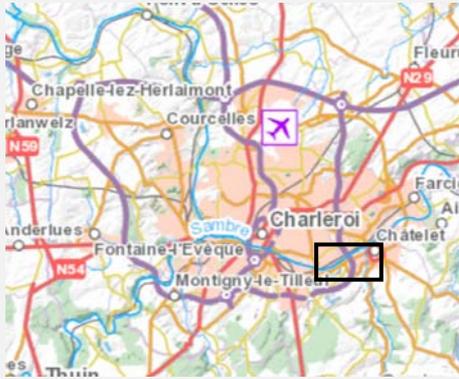


### Trois exemples d'applications du pressiomètre :

1. Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi;
2. Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer;
3. Phase 2 du contournement de Couvin - Pertuis de la Tauminerie.



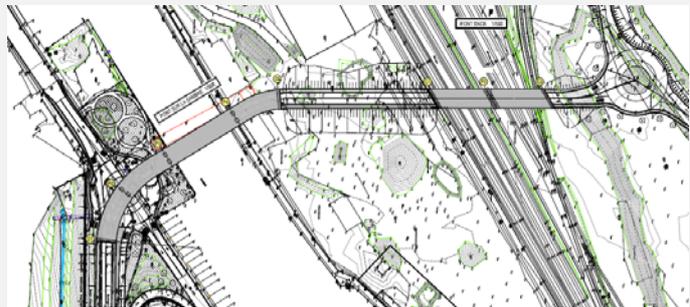
## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi



## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

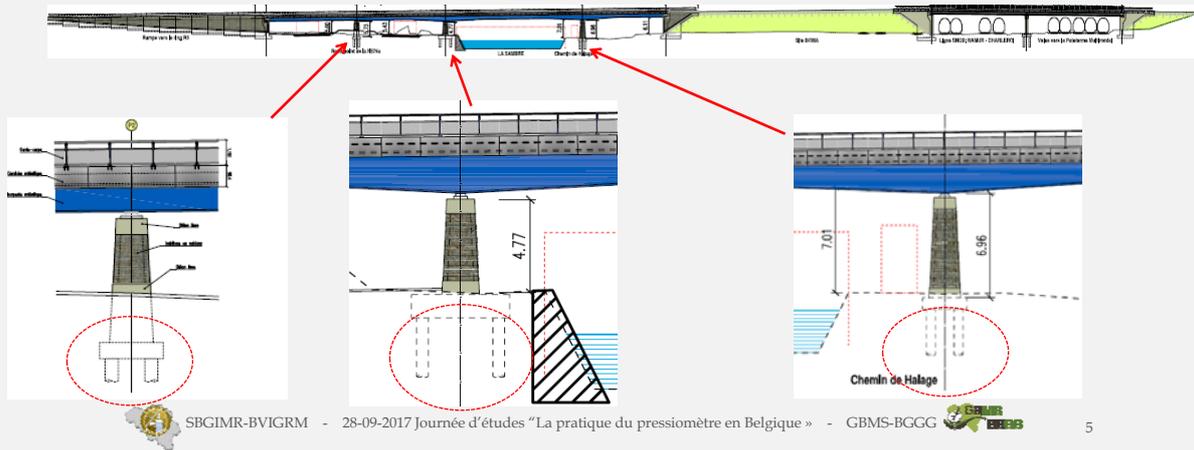
### Nature des ouvrages à réaliser :

1. Ouvrage d'art continu sur RP N576/N576A sur la Sambre et sur site industriel;
2. Ouvrage d'art sur voies de chemin de fer.



## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

Les piles intermédiaires doivent être fondées dans le bedrock (contexte géologique).

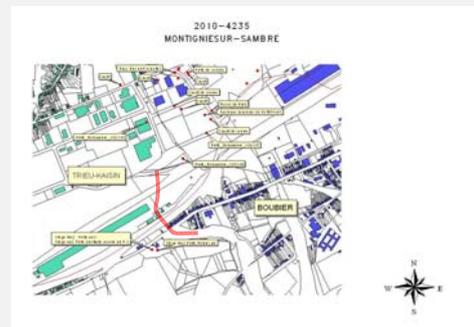


5

## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

Contexte géologique:

- Puits de mines répertoriés au droit du site;
- En surface remblais issus de l'exploitation du charbon et de l'industrie;
- Alluvions limoneuses et sablo-graveleuses;
- Bedrock Houiller constitué de schistes, de grès et de houille;
- Le toit du bedrock peut être altéré voire décomposé en argile sableuse.



6

## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

Campagne géotechnique – phase 1:

Essais de pénétration statique sous les piles et les culées de l'ouvrage

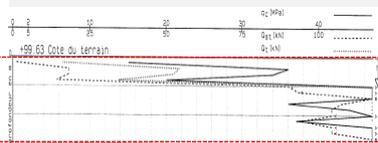
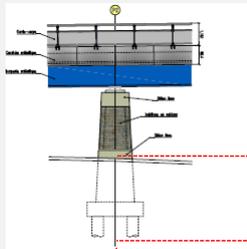
Objectifs :

1. Paramètres géotechniques ( $q_c$  et  $Q_{st}$ ) des différentes couches;
2. Epaisseurs des couches;
3. Niveau du toit du bedrock.



## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

Campagne géotechnique – phase 1 – résultats – CPT.2 (centre du RP):

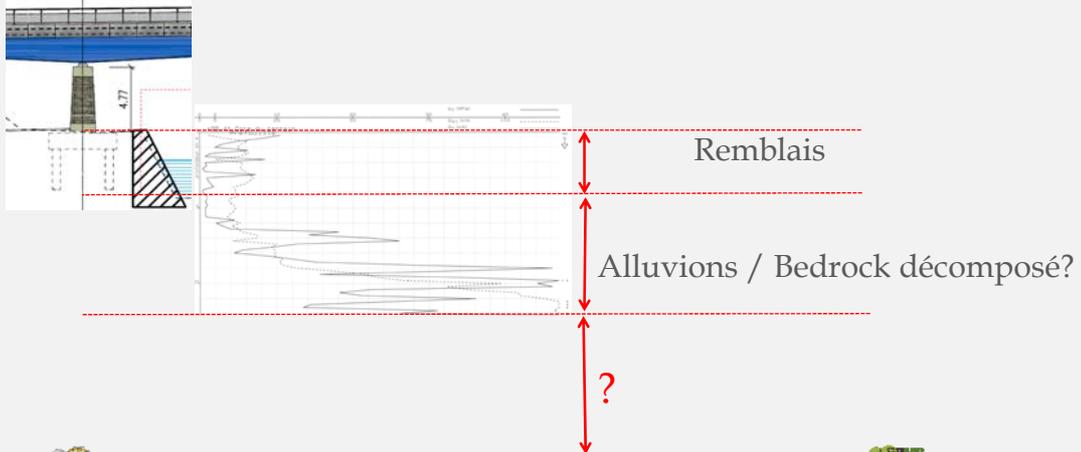


Remblai très compact



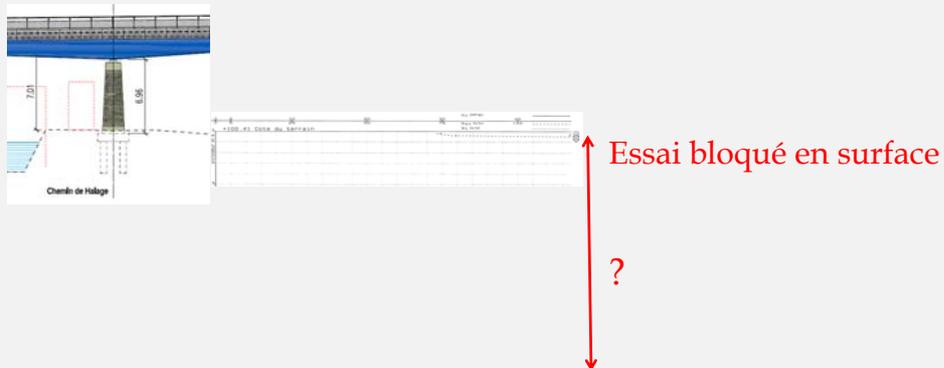
## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

### Campagnes géotechniques - phase 1 - Résultats CPT.3 (quai Sambre) :



## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

### Campagnes géotechniques - phase 1 - Résultats CPT.5 :



## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

### Campagnes géotechniques - phase 1 - Conclusions:

1. La plupart des essais CPT ne traverse pas le remblai compact en surface (béton, empierrement compact);
2. Pour ceux qui ont traversé, le toit du bedrock n'est pas clairement connu (refus dans les alluvions grossières?);
3. Aucun paramètre géomécanique dans le bedrock;
4. Aucune information sur le niveau d'altération/décomposition du bedrock houillier en surface et en profondeur (poches argileuses).



## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

Après consultation du bureau d'études en charge du projet:

Au droit de chaque massif de fondations, nous devons connaître:

1. Le niveau du toit du bedrock;
2. Les épaisseurs des différentes couches;
3. Les paramètres géomécaniques du bedrock houillier (dimensionnement des pieux).

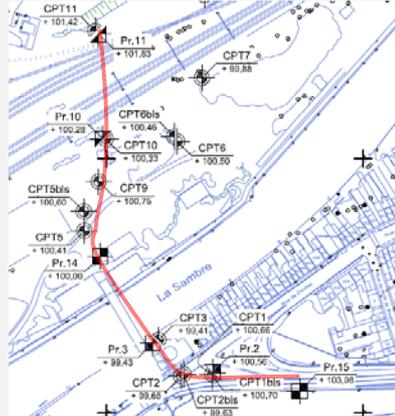


## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

Campagnes géotechniques - phase 2 – Forages destructifs avec essais pressiométriques:

Buts :

1. Traverser le remblai de surface;
2. Paramètres géomécaniques de toutes les couches jusqu'à une profondeur décidée par le BE et pas tributaire de la géologie.



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



13

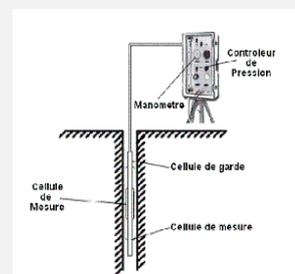
## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

### Essais pressiométriques – Principe général:

- Réalisation d'un forage destructif.
- Une sonde pressiométrique est insérée dans le trou de forage à une profondeur déterminée.
- Suite à dilatation de la sonde, on mesure le déplacement de la paroi du trou de forage.

On en déduit des paramètres comme le module pressiométrique et la pression limite.

→ Caractéristiques mécaniques de la roche et dimensionnement des fondations.



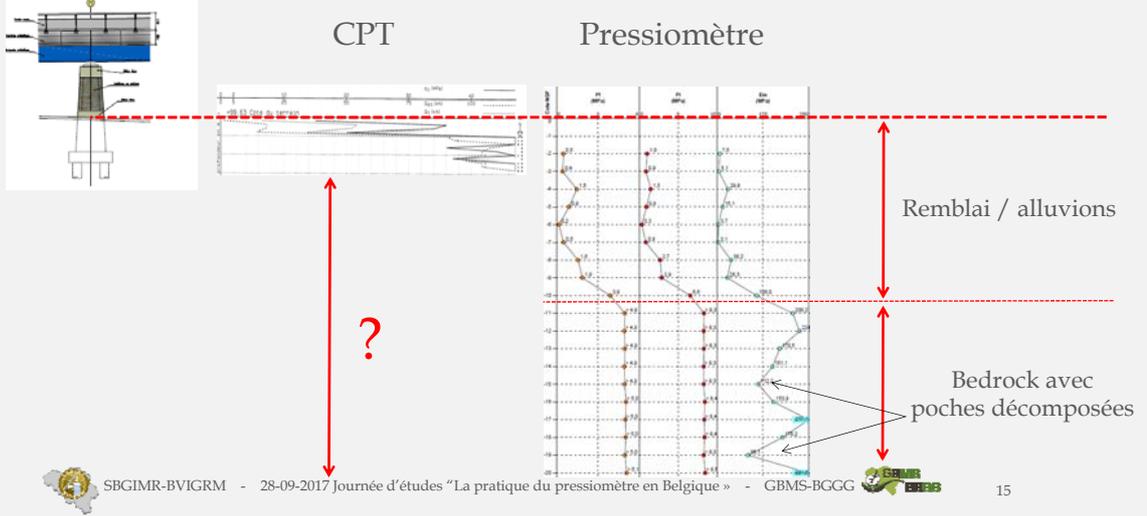
SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



14

Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

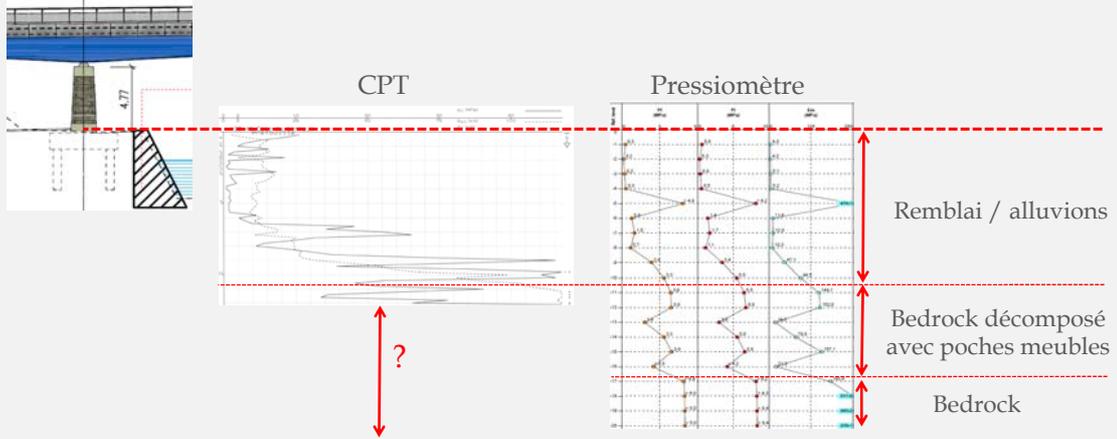
Campagnes géotechniques - phase 2 - Forages avec essais pressiométriques Pr.2 (CPT.2):



15

Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

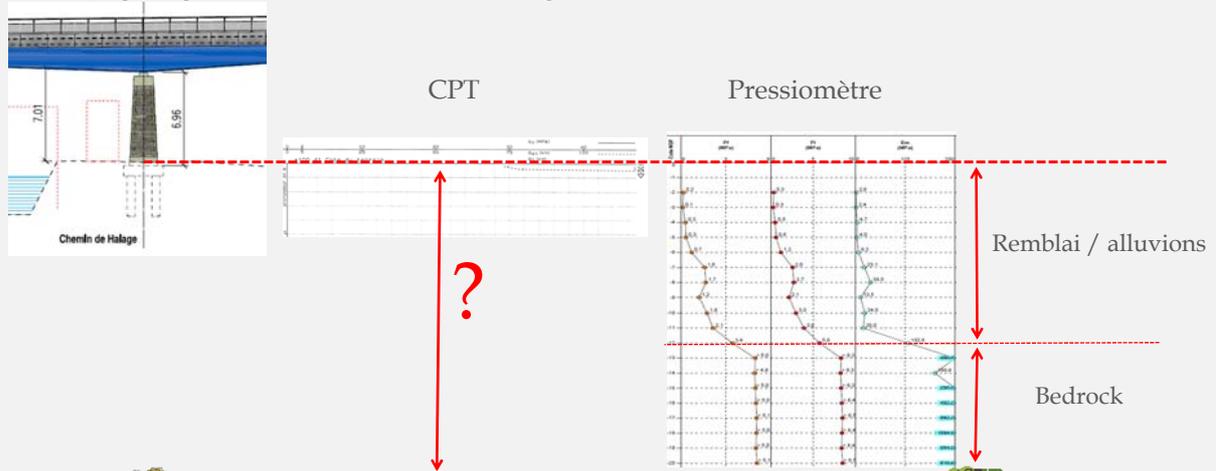
Campagnes géotechniques - phase 2 - Forages avec essais pressiométriques Pr.3 (CPT.3):



16

## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

Campagnes géotechniques - phase 2 - Forages avec essais pressiométriques Pr.14 (CPT.14):



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études «La pratique du pressiomètre en Belgique» - GBMS-BGGG



17

## Liaison routière avec ouvrages d'art entre le R3 et la plateforme multimodale de Montignies sur Sambre à Charleroi

Conclusions pour ce projet :

Dans un tel contexte :

- remblais compacts en surface,
- alluvions graveleuses à traverser,
- roche décomposée à localiser,
- roche sous-jacente servant d'assise aux pieux,
- paramètres géomécaniques (Module de rigidité compris) à obtenir,

➡ Les forages avec essais pressiométriques sont les plus efficaces.



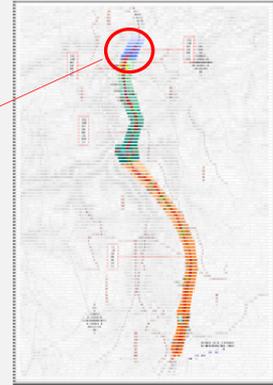
SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études «La pratique du pressiomètre en Belgique» - GBMS-BGGG



18

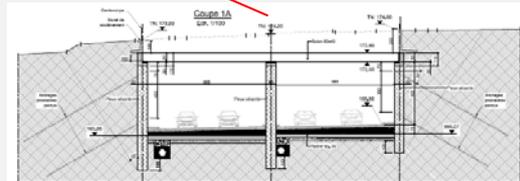
## Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer.

Cette trémie se situe à la jonction entre le contournement de Couvin et la N5.



## Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer.

Cet ouvrage est composé de parois de pieux sécants ancrées de part et d'autre.



## Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer

### Contexte géologique du site:

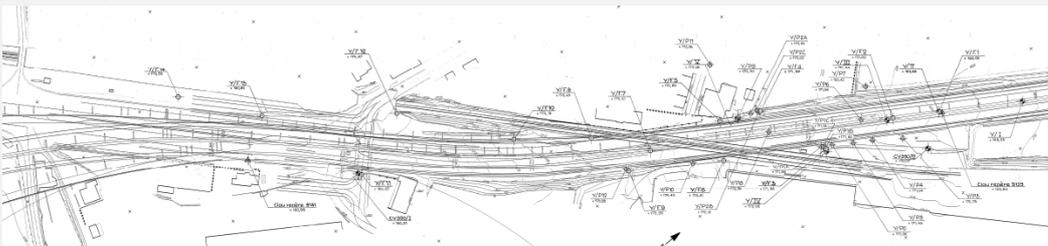
- En surface, couche de remblais issus de la construction de la N5;
- Limons de surface localement;
- Alluvions localement;
- Bedrock composé de shales et de calcaires.



## Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer.

### Campagne géotechnique préliminaire :

- Essais de pénétration statique 20 tonnes;
- Forages de reconnaissance;
- Piézomètres.



## Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer.

Coupes géologique suite à la campagne préliminaire:



Le dimensionnement des parois de soutènement sont calculées sur base de cette première campagne géotechnique.



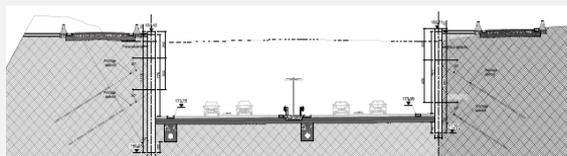
SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



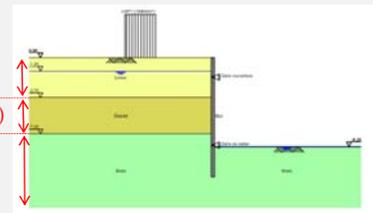
23

## Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer.

1<sup>ère</sup> phase des travaux: paroi en pieux sécants connexion Sud avec la Trémie.



Sol meuble (4 m)  
Roche décomposée (3,5 m)  
Roche fracturée



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



24

### Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer

Forage des premiers pieux sécants:

Récupération de sol argileux avec débris rocheux jusque 13 m de profondeur.



### Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer

Suite à la réalisation des premiers pieux, le MO, l'entrepreneur et le bureau de contrôle se posent la question suivante:

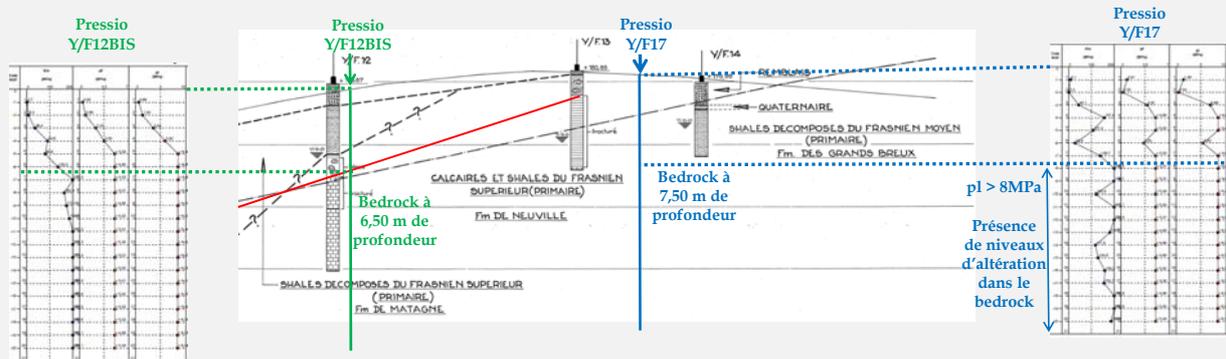
**Les déblais des forages sont-ils bien conformes aux hypothèses de calcul (roche à 7,50 m de profondeur)?**

Pour répondre à cette question  Forages avec essais pressiométriques



## Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer

### Résultats des forages avec essais pressiométriques:



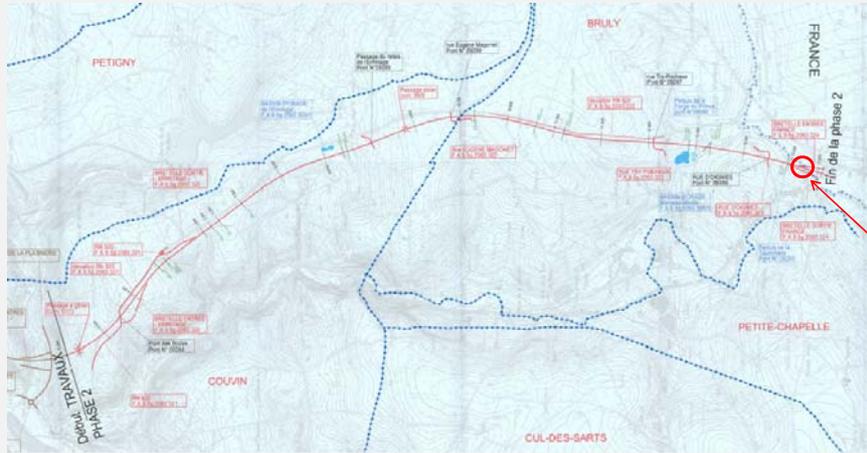
## Phase 3 du contournement de Couvin - Trémie couverte sous chemin de fer

### Conclusions:

- Les essais pressiométriques ont permis de confirmer la coupe géologique dessinée et les hypothèses de dimensionnement des parois;
- Le sol argileux récupéré hors des forages des premiers pieux à plus de 7,50 m de profondeur était issu de la désagrégation des shales et des calcaires altérés.



Phase 2 – Contournement de Couvin – Pertuis de la Tauminerie



Pertuis de la Tauminerie



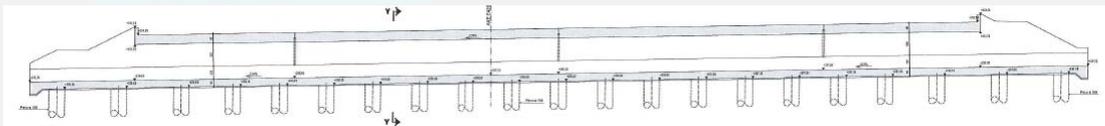
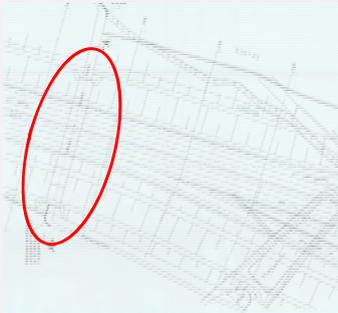
SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



29

Phase 2 – Contournement de Couvin – Pertuis de la Tauminerie

Construction d'un pertuis sur pieux sous le remblai de l'autoroute



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



30

## Phase 2 – Contournement de Couvin – Pertuis de la Tauminerie

Contexte géologique et forages de reconnaissance préalables :

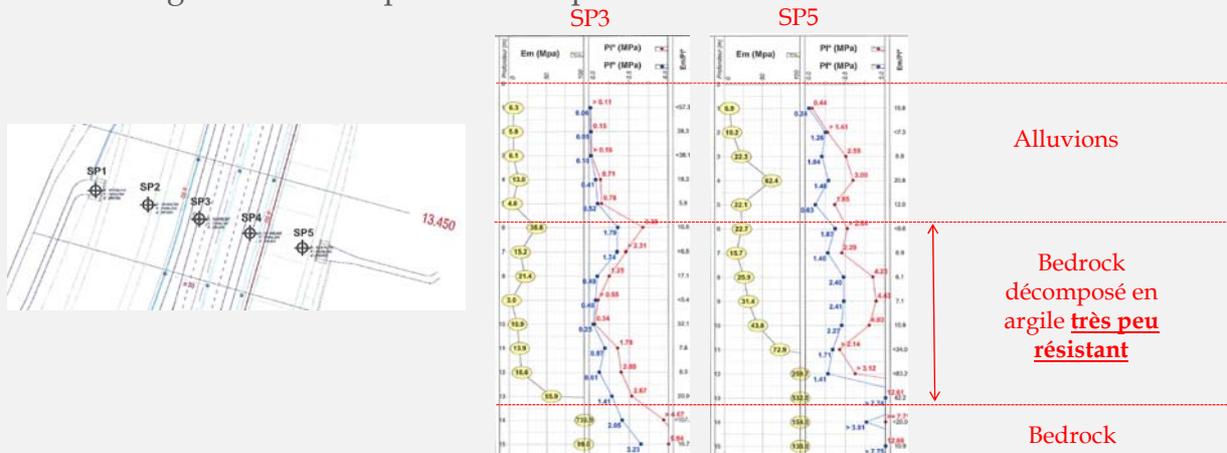
- Limon de pente / alluvions de la Tauminerie sur 5-6 m max;
- Phyllades décomposées en argile en surface.

Sur base de ce contexte, nous nous attendons à fonder les pieux dans les phyllades décomposées à 7-8 m de profondeur maximum.



## Phase 2 – Contournement de Couvin – Pertuis de la Tauminerie

Forages avec essais pressiométriques



## Phase 2 – Contournement de Couvin – Pertuis de la Tauminerie

### Conclusion:

Le pressiomètre a permis de mettre en évidence les faibles paramètres géomécaniques du bedrock décomposé comparables aux alluvions.

Les pieux ont été fondés à 15 m de profondeur et pas à 7 m.



## Le pressiomètre – Applications - Conclusions

Sur base de l'expérience acquise dans le cadre de grands travaux d'infrastructure, il apparaît que:

- Le pressiomètre est adapté aux contextes géotechniques urbains et industriels (épais remblais compacts);
- Le pressiomètre est particulièrement adapté à la géologie wallonne (bedrock décomposé/altéré à faible profondeur);



## Le pressiomètre – Applications - Conclusions

- Le pressiomètre permet de mettre en évidence des poches altérée/décomposées au sein du bedrock;
- Le pressiomètre atteindra la profondeur fixée au départ;
- Le pressiomètre permet d'obtenir un paramètre de rigidité pour le calcul des tassements;
- Le pressiomètre est complémentaire aux essais de pénétration.



## Le pressiomètre – Applications - Conclusions

### Limitations du pressiomètre:

- Essais discontinus (max 1/m) donc perte d'information entre les cotes d'essais. Peut s'avérer peu représentatif dans un sol très hétérogène comme des remblais ou du calcaire karstifié;
- Comportement horizontal du sol car contraintes radiales sur les parois du trou de forage;
- Essais peu adaptés dans des sols très compressibles (vases, alluvions fines). Perte de précision;



## Le pressiomètre – Applications - Conclusions

- Risque d'éclatement de la sonde dans une roche hétérogène comme le calcaire karstifié ou milieu traversé par des galeries ou conduits;
- Coût et durée des prestations relativement élevés.



## Le pressiomètre – Applications - Conclusions

### Conseils – Adaptations:

- Enregistrement des paramètres de forage en continu pour déduire des caractéristiques géomécaniques entre deux essais pressiométriques.
- Réduction des coûts et de la durée des prestations en limitant le nombre de points d'essais (en seconde campagne géotechnique);



## Le pressiomètre - Applications - Conclusions

- Concertation nécessaire avec le bureau d'études pour nombre et implantation de points de forages avec essais pressiométriques;
- L'interprétation des résultats des essais pressiométriques doit tenir compte du contexte géologique (pas à l'aveugle!).



Merci pour votre attention





[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

# **Les aspects technologiques du pressiomètre**

*S. Varaksin & D. Brechot, Apageo*





www.arscop.fr  
Serge VARAKSIN

# Quelques informations sur le Projet National ARSCOP

*Le pressiomètre : un outil pour la reconnaissance des sols et le dimensionnement des ouvrages géotechniques*



www.sbgimr-bvigrm.be



www.normes.be/geotechnique



www.bggg-gbms.be



## Introduction to pressuremeter techniques

*Argeon, le rat, le rat  
Et son cousin à quatre  
Ses dents de son cousin  
Son grand étonnement  
Ses dents et ses dents  
Ses dents quatre dents  
Et la première chose  
Tous deux à cause  
Mais point en sa cause  
Et la deuxième chose  
Vingt mètres il descend  
Quatre mètres il descend  
Quatre mètres son feu,  
Et descend à dix mètres,  
Ses dents dans sa main!*

*Et à son, et à son,  
Et à son, et à son,  
Quatre et son cousin  
Et descend son feu,  
Et descend son feu.*



RECORD DU MONDE DU FORAGE A LA TARIERE  
A MAIN PAR S. VARAKSIN - 41 mètres - 1971 -

## ARSCOP

nouvelles Approches de Reconnnaissance des Sols et de Conception des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre

Président : Roger Frank (ENPC)

Directeurs techniques : S.Burlon et P.Reiffsteck (IFSTAR)

### 3 grands objectifs

- Pérenniser la pratique de l'ingénierie du pressiomètre
- Poursuivre et renforcer le développement de l'outil pressiométrique et des méthodes de calcul associées
- Créer une dynamique de diffusion de l'ingénierie pressiométrique à l'internationale

Axe 1 Développement de matériels

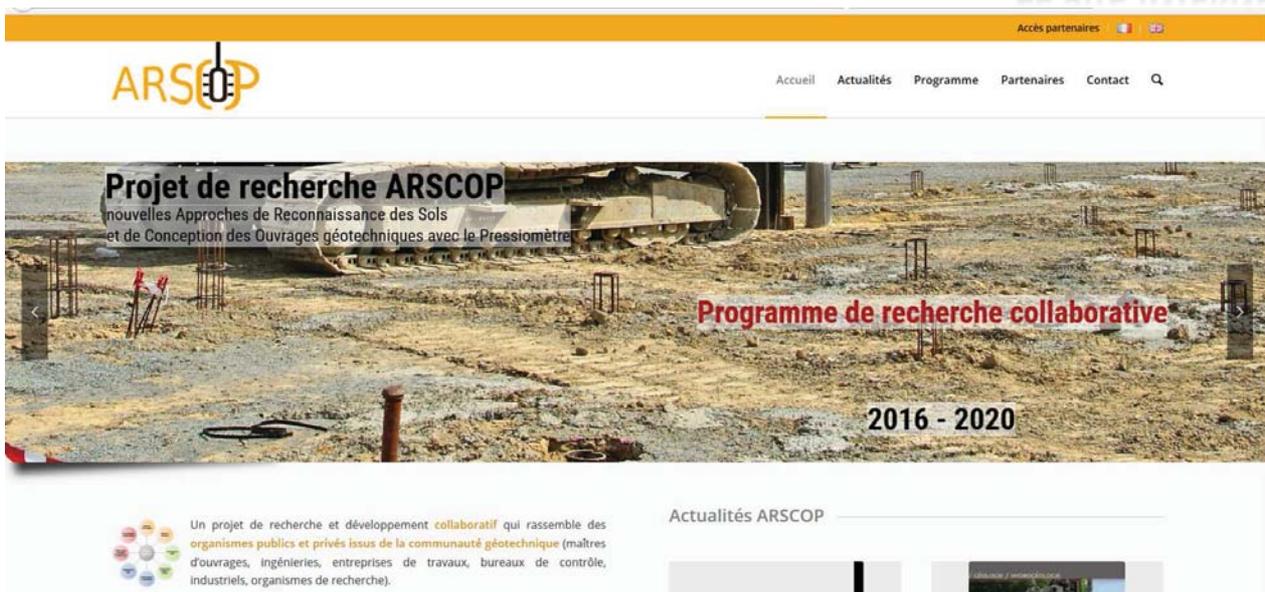
Axe 2 Calculs et Modélisations

Axe 3 Valorisation et Dissémination



La pratique du pressiomètre en Belgique  
28/09/2017 – Journée du GBMS

2

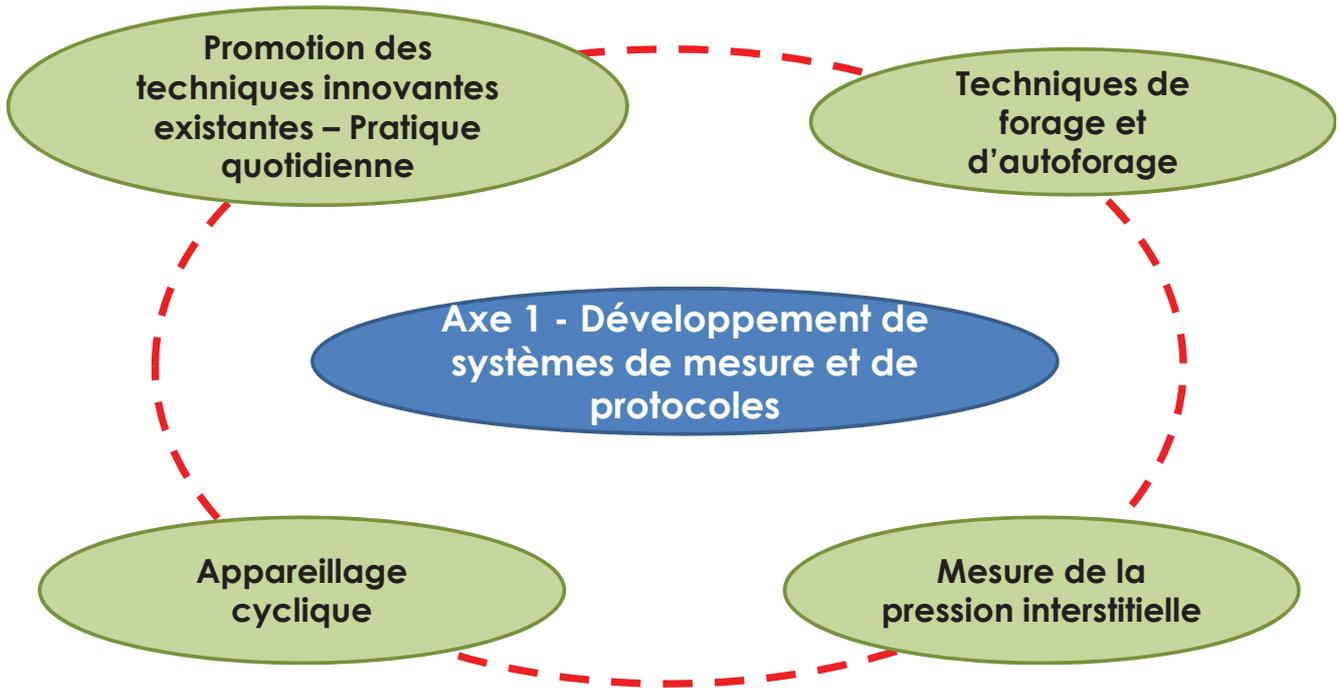


[www.arscop.fr](http://www.arscop.fr)

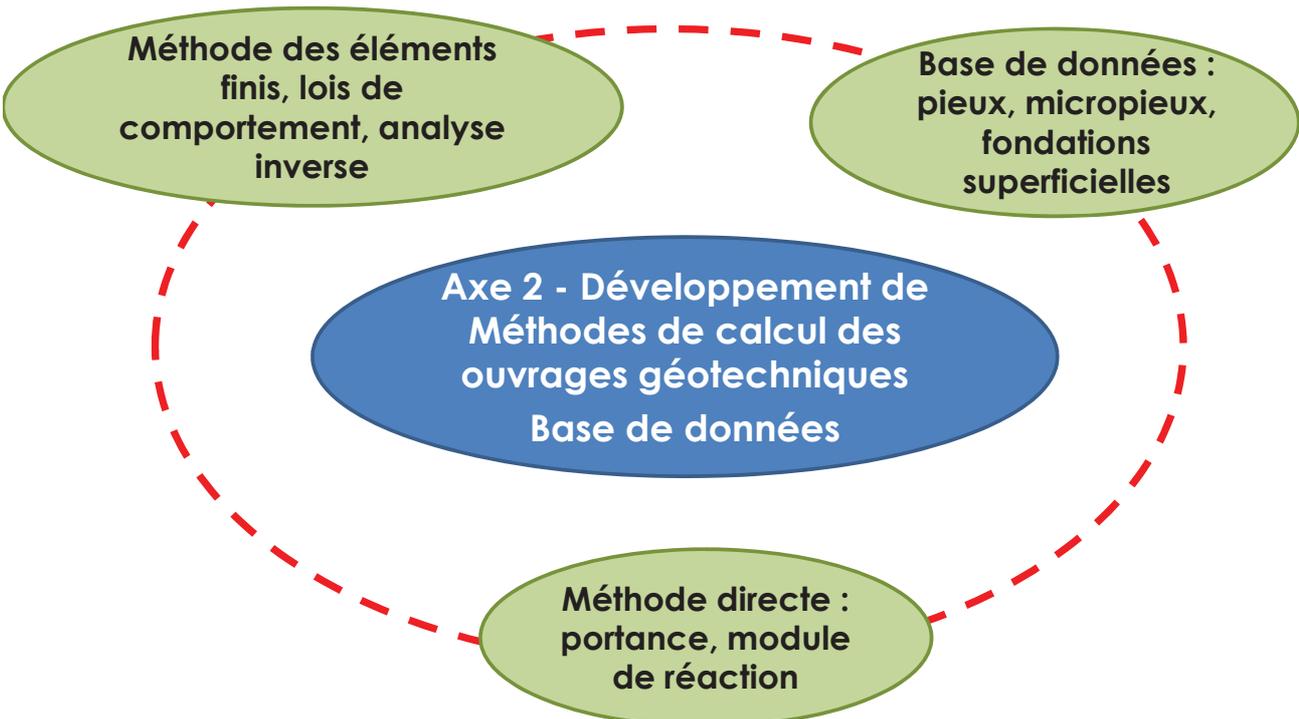


La pratique du pressiomètre en Belgique  
28/09/2017 – Journée du GBMS

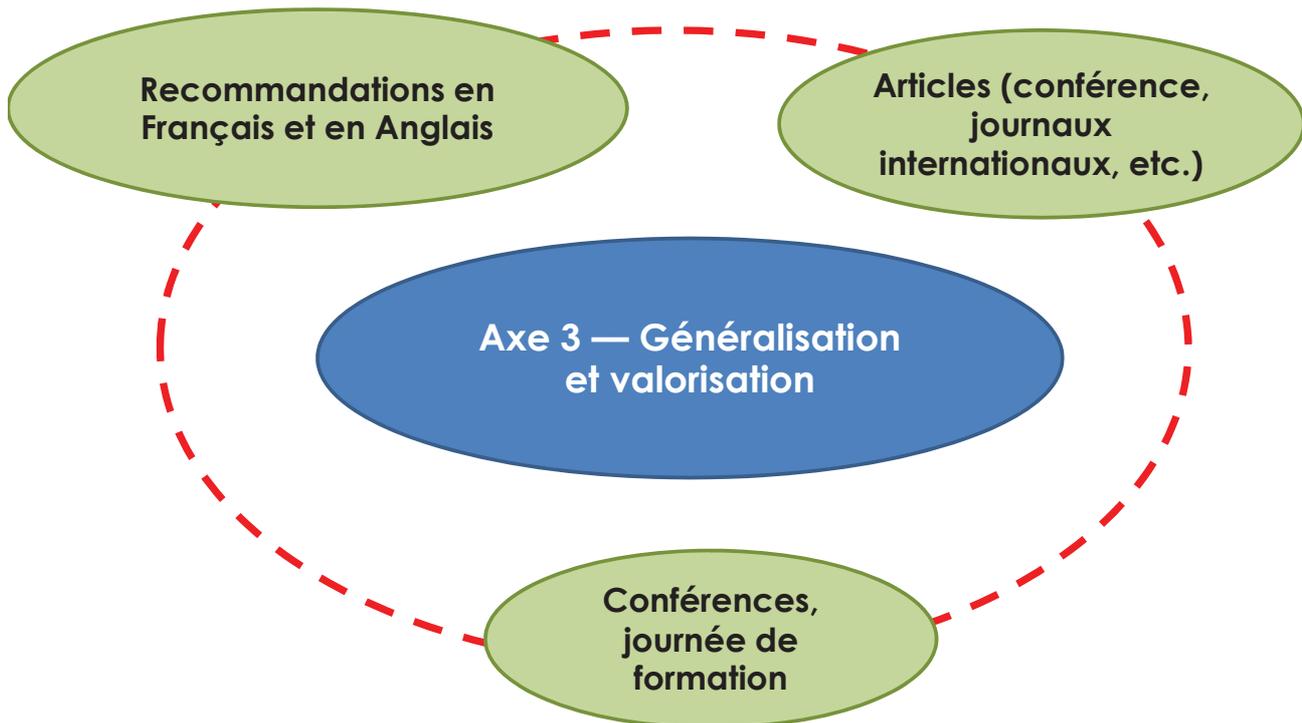
4



La pratique du pressiomètre en Belgique  
28/09/2017 – Journée du GBMS



La pratique du pressiomètre en Belgique  
28/09/2017 – Journée du GBMS



La pratique du pressiomètre en Belgique  
28/09/2017 – Journée du GBMS

7

- ▶ Faites remonter vos suggestions de recherche !
- ▶ Adhérez au PN ARSCOP
- ▶ Des possibilités de financements certes limitées existent
- ▶ Des collaborations existent sous de multiples formes: co-tutelle de thèse, simple partenariat, essais croisés, etc.



La pratique du pressiomètre en Belgique  
28/09/2017 – Journée du GBMS

9

Dans l'attente de votre participation ?!

[www.arscop.fr](http://www.arscop.fr)

**MERCI DE VOTRE ATTENTION**



28/09/2017

La pratique du pressiomètre en Belgique







# Les aspects technologiques du Pressiomètre

*Rappel de la technique de prise de mesure*

*Evolutions technologiques recentes*



[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)



## DATES CLÉS



Louis Ménard, ingénieur de l'école des Ponts et Chaussées  
et créateur du Pressiomètre

**1955**

Louis Ménard, dépose son premier brevet

BREVET D'INVENTION  
PRESSIOMÈTRE POUR ETUDE DES SOLS DE FONDATION  
MÉNARD LOUIS FRANÇOIS AUGUSTE

**1958**

Création de la société  
« *Les Pressiomètres Louis Ménard SA* »  
Qui sera scindée en 2 en 1962 :  
« *Techniques Louis Ménard* », société  
de fabrication et « *Etudes  
Pressiométriques Louis Ménard* » ;  
société de consulting

# EVOLUTION DU PRESSIOMÈTRE



**1955**

Création du 1<sup>er</sup> pressiomètre



**1957**

Pressiomètre type C & D  
1<sup>er</sup> appareil en série véritablement opérationnel



**1971**

Pressiomètre type G  
Evolution vers une simplification de l'équipement



**1975**

Pressiomètre type GC/GA  
+ d'ergonomie  
+ robuste  
+ facile à transporter



3

# VERS UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE PRESSIOMÈTRES

GeoPAC 5 10 HypePAC 25 50

PRESSIOMÈTRES AUTO-CONTROLÉS

- 100% AUTOMATIQUE
- 100% FIABLE
- 100% INNOVANT

Vers des  
procédures automatiques

1982



PAC  
(Pressiomètre Assisté par Calculateur)

2009



1975



1992



Pressiomètre + SPAD

2003



Pressiomètre + GeoSPAD®

2009



Pressiomètre + GeoSPAD®2 sur GeoBOX®



## 2 catégories de pressiomètres aujourd'hui

### Pressiomètre Ménard manuel 10 MPa

GeoSPAD2



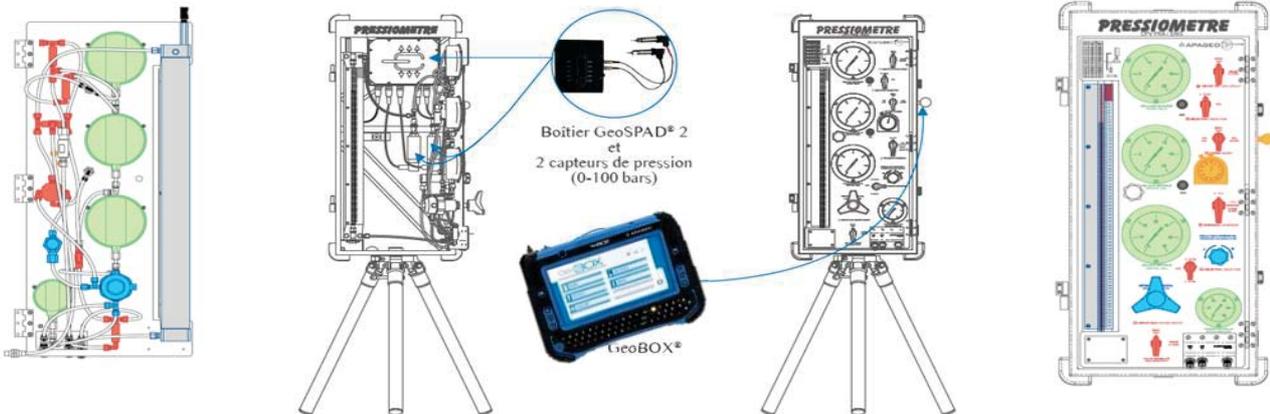
### Pressiomètre Auto-Contrôlé 5, 10 et 25 MPa

GeoPAC HyperPAC



5

## Le pressiomètre manuel



# ZOOM SUR LE DÉROULEMENT DE L'ESSAI PRESSIOMÉTRIQUE



## Les Pressiomètres Auto-Contrôlés

UNE GAMME COMPLÈTE DE PRESSIOMÈTRES POUR DES ESSAIS STANDARDS À TRÈS HAUTE PRESSION



### VALEURS AJOUTÉES

- ☑ Simplifie la conduite de l'essai
- ☑ Fiabilise le test et ses résultats (traçabilité, répétabilité)

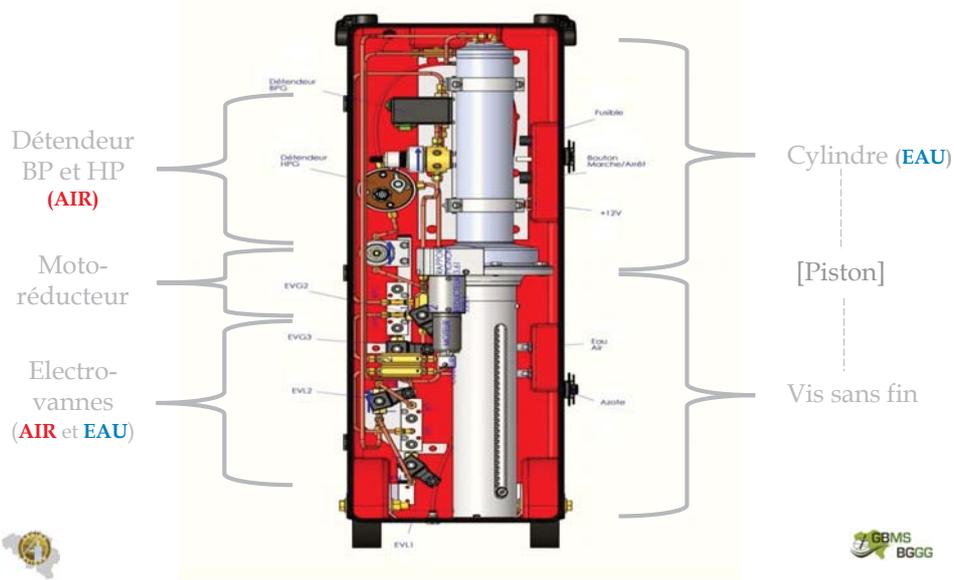
### PROCÉDURE AUTOMATIQUE

- ☑ Essai d'expansion (monotone, cyclique, spéciaux...)
- ☑ Etalonnage
- ☑ Calibrage
- ☑ Purge des tubulures et de la sonde
- ☑ Variation des paliers de pression
- ☑ Gestion de la pression différentielle :
- ☑ Equilibre entre le circuit eau et le circuit gaz (Pour GeoPAC® uniquement)

### NOUVELLES TECHNOLOGIES

- ☑ Contrôle à distance avec GeoBOX®
- ☑ Imprimante sans fil
- ☑ Possibilité de transfert direct au bureau avec le système GPRS

## ZOOM SUR LES SYSTÈMES D'ASSERVISSEMENT ET DE PILOTAGE



## NOUVELLE TENDANCE : LA CONNECTIVITÉ CHANTIER-BUREAU

### EXEMPLE : LA GESTION DES CHANTIERS AVEC LE GPRS

#### GÉOLOCALISATION

>> localisez les enregistreurs sur une cartographie type Google Map



#### ÉTAT

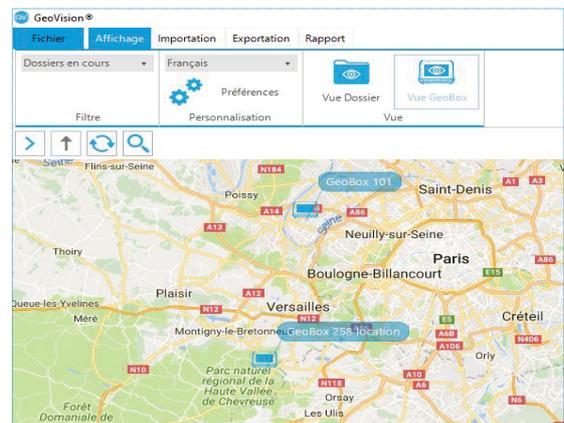
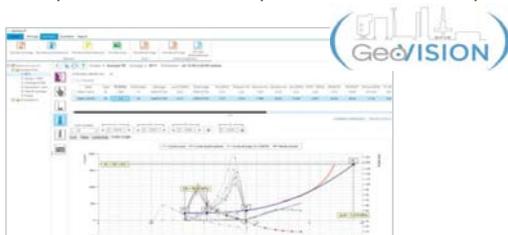
>> visualisez en temps réel l'activité de l'équipement

#### MESSAGERIE INSTANTANÉE

>> Communiquez avec les équipes en place

#### TRANSFERT DONNÉES CHANTIER-BUREAU

>> Récupérez les données à exploiter dès la fin des acquisitions



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

[WWW.APAGEO.COM](http://WWW.APAGEO.COM)





[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

**La qualité d'exécution est déterminante**  
*V. Fiquet, OREX & R. Heintz, Eurasol*



## La qualité d'exécution est déterminante

- Quelques rappels
- Influences de la qualité d'exécution
- Les éléments critiques
- Peut-on et comment détecter une mauvaise exécution



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique



1



## La qualité d'exécution est déterminante

- Quelques rappels

Norme d'application depuis 2012 - NBN EN ISO 22476-4

Domaine d'application :

- Sols naturels
- Couches traitées ou non traitées
- roches fragiles
- on shore ou off-shore



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique » - GBMS-BGGG



2



## La qualité d'exécution est déterminante

- Quelques rappels

Norme d'application depuis 2012 - NBN EN ISO 22476-4

Permet une détermination quantitative de la résistance du sol et des paramètres de déformation :

- $E_M$  Module Ménard
- $p_{IM}$  Pression limite Ménard
- $p_{fM}$  Pression de fluage Ménard



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



3



## La qualité d'exécution est déterminante

- Quelques rappels

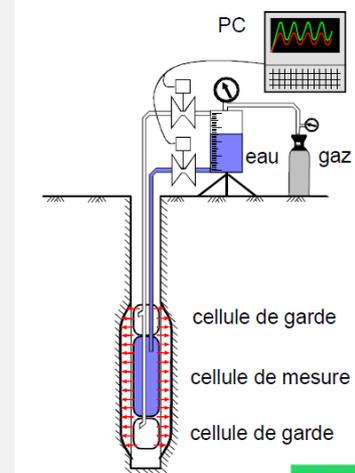
Norme d'application depuis 2012 - NBN EN ISO 22476-4

L'essai est réalisé par la dilatation d'une sonde tricellulaire placée dans le sol.

La norme ISO 22476-4 s'applique à des profondeurs limitées à 50m et à une pression ne dépassant pas 5MPa.

Procédure A : données consignées manuellement

Procédure B : données enregistrées automatiquement



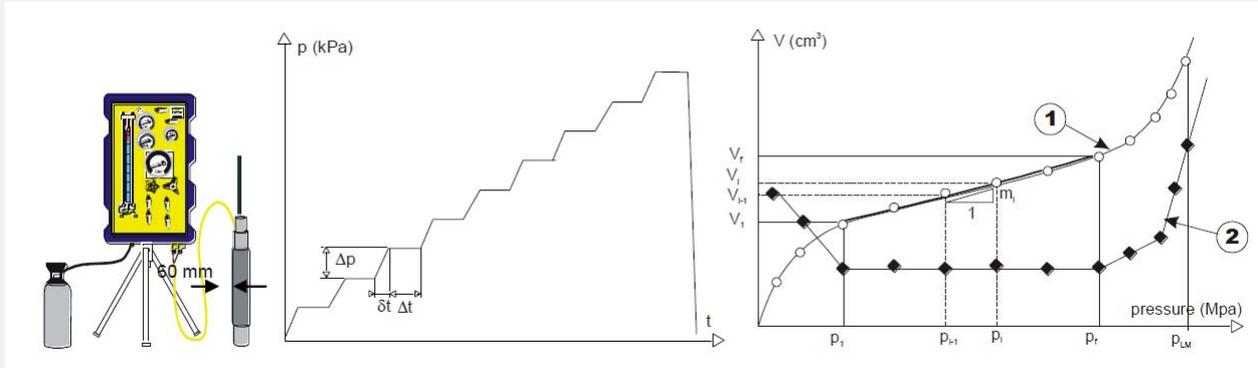
SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



4



# La qualité d'exécution est déterminante



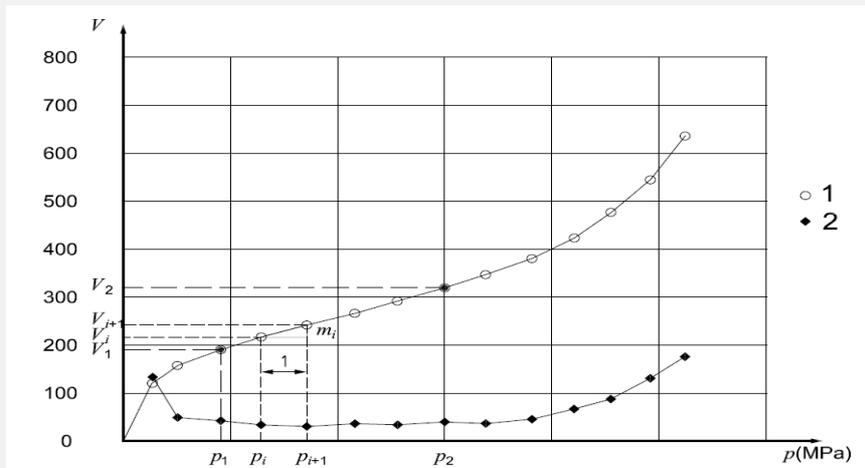
SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



5



# La qualité d'exécution est déterminante



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG

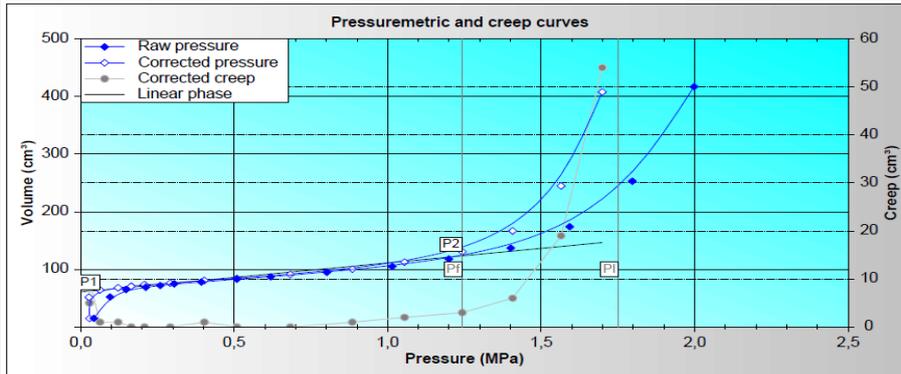


6



## La qualité d'exécution est déterminante

Em (MPa)	58,655	PI (MPa)	1,751	Pf (MPa)	1,243
Em / PI*	33,67	Pli (MPa)	1,851	ohs (MPa)	0,009
PI* (MPa)	1,742	Pin (MPa)	1,751	P1 (MPa)	0,063
PI* (MPa)	1,234	Plid/1.7Pf (MPa)	1,699   2,107	P2 (MPa)	1,243



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



7



## La qualité d'exécution est déterminante

- A chaque utilisation d'une nouvelle sonde, il faut impérativement :

- prédilater la sonde pressiométrique au moins 3 fois à l'air libre en injectant un volume de liquide dans la cellule centrale de :
  - 700 cm<sup>3</sup> pour une sonde Ø60mm
  - 550 cm<sup>3</sup> pour une sonde Ø44mm (équipée d'un tube fendu)
- réaliser un essai d'étalonnage de la dilatation propre de l'appareillage
- réaliser un essai d'étalonnage de la résistance propre de la sonde



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



8



## La qualité d'exécution est déterminante

### Essai d'étalonnage de la dilatation propre de l'appareillage

Lorsque l'on augmente en pression, le volume d'eau injecté dans la cellule centrale (donc servant à mesurer la déformation) est inférieur au volume lu sur le CPV (controlleur Pression-Volume).

On va donc introduire la sonde (munie d'un tube fendu ou non) dans un tube d'étalonnage supposé indéformable et gonfler la sonde jusqu'à 50 bars (5 Mpa) afin d'obtenir la courbe de dilatation propre de l'appareillage.



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



9

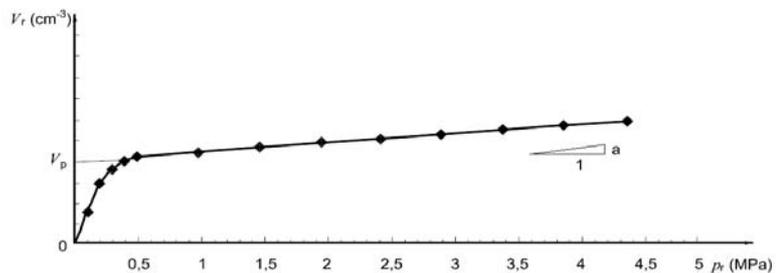


## La qualité d'exécution est déterminante

On en déduit le coefficient de dilatation  $a$

Ce dernier doit être inférieur à  $6 \text{ cm}^3/\text{Mpa}$

Si  $a > 6 \text{ cm}^3/\text{Mpa}$ , c'est qu'il y a problème, fuite dans la sonde ou le circuit, etc.



#### Légende

$V_r$  volume de liquide injecté en fin de palier de pression  
 $p_r$  pression dans la cellule de mesure  
 $V_p$  ordonnée à l'origine de la fonction affine  $V_r = V_p + ap_r$

Figure B.2 — Étalonnage de la dilatation propre — Exemple



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



10



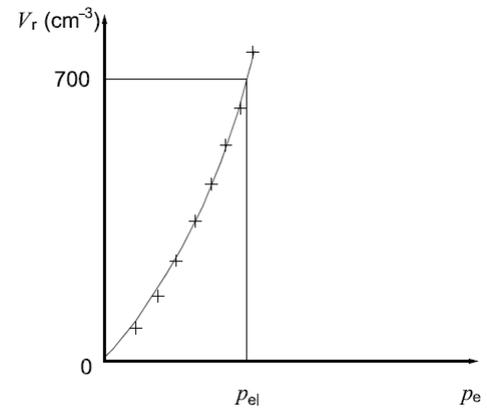
## La qualité d'exécution est déterminante

### Essai d'étalonnage de la résistance propre de la sonde

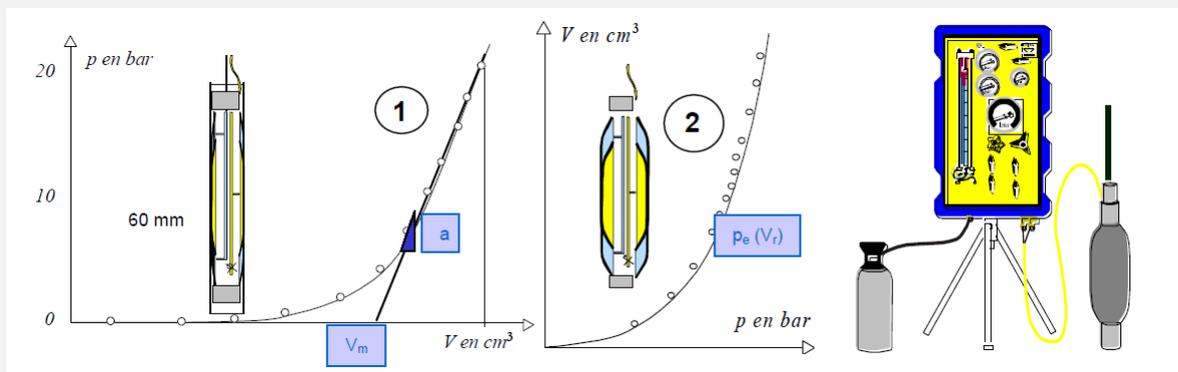
La pression lue sur CPV n'est pas la pression réellement appliquée aux parois du forage pressiométrique !

En effet, la pression lue au CPV est la somme de la pression nécessaire à vaincre la résistance propre de la sonde et la pression appliquée aux parois du forage.

Pour connaître cette résistance propre, la sonde doit être placée à l'air libre et doit être dilatée dans les mêmes conditions qu'un essai jusqu'à obtention du volume maximum.



## La qualité d'exécution est déterminante



## La qualité d'exécution est déterminante

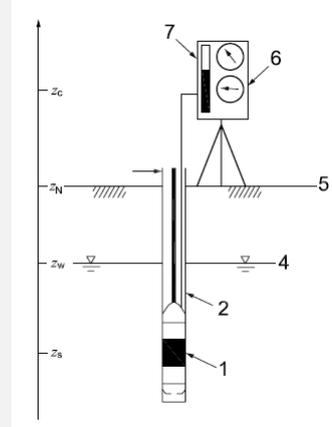
On en déduit la courbe pression-Volume  
 $V_{60}=f(p_e)$

On pourra dès lors corriger chaque essai réalisé avec cette même sonde et le même système (càd la tubulure et le CPV) d'une la pression et d'autre part les volumes :

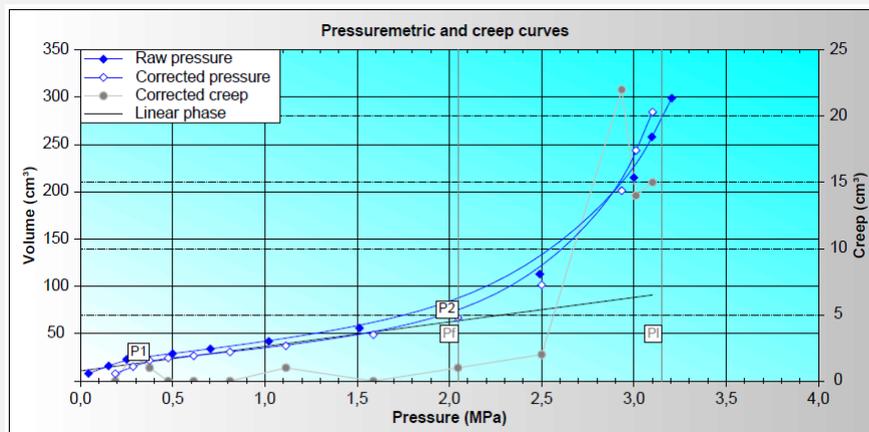
$$V = V_r(p_r) - a \cdot p_r$$

$$p = p_r + p_h - p_e(Vr)$$

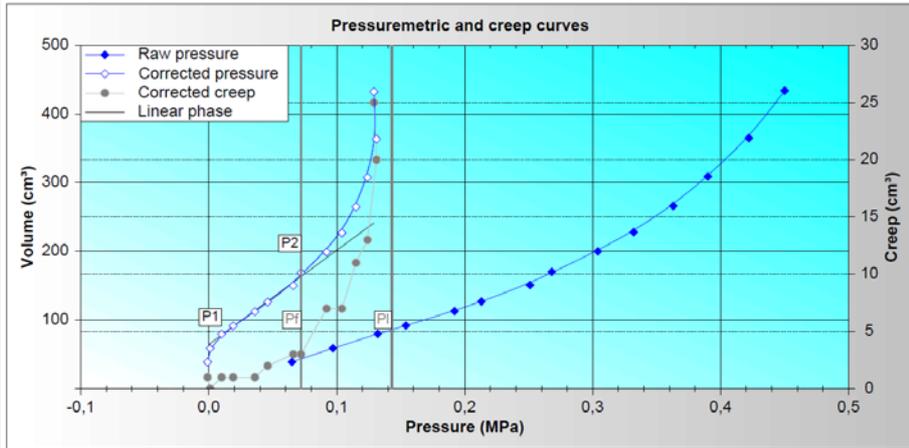
$$P_h = \gamma_w \cdot (z_c - z_s)$$



## La qualité d'exécution est déterminante



# La qualité d'exécution est déterminante

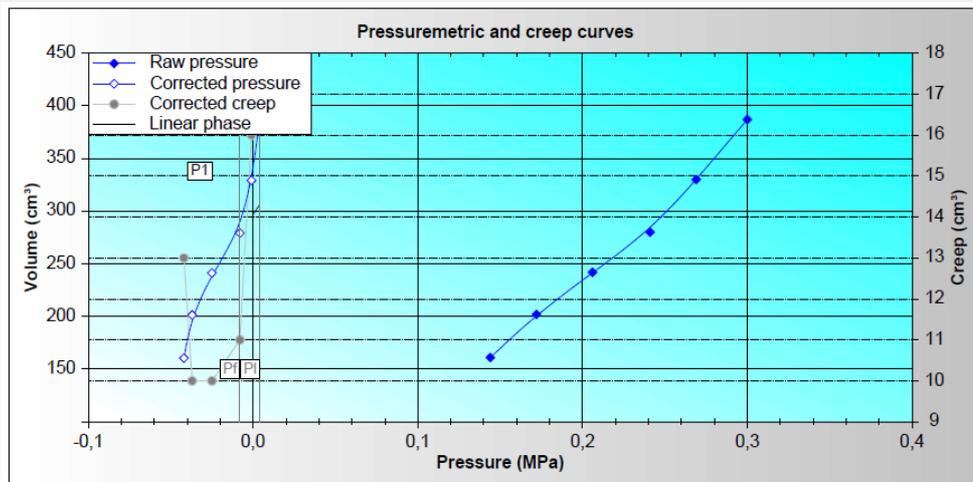


SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG

15



# La qualité d'exécution est déterminante



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG

16



## La qualité d'exécution est déterminante

L'essai pressiométrique et le forage doivent être considérés comme **UN TOUT !**

De la qualité de la paroi (et donc du forage) dépend la qualité de l'essai. La technique de forage doit donc être adaptée par l'opérateur en fonction du type de sol.

L'espacement sera de minimum 0,75 m mais de préférence égal à 1 m. (Le premier essai ne peut pas être réalisé à une profondeur moindre que 0,75 m).

Une passe de forage maximum est autorisée et déterminée précisément dans la norme NBN EN ISO 22476-4



Tableau C.1 — Longueur maximale d'une passe de forage avant de procéder à l'essai

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage (m)		
	Forage rotatif adapté <sup>b</sup>	Roto percusion <sup>b</sup>	Battage, fonçage et vibrofonçage du tube lisse <sup>c</sup>
Vase et argiles molles	1 <sup>a</sup>	—	1 <sup>a</sup>
Argiles moyennement compactes	2	2	3
Argiles compactes	5	4	4
Limons:			
— au-dessus de la nappe	4	3	3
— sous la nappe	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Sables lâches:			
— au-dessus des eaux souterraines	3	2	—
— sous la nappe	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Sables moyennement compacts et compacts	5	5	4
Sables grossiers: graviers, cailloux	3	5	3
Sols grossiers cohérents	4	5	3
Sols non homogènes, sols atypiques (comme par exemple tills, etc.)	2	3	2
Roches altérées, roches tendres	4	5	3

<sup>a</sup> Ou l'intervalle requis entre deux essais successifs.  
<sup>b</sup> Se référer au Tableau C.2 pour les techniques acceptables.  
<sup>c</sup> Non applicable à la technique TFEM (voir C.2.6.3).



Technique de forage → Type de sol ↓	Placement de la sonde sans refoulement de sol $1 < d_i/d_c \leq 1,08$									Placement de la sonde avec fonçage direct ( $d_i/d_c \approx 0$ )	
	Forage rotatif				Rotopercussion			Tube battu, fonçé ou vibrofonçé			Tube fendu fonçé
	OHD <sup>+</sup>	HA/HAM <sup>+</sup>	CFA	CD	RP	RPM	STDIM	PT	DT	VDT	DST
Vase et argile molle	**°	**°	—	— <sup>+</sup>	—	—	— <sup>+</sup>	*** TWT	—	—	*
Argiles moyennement compactes	**°	**°	**	**	—	*°	*°	*	*	—	—
Argiles compactes	**°	**°	**	**°	*	*°	**°	—	*	—	—
Limons: — au-dessus de la nappe — sous la nappe	**°	**°	**	**°	—	*°	**°	*	*	*	—
Sables lâches: — au-dessus de la nappe — sous la nappe	**°	**°	**	*	—	*°	*°	— <sup>+</sup>	—	—	—
Sables moyennement compacts et compacts	**°	**°	**	*°	*	**°	**°	—	*	*	** <sup>+</sup>
Graviers, cailloux	**°	— <sup>+</sup>	— <sup>+</sup>	— <sup>+</sup>	*	**°	**°	—	*	*	** <sup>+</sup>
Sols grossiers cohérents (par exemple, argile avec blocs)	**°	*°	*	**°	*	**°	**°	—	*	*	—
Sols non hétérogènes, sols atypiques (par exemple, dépôts, dépôts alluvionnaires, sols artificiels, remblais traités ou non, etc.)	**°	*°	*	*°	*	**°	**°	—	*	*	** <sup>+</sup>
Roches altérées, roches tendres	**°	**°	**	**°	*	**°	**°	—	*	*	—

## Légende

\*\*\* Recommandé

\*\* Approprié

\* Acceptable

— Ne convient pas

Non couvert par la présente norme

OHD Forage destructif

HA OHD exécuté avec une tarière à main

HAM OHD exécuté avec une tarière à main et avec injection de boue

CFA Tarière continue

CD Carottage

RP Rotopercussion

RPM Rotopercussion avec injection de boue

STDIM Tube fendu avec outil désagrégateur interne et circulation de boue

PT Tube battu

TWT Tube à paroi mince battu

DT Tube fonçé

VDT Tube vibrofonçé

DST Tube fendu fonçé

° Dépend des conditions sur sites réelles et de l'évaluation de l'opérateur -

\* La vitesse de rotation ne doit pas excéder  $1 \text{ s}^{-1}$  et le diamètre de l'outil ne doit pas être plus important que  $1,15 d_c$ 

° Circulation de la boue: la pression ne doit pas excéder 500 kPa et le débit 15 l/min. Le débit peut être temporairement interrompu si nécessaire.

+ Trou pilote avec des techniques de préforage possibles: DST, RP et RPM

## La qualité d'exécution est déterminante

### La pression différentielle

La norme NBN EN 22476-4 définit que la pression dans les cellules de garde doit être inférieure d'au moins deux fois la résistance propre de la **membrane**  $p_m$  (on prend généralement 1 bar).

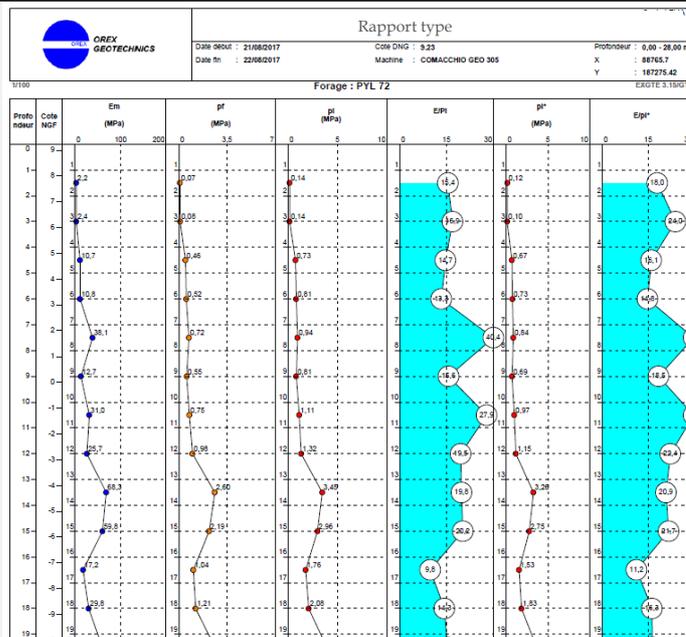
La pression différentielle doit être ajustée varie en fonction de la profondeur de la sonde. Celle-ci doit donc être adaptée à chaque essai ! (Et non pas comme on le voit trop souvent une pression moyenne pour x essais).



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



21

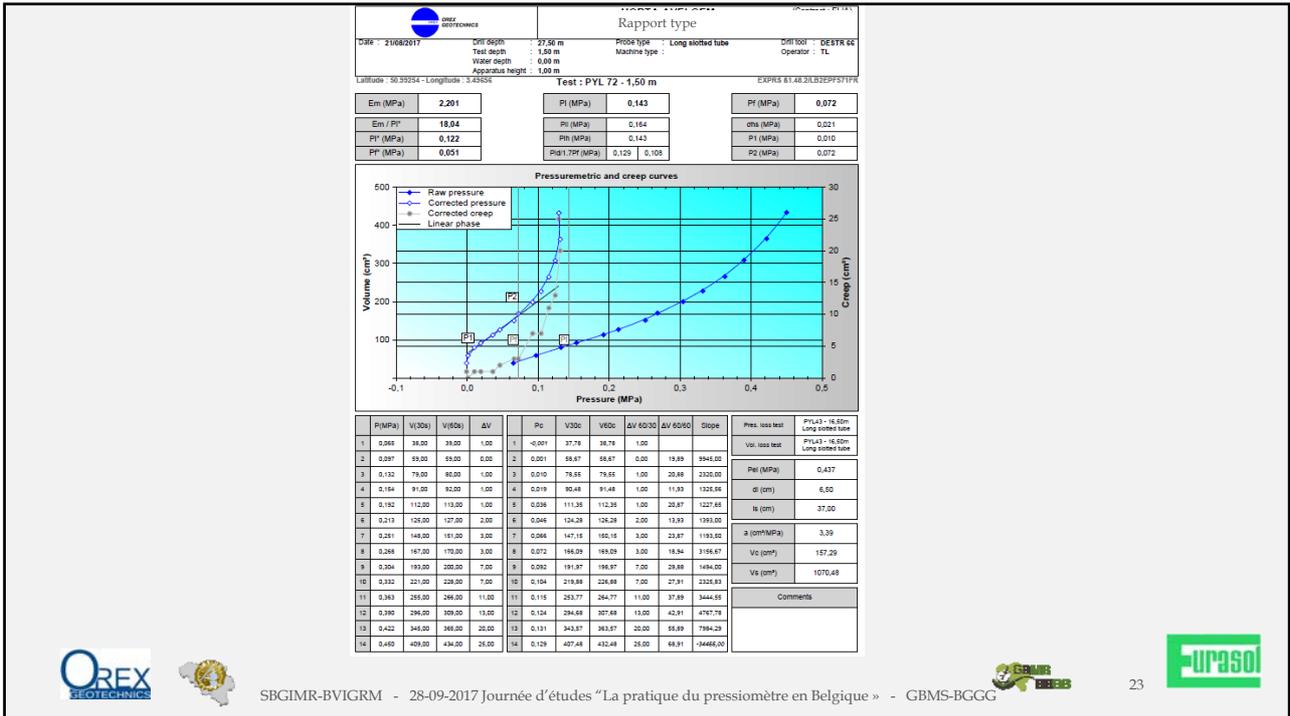


SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



22





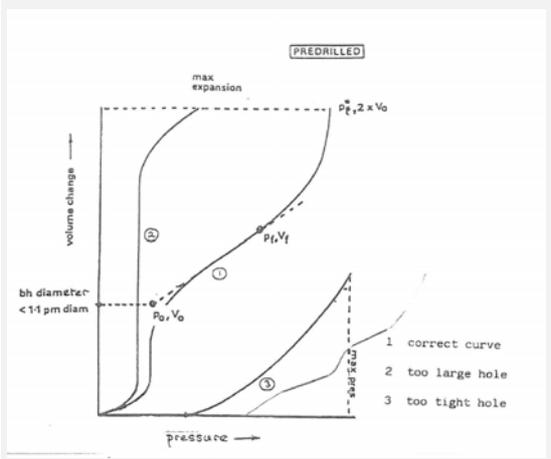
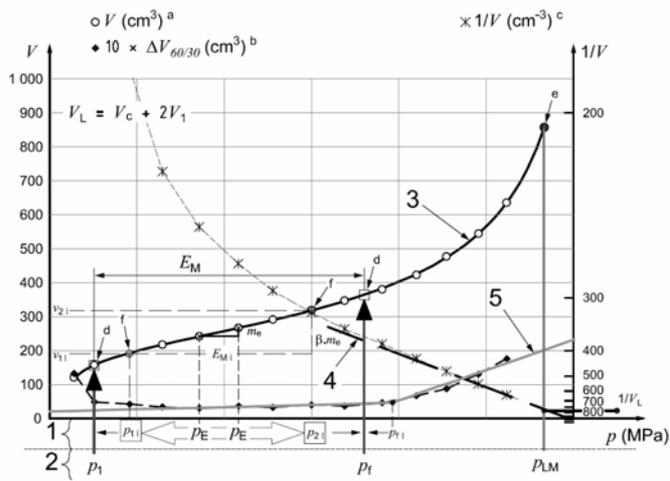
SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



23



## La qualité d'exécution est déterminante



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



24



## La qualité d'exécution est déterminante

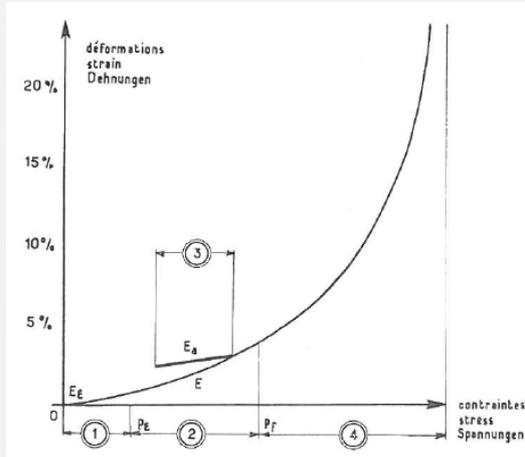


Fig. 2

- 1 phase élastique  
elastic phase  
elastische Phase
- 2 phase pseudo-élastique  
pseudo-elastic phase  
pseudoelastische Phase
- 3 phase de déchargement élastique  
phase of elastic unloading  
Phase elastischer Entlastung
- 4 phase plastique  
plastic phase  
plastische Phase

## La qualité d'exécution est déterminante

### Résumé/synthèse

La fiabilité d'un essai pressiométrique dépend de :

- Un forage calibré au diamètre de la sonde (espace annulaire aussi réduit que possible) et les parois du forage doivent être le moins remaniées possible
- Un soutènement de la paroi si nécessaire (tubage, boue de forage, polymères, etc ... ou rien)
- Temps d'attente entre le forage et la réalisation de l'essai le plus réduit possible
- Un appareillage en état de fonctionnement, bien entretenu et étalonné
- Un dialogue entre le géotechnicien et l'opérateur afin de corriger les malfaçons ou imprécisions d'exécution :
  - Allure des courbe (p,V) et de la courbe de fluage (p, V<sub>60</sub>-V<sub>30</sub>), vérifier l'ordre de grandeur de la relation  $p_f/p_1$

# La qualité d'exécution est déterminante

## Application particulière

### EXTENSION TARMAC P7

ESSAI PRESSIOMETRIQUE Forage: P1 Essai 14 / 18

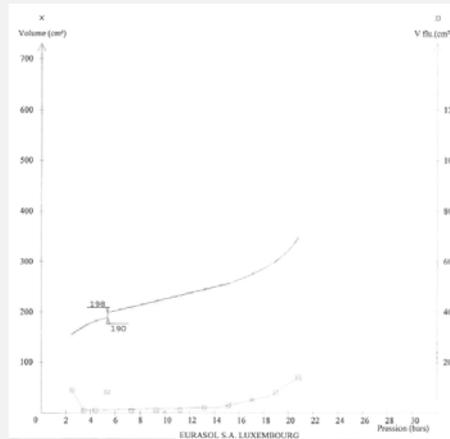
Date: 02-11-09

Profondeur: 18,0 m

**E = 342 bars**  
**P1 = 29 bars**  
**Pf = 14 bars**

	P brute (bars)	P corr. (bars)	V (cm <sup>3</sup> )
	1,00	2,50	155
	2,00	3,45	171
	3,00	4,41	182
Po;Vo >	4,00	5,35	198
	6,00	7,31	208
	8,00	9,27	219
	10,00	11,23	231
	12,00	13,19	243
Pc;Vc >	14,00	15,14	256
	16,00	17,07	275
	18,00	18,97	301
	20,00	20,81	345

PLU=8cm<sup>3</sup>



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



27



# La qualité d'exécution est déterminante

## Application particulière

### AEROPORT DE LUXEMBOURG - EXTENSION TARMAC P7

ESSAI DE FLUAGE Forage : P1 Essai : 11/15

Date : 02-11-09

Profondeur : 18,00 m

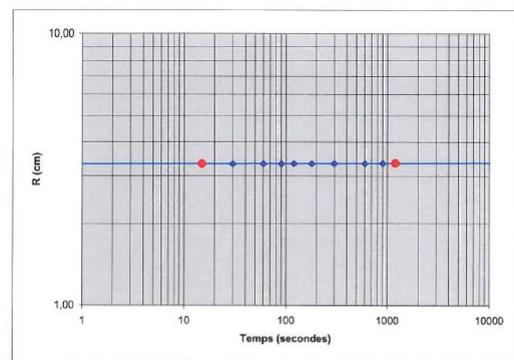
Pression brute de fluage : 4 bars

Pression corrigée de fluage : 5,35 bars

$R_t = R_0 (t/t_0)^n$

**n = 0,001**

t (s)	V (cm <sup>3</sup> )	R (cm)
15	190	3,32
30	191	3,32
60	192	3,32
90	193	3,32
120	194	3,32
180	194	3,32
300	195	3,33
600	196	3,33
900	197	3,33
1200	196	3,33



EURASOL S.A. LUXEMBOURG



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



28



Merci pour votre attention



[www.sbgimr-bvigtm.be](http://www.sbgimr-bvigtm.be)



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)







[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

# Exploitation des mesures pressiométriques vers des paramètres

*P. Debauche & N. Lambert, Tractebel*



# Exploitation des mesures pressiométriques vers des paramètres d'étude

Pierre Debauche – Nicolas Lambert



www.sbgimr-bvigm.be



www.normes.be/geotechnique



www.bggg-gbms.be



## Contenu

- Approche empirique
  - Hauteur d'encastrement équivalente  $D_e$
  - Pression limite nette équivalente  $p_{le}^*$
  - Profondeur critique
  - Classification des sols
  - Facteur de portance
- Approche numérique – modélisation
  - Paramètres mesurés au pressiomètre
  - Loi de comportement hyperbolique
  - Module œdométrique – détermination et calibration
  - Autres modules
  - Critères de Mohr-Coulomb



## Approche empirique



## Hauteur d'encastrement équivalente $D_e$

F62-V & EC 7 - NF

La hauteur d'encastrement équivalente est définie à partir des résultats des essais de sols en place (ici, le pressiomètre). Si l'on considère la courbe représentant la pression limite nette en fonction de la profondeur, la hauteur d'encastrement équivalente est définie par :

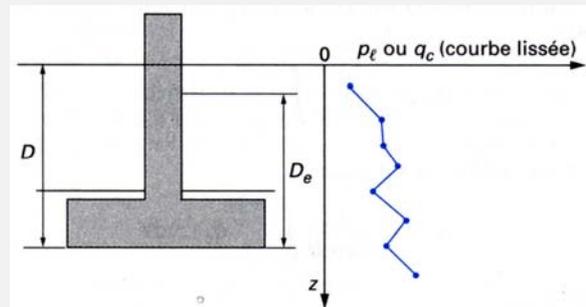
$$D_e = \frac{1}{p_{le}^*} \int_0^D p_l^*(z) dz$$

Avec:  $p_{le}^*$  = pression limite nette équivalente

$$p_l^* = p_l - p_0$$

$p_l$  pression limite mesurée

$p_0$  contrainte totale horizontale au même niveau dans le sol avant essai;



## Pression limite nette équivalente $p_{le}^*$ - fondation superficielle

F62-V

- Sol homogène:
  - Épaisseur au moins égale à  $1,5B$  au dessous de la base de la fondation;
  - Sol de nature unique et les pressions limites  $p_l$  sont dans un rapport de 1 à 2, au plus, dans la couche)
- Sol non homogène:
  - Épaisseur au moins égale à  $1,5B$  au dessous de la base de la fondation;
  - Ayant des valeurs de pression limite du même ordre de grandeur;

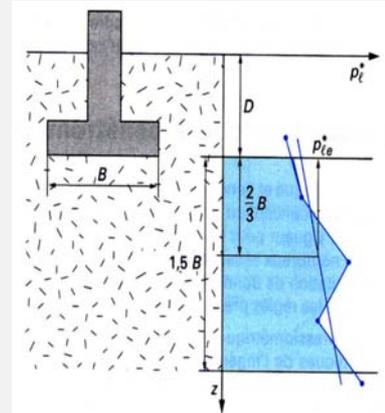
Afin de déterminer la pression limite nette équivalente, on établit un profil linéaire de la pression limite nette ( $p_l^* = p_l - p_0$ ) et l'on prend pour pression limite nette équivalente  $p_{le}^*$  la valeur à la profondeur  $D + 2/3 B$ :

$$p_{le}^* = p_l^* (D + \frac{2}{3} B)$$

Afin de déterminer la pression limite nette équivalente, on établit la moyenne géométrique:

$$p_{le}^* = \sqrt[n]{p_{l1}^* * p_{l2}^* * \dots * p_{ln}^*}$$

$p_{l1}^*; p_{l2}^*; \dots; p_{ln}^*$ : valeurs de la pression limite nette équivalente dans les couches situées de  $D$  à  $1,5B$ , après avoir écarté, si besoin est, des valeurs singulières.



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



5

## Pression limite nette équivalente $p_{le}^*$ - fondation superficielle

EC7 - NF

Afin de déterminer la pression limite nette équivalente, on établit la moyenne géométrique:

$$p_{le}^* = \sqrt[n]{p_{l1}^* * p_{l2}^* * \dots * p_{ln}^*}$$

$p_{l1}^*; p_{l2}^*; \dots; p_{ln}^*$ : valeurs de la pression limite nette équivalente dans les couches situées de  $D$  à  $D + h_r$ , avec:

- ELS:  $h_r = 1,5B$ ;
- ELU:
  - $h_r = 1,5B$  si  $1 - \frac{2e}{B} \geq 0,5$  et  $h_r = 3B - 6e$  si  $1 - \frac{2e}{B} < 0,5$  pour les fondations filantes de largeur  $B$ ;
  - $h_r = 1,5B$  si  $1 - \frac{2e}{B} \geq \frac{9}{16}$  et  $h_r = \frac{8B}{3} - \frac{16e}{3}$  si  $1 - \frac{2e}{B} < \frac{9}{16}$  pour les fondations circulaire de diamètre  $B$ ;
  - $h_r = 1,5B$  si  $\left(1 - \frac{2eB}{L}\right) \left(1 - \frac{2eL}{B}\right) \geq 0,5$  et  $h_r = \min(3B - 6e_B; 3B - 6e_L)$  si  $\left(1 - \frac{2eB}{L}\right) \left(1 - \frac{2eL}{B}\right) < 0,5$  pour les fondations rectangulaires de largeur  $B$  et de longueur  $L$ .

- Lorsque le terrain est constitué sous la fondation, jusqu'à une profondeur  $h_r$ , d'un même sol, ou de sols

même type et de pressions limites nettes comparables, le profil pressiométrique représentatif de la tranche de sol

peut être défini par une relation entre la pression limite pressiométrique nette et la profondeur.

- Lorsque le terrain n'est pas constitué sous la fondation, jusqu'à une profondeur  $h_r$ , d'un même sol, ou de sols

de même type et de pression limites nettes comparables, le profil pressiométrique représentatif de la tranche de sol

doit tenir compte du profil réel mesuré dans chaque sol de type différent, après avoir éventuellement éliminé les

valeurs singulières jugées trop fortes.

- Dans le cas où un substratum rocheux est présent sous la semelle et est séparé de celle-ci par des terrains

plus déformables et moins résistants alors la valeur  $h_r$  est réduite de manière à ne pas considérer les valeurs de

pression limite nette mesurées dans ce substratum rocheux.



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



6

## Pression limite nette équivalente $p_{le}^*$ - fondation profonde

F62-V & EC 7 - NF

- Sol homogène:
  - Couche pour laquelle les valeurs maximales de  $p_l$  n'excèdent pas 2 fois les valeurs minimales de  $p_l$ .

Afin de déterminer la pression limite nette équivalente, on établit une pression moyenne autour de la base de la fondation profonde:

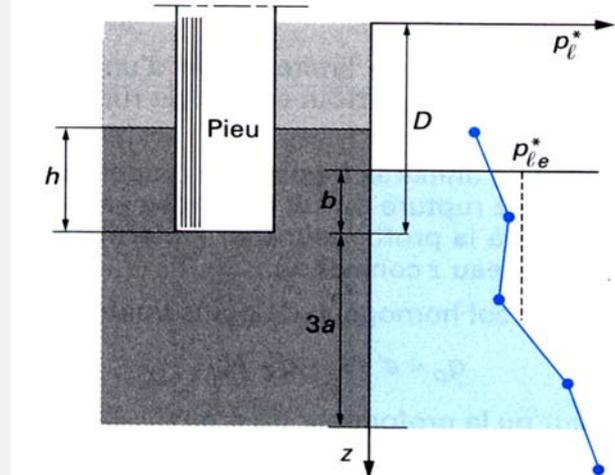
$$p_{le}^* = \frac{1}{3a + b} \int_{D-b}^{D+3a} p_l^*(z) dz$$

Avec:

$$a = \frac{B}{2} \text{ si } B > 1m;$$

$$a = 0,5m \text{ si } B < 1m;$$

$b = \min(a, h)$  où  $h$  est la hauteur de l'élément de fondation dans la couche porteuse.



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



7

## Profondeur critique

F62-V & EC 7 - NF

- Dans un sol homogène, la capacité portante sous la base de la fondation augmente avec la profondeur  $D$ , jusqu'à une profondeur dite profondeur critique  $D_c$  au-delà de laquelle elle reste constant. Cette profondeur critique varie, en principe, avec:
  - Le type de sol;
  - La résistance du sol;
  - Le diamètre de la fondation.
- En fonction du rapport  $D_e/B$  entre la hauteur d'encastrement équivalente et la largeur de la fondation, on pourra admettre les limites suivantes (F62-V):
  - $D_e/B < 1,5$ : Fondations superficielles;
  - $D_e/B > 5$ : Fondations profondes;
  - $1,5 < D_e/B < 5$ : Fondations semi-profondes ou sous-critiques.



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG



8

# Classification des sols

F62-V

Définition des catégories conventionnelles des sols

Classe de sol	Classe de sol		PI [MPa]
Argiles, limons	A - Argiles et limons mous		< 0,7
	B - Argiles et limons fermes		1,2 à 2,0
	C - Argiles très fermes à dures		> 2,5
Sables, graves	A - Lâches		< 0,5
	B - Moyennement compacts		1,0 à 2,0
	C - Compacts		> 2,5
Craies	A - Molles		< 0,7
	B - Altérées		1,0 à 2,5
	C - Compacts		> 3,0
Marnes, marno-calcaires	A - Tendres		1,5 à 4,0
	B - Compacts		> 4,5
Roches (1)	A - Altérées		2,5 à 4,0
	B - Fragmentées		> 4,5

(1) - la classification "roche" englobe un large panel (altérées, fragmentée, calcaire, schiste,...) et est réservée aux matériaux présentant des modules pressiométriques supérieurs à 50 à 80 MPa.



# Classification des sols

EC 7 - NF

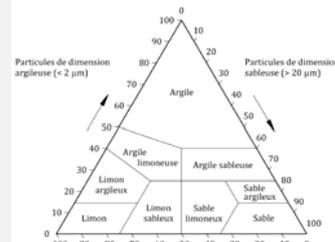
Tableau A.2.1 — Classement des sols selon différents critères

Classes de sol	$I_p$	$p_r^*$ (MPa)	$q_c$ (MPa)	$(N_{1,60})$	$c_u$ (kPa)
Argiles et limons	Très mous à mous	0,0 - 0,50	< 0,4	< 1,0	< 75
	Fermes	0,50 - 0,75	0,4 à 1,2	1,0 à 2,5	75 à 150
	Raides	0,75 - 1,00	1,2 à 2	2,5 à 4,0	150 à 300
	Très raides	> 1,00	≥ 2	≥ 4,0	≥ 300
Sols intermédiaires (sable limoneux, sable argileux, argile sableuse)	Classement à réaliser selon les indications des Figures A.2.1 à A.2.4				
Sables et graves	Très lâches		< 0,2	< 1,5	< 3
	Lâches		0,2 à 0,5	1,5 à 4	3 à 8
	Moyennement denses		0,5 à 1	4 à 10	8 à 25
	Denses		1 à 2	10 à 20	25 à 42
Très denses		> 2	> 20	42 à 58	
Craies	Molles		< 0,7	< 5	
	Altérées		0,7 à 3	5 à 15	
	Saines		≥ 3	≥ 15	
Marne et calcaire marneux	Tendres		< 1	< 5	
	Raides		1 à 4	5 à 15	
	Très raides		> 4	> 15	
	Altéré		2,5 à 4		
Rocher			> 4		
	Fragmenté				

Tableau A.2.2 — Nature des sols cohérents – Teneur en carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>

TENEUR EN CaCO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	CLASSE DE SOL
0 - 10 %	Argile ou limon
10 - 30 %	Argile marneuse ou limon marneux
30 - 70 %	Marne
70 - 90 %	Calcaire marneux
90 - 100 %	Calcaire (ou craie <sup>b</sup> )

a teneur en CaCO<sub>3</sub> déterminée conformément à la norme NF P 94-048.  
b la dénomination craie désigne les formations sédimentaires de couleur claire, généralement blanchâtre à jaunâtre, poreuses et légères sur lesquelles certains essais de laboratoire spécifiques, tels que, par exemple, les limites d'Atterberg, peuvent être effectués.



## Facteur de portance – fondation superficielle

F62-V

### Facteur de portance pressiométrique

Type de sol	Expression de $k_p$	$K_p$ max (semelle carrée)	$K_p$ max (semelle filante)
Argiles et limons A, craies A	$0,8[1+0,25(0,6+0,4B/L)De/B]$	1,30	1,10
Argiles et limons B	$0,8[1+0,35(0,6+0,4B/L)De/B]$	1,50	1,22
Argiles C	$0,8[1+0,5(0,6+0,4B/L)De/B]$	1,80	1,40
Sables A	$[1+0,35(0,6+0,4B/L)De/B]$	1,88	1,53
Sables et graves B	$[1+0,5(0,6+0,4B/L)De/B]$	2,25	1,75
Sables et graves C	$[1+0,8(0,6+0,4B/L)De/B]$	3,00	2,20
Craies B et C	$1,3[1+0,27(0,6+0,4B/L)De/B]$	2,18	1,83
Marnes, marno-calcaires, roches altérées,...	$[1+0,27(0,6+0,4B/L)De/B]$	1,68	1,41



SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG

11

## Facteur de portance – fondation superficielle

EC7 - NF

- Le facteur de portance pressiométrique  $k_p$  doit être déterminé à partir de la relation suivante pour des valeurs de  $De/B \leq 2$ :

$$k_{p; \frac{B}{L}} = k_{p0} + \left( a + b \frac{De}{B} \right) \left( 1 - e^{-c \frac{De}{B}} \right)$$

Les valeurs numériques des paramètres a, b et c sont présentées dans le tableau suivant pour des fondations filantes ( $B/L \approx 0$ ) ou carrées ( $B/L=1$ ):

- Dans le cas de semelles de forme rectangulaire, la relation à utiliser est la suivante :

$$k_{p; \frac{B}{L}} = k_{p; \frac{B}{L}=0} \left( 1 - \frac{B}{L} \right) + k_{p; \frac{B}{L}=1} \frac{B}{L}$$

Catégorie de sol – Courbe de variation du facteur de portance		Expression de $k_p$			
		a	b	c	$k_{p0}$
Argiles et limons	Semelle filante – Q1	0,2	0,02	1,3	0,8
	Semelle carrée – Q2	0,3	0,02	1,5	0,8
Sables et graves	Semelle filante – Q3	0,3	0,05	2	1
	Semelle carrée – Q4	0,22	0,18	5	1
Craies	Semelle filante – Q5	0,28	0,22	2,8	0,8
	Semelle carrée – Q6	0,35	0,31	3	0,8
Marnes et marno-calcaires	Semelle filante – Q7	0,2	0,2	3	0,8
Roches altérées	Semelle carrée – Q8	0,2	0,3	3	0,8

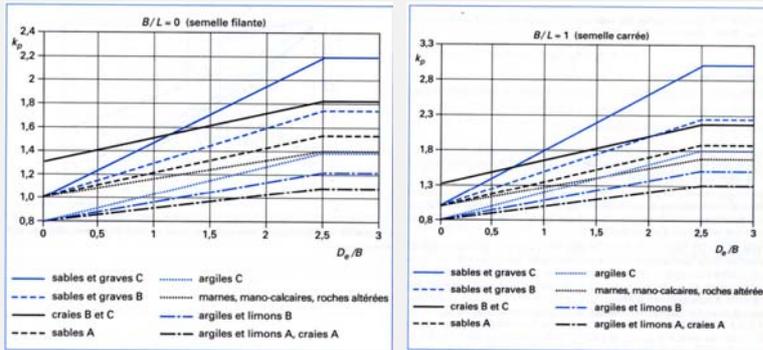


SBGIMR-BVIGRM - 28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique" - GBMS-BGGG

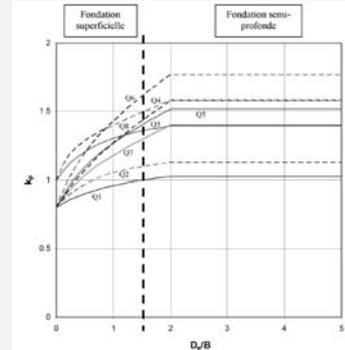
12

# Facteur de portance – fondation superficielle

F62-V



EC7 - NF



# Facteur de portance – fondation profonde

F62-V

Nature des terrains	Éléments mis en œuvre sans refoulement du sol		Éléments mis en œuvre avec refoulement du sol	
Argiles Limons	A	1,1	1,4	
	B	1,2	1,5	
	C	1,3	1,6	
Sables Graves	A	1,0	4,2	
	B	1,1	3,7	
	C	1,2	3,2	
Craies	A	1,1	1,6	
	B	1,4	2,2	
	C	1,8	2,6	
Marnes Marno-calcaires		1,8	2,6	
Roches altérées (1)		1,1 à 1,8	1,8 à 3,2	

(1) La valeur de  $k_p$  pour ces formations est prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus. Le calcul proposé ici n'affranchit, en aucun cas, d'avoir recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches.

EC7 - NF

Terrain	Argile % CaCO <sub>3</sub> < 30 % Limon	Soils intermédiaires Sable/Grave	Craie	Marne et calcaire- morneux	Roche altérée et fragmentée (4)
1	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)
2	1,3	1,65	1,6	1,6	2,0
3	1,55	3,2	2,35	2,10	2,10
4	1,35	3,1	2,30	2,30	2,30
5#	1,0	1,9	1,4	1,4	1,2
6#	1,20	3,10	1,7	2,2	1,5
7#	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2
8	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)

(#) pour les pieux de type BAO, HB et PP, mis en œuvre par vibrofonçage, au lieu de battage, il y a lieu de faire un abaissement de 50 % sur le facteur  $k_p$ .

(a) La valeur de  $k_p$  pour les roches altérées et fragmentées doit être prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus. Dans le cas des roches saines, il convient (F.1 (2) Note 1) d'apprécier si une justification basée sur les méthodes de la présente annexe F et à l'évidence pessimiste est suffisante, ou bien s'il convient d'avoir recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches.

(b) Pour les micropieux, la résistance de pointe n'est normalement pas pris en compte.

(c) Il convient de se référer à l'article A.10 pour le choix des périmètres et des aires des pieux à considérer dans les calculs.

(d) D'autres valeurs de  $k_{pm}$  peuvent être utilisées à condition de satisfaire les conditions de la clause 9 de la section 1.



## Approche numérique – modélisation



## Paramètres mesurés au pressiomètre

- Essai pressiométrique →
  - Résultats principaux:  $E_M$ ,  $p_1$  et  $p_f$
  - Module pressiométrique:
    - Mesure moyenne sur une large plage de déformation (environ 0,1 à 1,5 %)
      - Déformations élastoplastiques
      - Ne représente pas une raideur élastique
    - Le module pressiométrique ne peut pas être considéré comme un module de Young pour le calcul des déformations
  - Critères de Mohr-Coulomb:
    - Cohésion ?
    - Angle de frottement interne ?



## Loi de comportement hyperbolique

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Loi de comportement hyperbolique type Hardening Soil

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 / K_0^{NC} \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m$$



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



17

## Module œdométrique – détermination et calibration

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Loi de comportement hyperbolique type Hardening Soil

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 / K_0^{NC} \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m$$

- $E_{oed} \Leftrightarrow E_M ??? \rightarrow$  coefficient rhéologique

TYPE	Tourbe		Argile		Limon		Sable		Grave	
	$\alpha$	$E_M/p_1$								
Surconsolidé ou très serré	-	> 16	1	> 14	2/3	> 12	1/2	> 10	1/3	
Normalement consolidé ou normalement serré	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4	
Sous-consolidé altéré et remanié ou lâche	-	7-9	1/2	5-8	1/2	5-7	1/3			

Rocher	
TYPE	$\alpha$
Très peu fracturé	2/3
Normal	1/2
Très fracturé	1/3
Très altéré	2/3



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



18

## Module œdométrique – détermination et calibration

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)

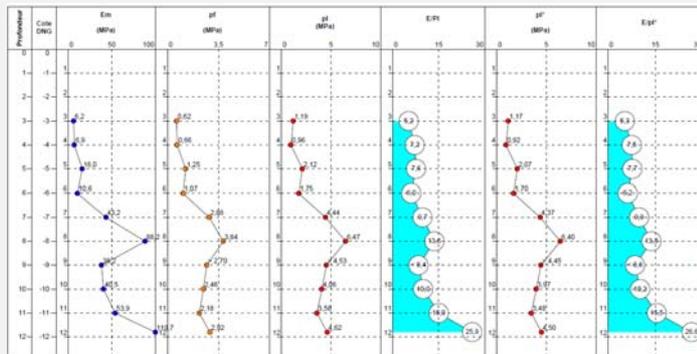
$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 / K_0^{NC} \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^* \cdot \sin \varphi'} \right)^m$$

$E_{oed} \propto \frac{E_M}{\alpha}$ 
 $\sigma'_3 / K_0^{NC} \approx \gamma' \cdot (z - z_0)$



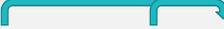
## Module œdométrique – détermination et calibration

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Déterminer  $E_{oed, ref}$  pour chaque mesure pressiométrique



## Module œdométrique – détermination et calibration

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Déterminer  $E_{oed, ref}$  pour chaque mesure pressiométrique

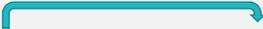


Couche	Profondeur [m]	Niveau [m]	$E_M$ [MPa]	$E/pt^*$ [-]	$\alpha$ [-]	$E_{oed}$ [MPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_v$ [kPa]	$u$ [kPa]	$\sigma'_v$ [kPa]	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]	$m$ [-]	$P_{ref}$ [kPa]	$E_{oed, ref}$ [MPa]
Alluvions	3	68.4	6.2	5.3	0.50	12.4	18	54.0	1.0	53.0	0	27	0.7	100	19.3
	4	67.4	6.9	7.5	0.50	13.8	18	72.0	10.8	61.2	0	27	0.7	100	19.5
	5	66.4	16	7.7	0.50	32	18	90.0	20.6	69.4	0	27	0.7	100	41.3
	6	65.4	10.6	6.2	0.50	21.2	18	108.0	30.4	77.6	0	27	0.7	100	25.3
	7	64.4	43.2	9.9	0.50	86.4	18	126.0	40.2	85.8	0	27	0.7	100	96.2
	8	63.4	88.2	13.8	0.50	176.4	18	144.0	50.0	94.0	0	27	0.7	100	184.3
	9	62.4	38.2	8.6	0.50	76.4	18	162.0	59.8	102.2	0	27	0.7	100	75.3
	10	61.4	40.5	10.2	0.50	81	18	180.0	69.7	110.3	0	27	0.7	100	75.6
	11	60.4	53.9	15.5	0.67	80.85	18	198.0	79.5	118.5	0	27	0.7	100	71.8
	Schiste altéré	12	59.4	12	26.6	0.67	18	20	218.0	89.3	128.7	100	25	1.0	100




## Module œdométrique – détermination et calibration

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Regrouper les valeurs par couche / sous-couche en fonction de la nature, des paramètres moyens...



Couche	Profondeur [m]	Niveau [m]	$E_M$ [MPa]	$E_{oed, ref}$ [MPa]	$E_{oed, ref, avg}$ [MPa]	$E_{oed, avg}$ [MPa]	$\sigma'_{v, avg}$ [kPa]	$E_{oed, ref, avg}$ [MPa]
Alluvions	3	68.4	6.2	19.3	24.0	17.3	65.3	23.3
	4	67.4	6.9	19.5				
	5	66.4	16	41.3				
	6	65.4	10.6	25.3				
	7	64.4	43.2	96.2				
	8	63.4	88.2	184.3				
	9	62.4	38.2	75.3				
	10	61.4	40.5	75.6				
	11	60.4	53.9	71.8				
	12	59.4	12	17.9				
Schiste altéré	12	59.4	12	17.9	18.0	128.7	17.9	

!!! Attention : moyennes harmoniques (pondérées) !!!

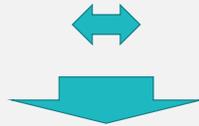


## Module œdométrique – détermination et calibration

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)

- Calibration des paramètres:

$$E_{oed} \propto \frac{E_M}{\alpha}$$



$$E_{oed} = \frac{E_M}{\alpha}$$

$$E_{oed} = k \frac{E_M}{\alpha}$$

- Calibration : déterminer k pour que le modèle Plaxis donne le même résultat qu'un calcul Ménard



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"

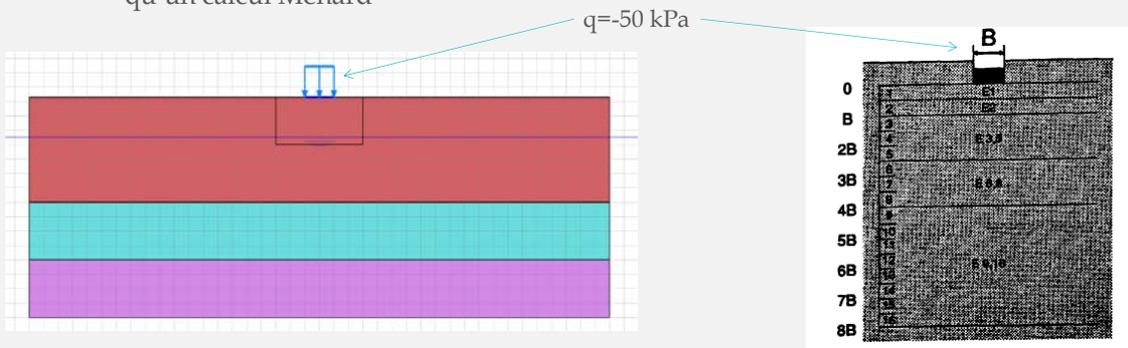


23

## Module œdométrique – détermination et calibration

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)

- Calibration : déterminer k pour que le modèle Plaxis donne le même résultat qu'un calcul Ménard



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



24

## Module œdométrique – détermination et calibration

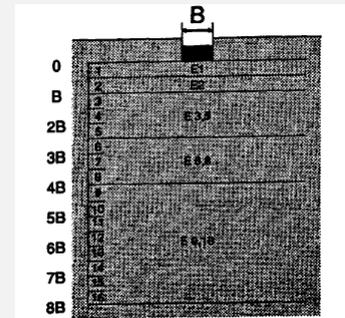
- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Calibration des paramètres:
    - Ménard:

$$s = \frac{(q-q_0)}{9} \left[ \frac{\alpha \cdot \lambda_c \cdot B}{E_c} + \frac{2 \cdot B_0}{E_d} \cdot \left( \lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha \right] = 7,8 \text{ mm}$$

$$E_c = E_1$$

$$\frac{4.0}{E_d} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{0,85 \cdot E_2} + \frac{1}{E_{3,5}} + \frac{1}{2,5 \cdot E_{6,8}} + \frac{1}{2,5 \cdot E_{9,16}}$$

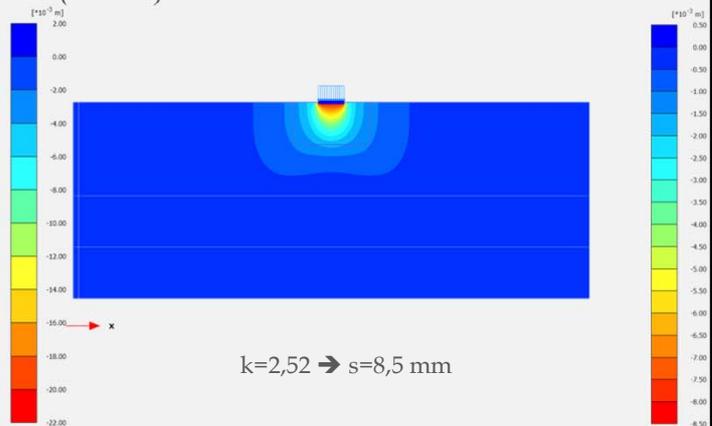
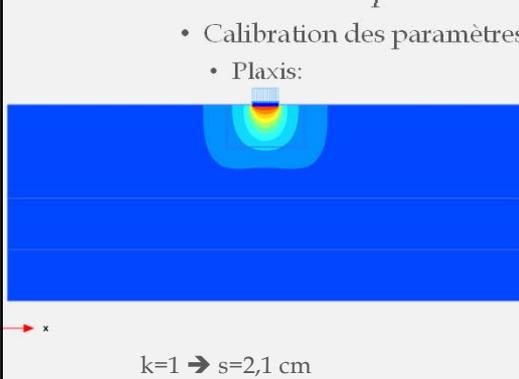
L/B	cercle	carré	2	3	5	20
$\lambda_c$	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
$\lambda_d$	1,00	1,12	1,53	1,78	2,14	2,65



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"

## Module œdométrique – détermination et calibration

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Calibration des paramètres:
    - Plaxis:



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



26

## Autres modules

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Loi de comportement hyperbolique type Hardening Soil

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 / K_0^{NC} \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m \quad \rightarrow \quad \text{OK}$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m \quad \rightarrow \quad ??$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m \quad \rightarrow \quad ??$$



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



27

## Autres modules

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Loi de comportement hyperbolique type Hardening Soil

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m \quad \rightarrow \quad ??$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m \quad \rightarrow \quad ??$$

- Corrélations « habituelles » :

- Limons, sables :

$$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} \quad E_{ur}^{ref} = 3 \times E_{50}^{ref}$$

- Argiles :

$$E_{50}^{ref} = 2 \cdot E_{oed}^{ref} \quad E_{ur}^{ref} = 5 \times E_{ur}^{ref}$$



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



28

## Autres modules

- Modélisation par éléments finis (Plaxis)
  - Loi de comportement hyperbolique type Hardening Soil

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m \quad \rightarrow \quad ??$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{ref} \cdot \sin \varphi'} \right)^m \quad \rightarrow \quad ??$$

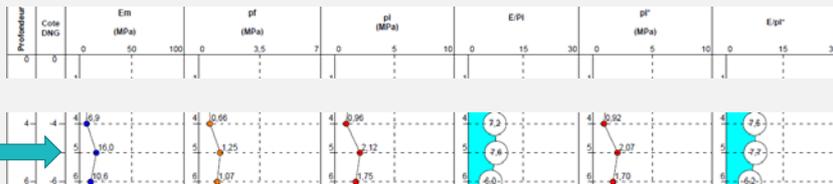
- Module de déchargement / rechargement  $E_{ur}^{ref}$  :
  - détermination par un cycle de déchargement / rechargement au pressiomètre ?
    - Normalisation de l'essai pressiométrique cyclique ?
    - Ramener la mesure à une valeur de référence



## Critères de Mohr-Coulomb

- Matériau cohésif – calcul en conditions non-drainées:
  - Exemple (Baguelin et al., 1978):

$$c_u = \frac{p_l - p_0}{N_p} \quad N_p = 1 + \ln \left( \frac{E_M}{3 \cdot c_u} \right)$$



$E_M$	$p_0$
[MPa]	[MPa]
16	2.07

$N_p$	$c_u$
[-1]	[MPa]
1.00	2.07
1.95	1.06
2.61	0.79
2.91	0.71
3.01	0.69
3.05	0.68
3.06	0.68
3.07	0.68
3.07	0.68
3.07	0.67
3.07	0.67



## Critères de Mohr-Coulomb

- Matériau pulvérulent – calcul en conditions effectives
  - Exemples (Combarieu\*, 1996):
    - Sols fortement surconsolidés ou compactés ( $20 \leq \phi \leq 50^\circ$ ):

$$\sin \phi = \frac{\ln \frac{2p_{l,c}}{\pi p_0}}{\ln \frac{E}{2p_{l,c}} + \left( \ln \frac{E}{2p_0} - \frac{4}{\pi} \right) \sin (\phi - \phi_1)}$$

!!module de second chargement!!

Angle de frottement critique ~ 33°

\* "À propos de la détermination de l'angle de frottement des sols pulvérulents au pressiomètre", O. Combarieu - Revue française de géotechnique n°77, 4<sup>e</sup> trimestre 1996



## Critères de Mohr-Coulomb

- Sols fortement surconsolidés ou compactés ( $20 \leq \phi \leq 50^\circ$ ):

$\frac{E/p_0}{p_{l,c}/p_0}$	25			50			75			100		
	$30^\circ$	$33^\circ$	$36^\circ$	$30^\circ$	$33^\circ$	$36^\circ$	$30^\circ$	$33^\circ$	$36^\circ$	$30^\circ$	$33^\circ$	$36^\circ \phi_1$
3												
4	$24^\circ 1/2$	$25^\circ 1/2$	$26^\circ 1/2$									
5	$28^\circ 1/2$	$29^\circ 1/2$	$31^\circ$	$24^\circ$	$25^\circ$	$26^\circ$	$22^\circ$	$23^\circ$	$24^\circ 1/2$			
125				$51^\circ$			$48^\circ$	$50^\circ$	$51^\circ 1/2$	$46^\circ 1/2$	$48^\circ$	$50^\circ$
150							$49^\circ$	$51^\circ$		$47^\circ 1/2$	$49^\circ$	$51^\circ$
175							$50^\circ$			$48^\circ$	$50^\circ$	$51^\circ 1/2$





## Merci pour votre attention

- Questions / commentaires ?



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



35



[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

## **L'utilité d'un cadre normatif** *N. Huybrechts, CSTC*





 **cstc.be**  
Régulateur • 12000000 • 10/0000

# Cadre normatif belge

*prof. ir. Noel Huybrechts*  
*CSTC, Division Géotechnique & KU Leuven*

 [www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

 [www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)

 **GBMS BGGG**  
[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

## Plan

- I. Introduction
- II. Normalisation en géotechnique
- III. [www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



## I. Introduction

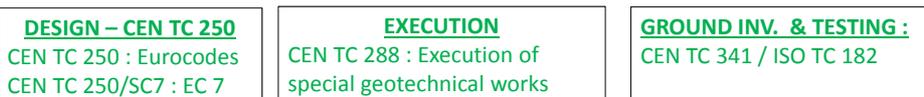
- Historique: pas de normes belges en géotechnique
- Cahier des charges sur base de NF, NEN, DIN, ...
  - Au cours des années : beaucoup de confusion, ...
- Depuis 1995:
  - élaborations des premiers ENs en géotechnique (design, exécution, tests)
  - programme de recherches CSTC (pieux, ancrages, micropieux, soutènements, soil mixing, ELS) } en collaboration avec le secteur
  - élaboration des documents complémentaires belges
- Depuis env. 2008: Coordination de la normalisation belge via opérateurs sectoriels



## II. NORMALISATION GEOTECHNIQUE



### NIVEAU EUROPEEN/INTERNATIONAL



### NIVEAU NATIONAL

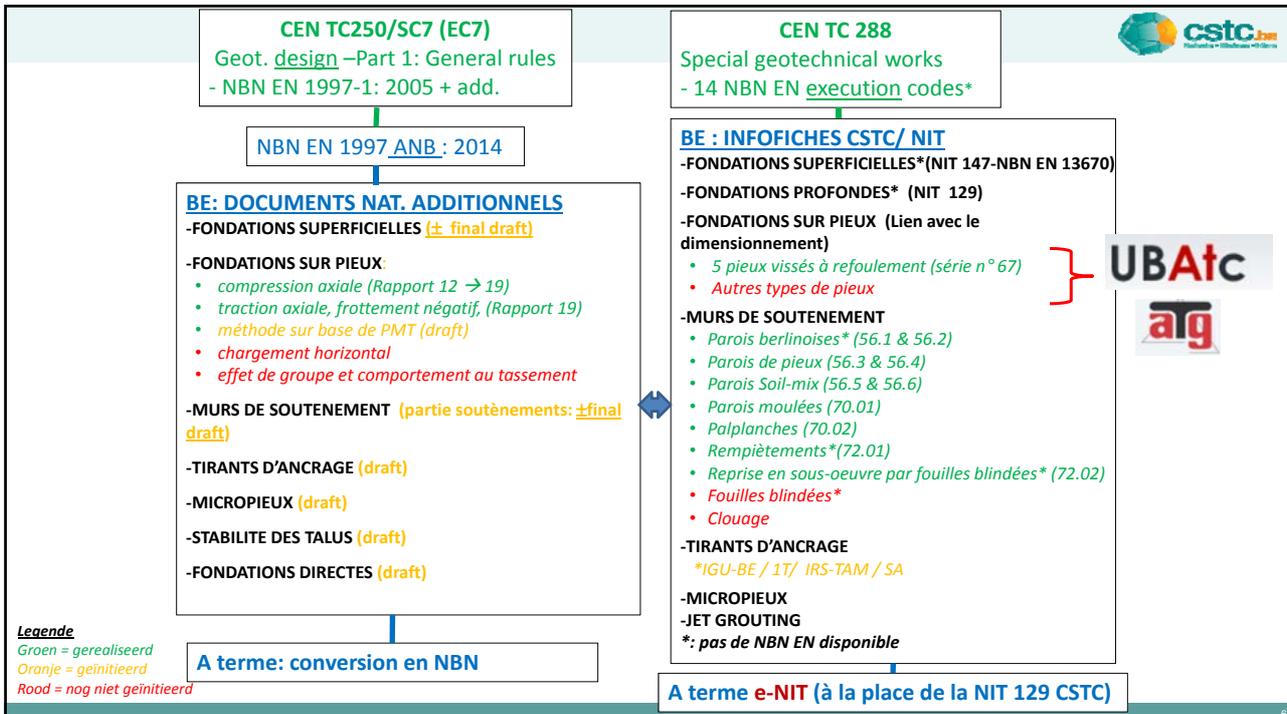
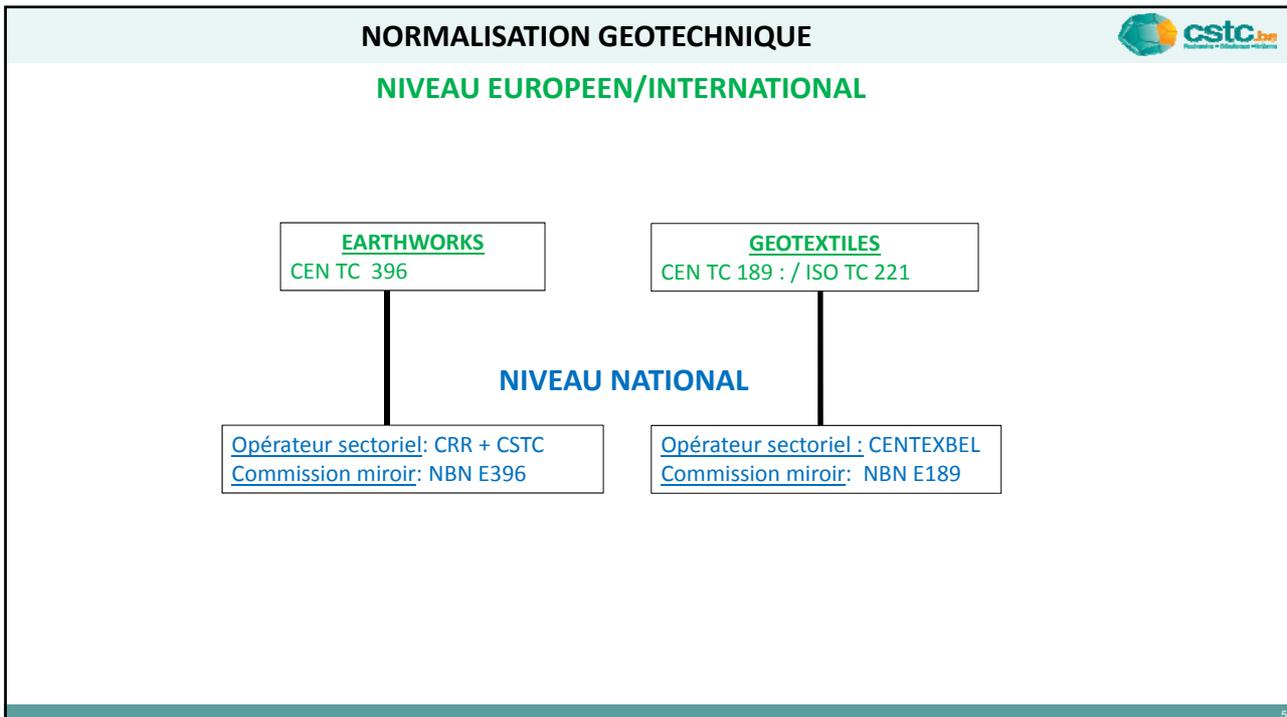


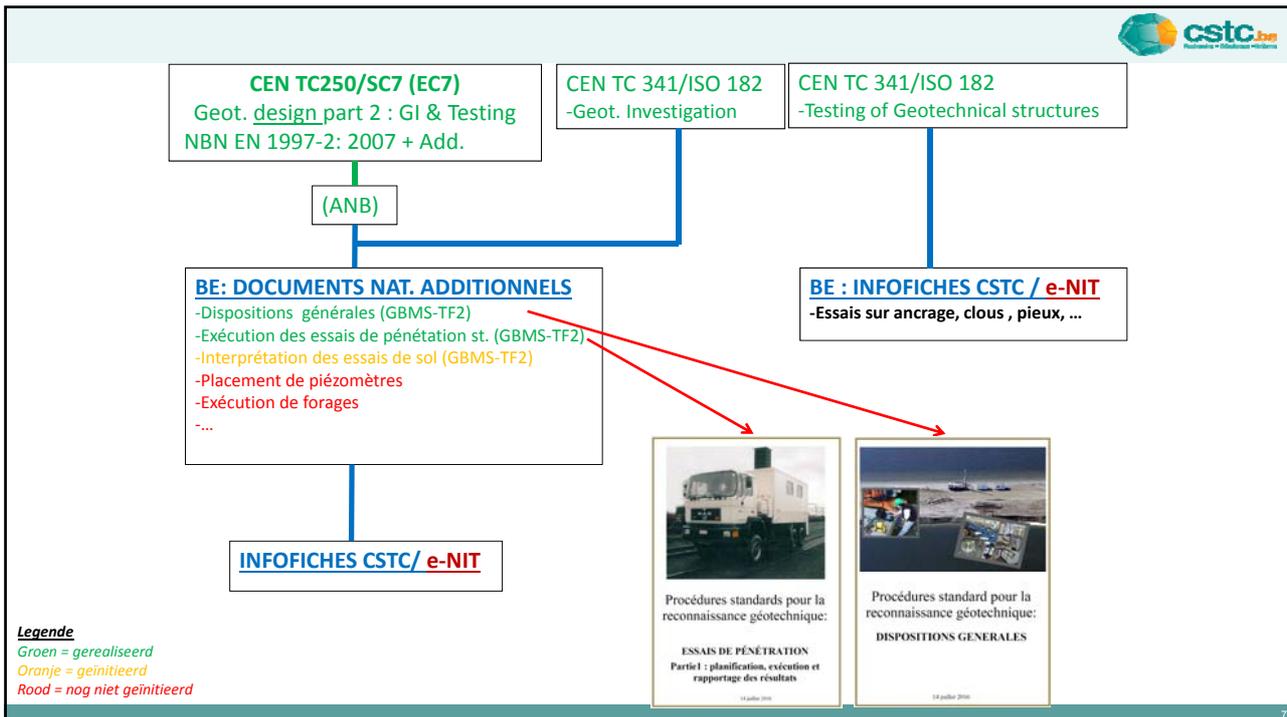
#### Tâches/compétences des commissions miroirs nationales

- Suivi du développement des EN's
- Déléguer des représentants/experts au niveau européen
- Etablir des ANB (EC)
- Etablir & formaliser des documents nationaux additionnels
- Etablir des NBN's



CSTC  
GBMS  
SBGIMR  
IE-NET





## III. Antenne Normes Géotechnique



www.normes.be/geotechnique

S'identifier | FR | NL | DE | EN

**Information & Assistance**

**Notre services**

Antennes Normes PME

- Table des normes de construction
- AN Prévention du feu
- AN L'acoustique
- AN L'énergie et le climat intérieur
- AN Béton-mortier-granulats
- AN Les Eurocodes structurels
- AN Éléments de façade manuels et motorisés
- AN Paraséisme
- AN Tolérances et aspect
- AN Détails constructifs
- AN Eau & Toitures
- AN Géotechnique
- AN Eclairage

### Antenne Normes Géotechnique

L'Antenne Normes (AN) Géotechnique a pour objectif d'informer le secteur des évolutions en matière de processus de normalisation en Europe et d'offrir un soutien technique quant au contenu et à l'application des normes géotechniques.

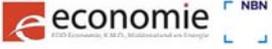
Ces dix dernières années ont en effet vu le développement de nombreuses normes dans le domaine du dimensionnement, des techniques d'exécution, des méthodes de reconnaissance du sol et des méthodes d'essai, ainsi que des matériaux utilisés (béton, coulis, solmix, géosynthétiques, ...).

L'AN donne un aperçu à jour des normes en vigueur. Vous pouvez ainsi retrouver via les différentes rubriques des informations relatives à la parution de nouvelles normes, aux initiatives entreprises actuellement à ce niveau, à des publications et à des événements. Des fiches explicatives et des documents complémentaires seront élaborés à partir de certaines normes et pourront être téléchargés via cette page.

L'AN offre de plus un soutien technique aux entreprises qui s'interrogent sur l'interprétation, l'application ou l'implémentation de normes spécifiques.

#### Elaboration des normes

La majorité des normes relatives à la géotechnique au sens large du terme ont été établies au niveau européen sous la compétence du CEN (Comité européen de normalisation). Les Commissions techniques (TC) complémentaires pour l'élaboration des normes géotechniques sont les suivantes:










[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

# **Dimensionnement des fondations superficielles**

*N. Charue, Geocos*





# L'essai pressiométrique et les fondations superficielles

Nicolas Charue

GeoCoS sa

Av Edison, 23 - 1300 Wavre

+32 10 48 82 04 - +32 486 65 72 66



www.sbgimr-bvigrm.be



www.normes.be/geotechnique

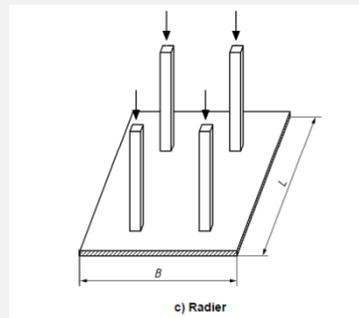
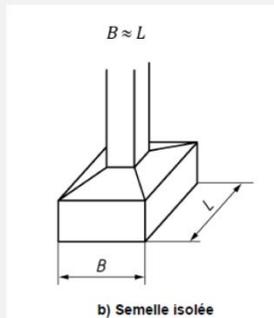
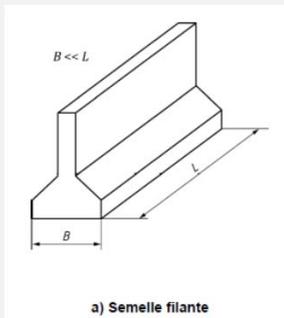


www.bggg-gbms.be



## Fondations superficielles

- Définition



→  $B, L$   
 $B/L$



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"

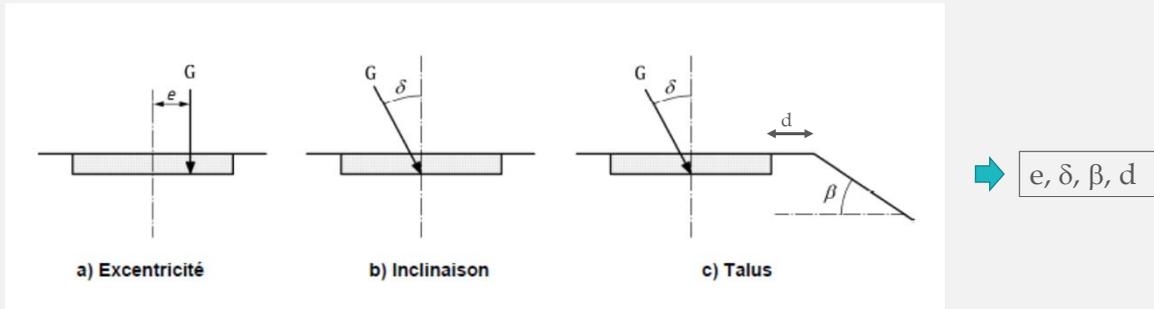


Ref : NF-P94-261

2

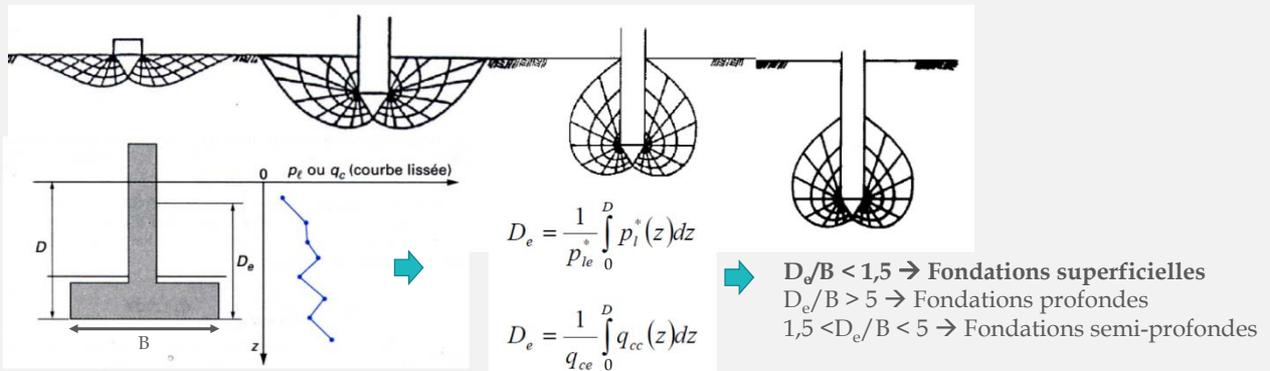
## Fondations superficielles

- Définition



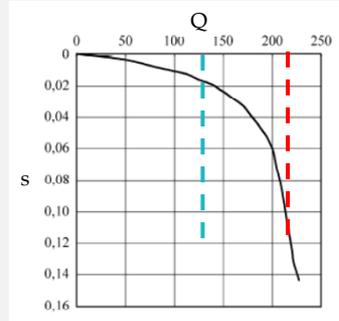
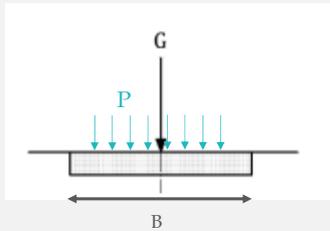
## Fondations superficielles

- Définition

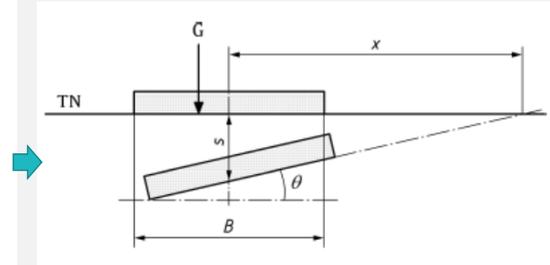


## Fondations superficielles

### • Définition



ELS, ELU



Tassement absolu ( $s$ )  
Tassement différentiel ( $\Delta s, \theta$ )

Ref : NF-P94-261

## Fondations superficielles

### • Norme de référence

- EN 1997-1 (section 6 - fondations superficielles)
- NAD belge : /
- NAD Français : NF P94-261
  - Domaine d'application
  - Comportements différents (types de fondation, mécanisme de ruine associés,)
  - Définitions des actions et propriétés géométriques, des matériaux et des terrains concernés
  - Combinaisons des actions, situations de calculs (EN 1990)
    - Transitoire, durable, accidentel, exceptionnel, sismique
    - ELS, ELU
- Justification des fondations superficielles

## Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELS)

Tableau 8.3.1 – Vérifications minimales à établir aux états limites de service pour les situations de projet en cours de construction et d'exploitation

Projet	Etat-limite	Situation de projet (caractère)
Tous les projets	GEO : tassement / rotation / tassement différentiel	Quasi-permanent et/ou Caractéristique
	GEO : excentrement du chargement	
	GEO : limitation de la charge transmise au terrain	
	STR : structure de la fondation	

Ref : NF-P94-261

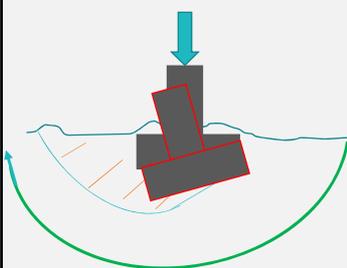
## Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELU)

Tableau 8.2.1 – Vérifications minimales à établir aux états limites ultimes pour les situations de projet en cours de construction et d'exploitation

Projet	Etat-limite	Situation de projet (caractère)	Combinaisons d'action
Tous les projets	GEO : stabilité générale du site	Exécution (Transitoire) et Exploitation (Durable) et/ou Exploitation (Transitoire)	Fondamentale
	GEO : poinçonnement		
	GEO : excentrement du chargement		
	GEO : glissement		
Selon le cas	STR : structure de la fondation		
	GEO : tassement / rotation		
Selon le cas	UPL : soulèvement	Accidentelle (choc)	Accidentelle
	GEO / STR		

Ref : NF-P94-261



# Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement)

$$E_d = E \left\{ \sum_{j=1}^n \gamma_{Gj,imp} G_{Gj,imp} + \sum_{j=1}^n \gamma_{Gj,stat} G_{Gj,stat} + \sum_{j=1}^n \gamma_{Qj,1} Q_{k,1} + \sum_{j=1}^n \gamma_{Qj,2} Q_{k,2} \right\} \quad V_d - R_0 \leq$$

Résistance nette du terrain caractéristique

$$R_{v;d} = \frac{R_{v;k}}{\gamma_{R;v}}$$

Facteur partiel ELU-poinç

Tableau B.3.3 - Facteurs partiels de résistance ( $\gamma_R$ ) pour les fondations superficielles

Résistance	Symbole	Ensemble	
		R2 <sup>a</sup>	R3 <sup>b</sup>
Portance	$\gamma_{Rv}$	1,4	1,0
Glissement	$\gamma_{Rh}$	1,1	1,0

a conforme au Tableau A.5 de l'Annexe A de NF EN 1997-1 - Ensemble R2. Ces valeurs sont applicables à la résistances des terres pour l'approche de calcul 2.  
 b conforme au Tableau A.5 de l'Annexe A de NF EN 1997-1 - Ensemble R3. Ces valeurs sont applicables à la résistances des terres pour l'approche de calcul 3.

Ref : NF-P94-261



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



9

# Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement)

$$V_d - R_0 \leq R_{v;d}$$

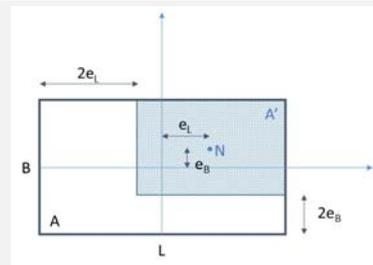
$$R_{v;d} = \frac{R_{v;k}}{\gamma_{R;v}}$$

Résistance nette du terrain caractéristique

$$R_{v;k} = \frac{A' q_{net}}{\gamma_{R;d;v}}$$

$$A' = A \left( 1 - 2 \frac{e_B}{B} \right) \left( 1 - 2 \frac{e_L}{L} \right) = (B - 2e_B)(L - 2e_L) = B'L'$$

Coef. de modèle associé à la méthode de calcul de  $q_{net}$



- . Essai in situ : CPT - PMT
- . Méthode analytique
- . Méthode numérique

Ref : NF-P94-261



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



10

# Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement)

$$V_d - R_0 \leq R_{v,d}$$

$$R_{v,k} = \frac{A' q_{net}}{\gamma_{R;d;v}}$$

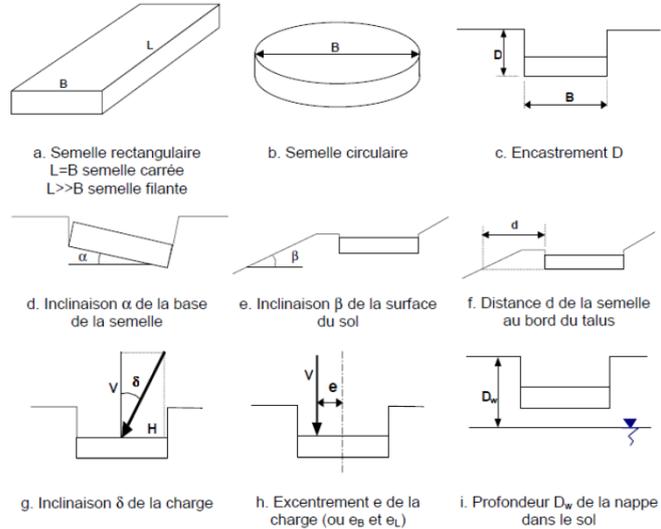
Evaluation de  $q_{net}$   
Méthode analytique (drainée)

$$q_{net} = c' N_c b_c s_c i_c + q'_0 N_q i_n$$

$$q_{net} = (\pi + 2) c_u b_c s_c i_c + i_n$$

Convient pour un sol homogène,  
Tient compte de :

$$\gamma_{R;d;v} = 1,2 \text{ (undrained - } c_u) / 2 \text{ (drained - } c', \phi')$$



# Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement)

$$V_d - R_0 \leq R_{v,d}$$

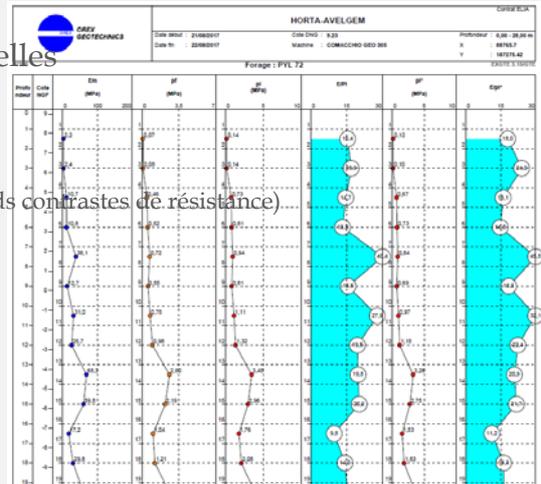
$$R_{v,k} = \frac{A' q_{net}}{\gamma_{R;d;v}}$$

Evaluation de  $q_{net}$   
Méthode pressiométrique

Convient pour tout sol (attention aux grands contrastes de résistance)

$$\gamma_{R;d;v} = 1,2$$

$$q_{net} = k_p p_{le}^* i_\delta i_\beta$$

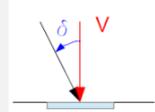


## Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement) - Evaluation de  $q_{net}$  - Pressiomètre

$$q_{net} = k_p p_{le}^* i_\delta i_\beta$$

Réduction de portance due à l'inclinaison de la charge [0-1]  
Caractère cohérent, frottant du sol  
 $f(D_e/B, c', \phi', \delta)$



$$\delta_d = \arctan\left(\frac{H_d}{V_d}\right)$$

$$i_{\delta, f, D_e/B} = \left(1 - \frac{2\delta_d}{\pi}\right)^2 - \frac{2\delta_d}{\pi} \left(2 - 3\frac{2\delta_d}{\pi}\right) e^{-D_e/B} \text{ pour } \delta_d < \pi/4$$

Ref : NF-P94-261



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



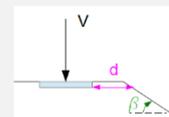
13

## Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement) - Evaluation de  $q_{net}$  - Pressiomètre

$$q_{net} = k_p p_{le}^* i_\delta i_\beta$$

Réduction de portance due à la proximité d'un talus (stable) [0-1] NA si  $d > 8B$   
Caractère cohérent et/ou frottant du sol  
 $f(D_e/B, \delta, \beta, c', \phi', \delta)$



$$i_{\beta, f, D_e/B} = 1 - 0.9(\tan \beta)(2 - \tan \beta) \left(1 - \frac{d + D_e/\tan \beta}{8B}\right)^2 \text{ pour } d + \frac{D_e}{\tan \beta} < 8B$$

Ref : NF-P94-261



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



14

# Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement) - Evaluation de  $q_{net}$  - Pressiomètre

$$q_{net} = k_p p_{le}^* j_{\delta} i_{\beta}$$

Pression limite nette équivalente

$$p_{le}^* = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n p_{l,k,i}^*}$$

Moyenne géométrique  $p_{l,i}^*$  entre D et D+h<sub>r</sub>

$h_r : [0 - 1,5B] \rightarrow f(B, e_B, e_L, ELS/ELU)$

$$h_r = 1,5B \text{ si } \left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) \geq \frac{1}{2} \text{ sinon } h_r = \min(3B-6e_B; 3B-6e_L) \text{ (ELU)}$$

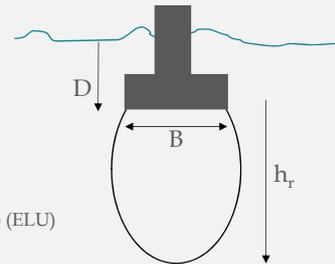
Ref : NF-P94-261



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



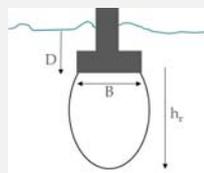
15



# Fondations superficielles

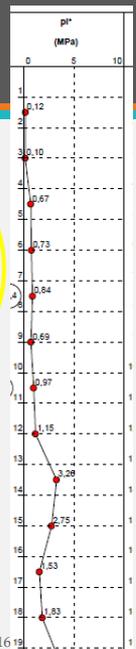
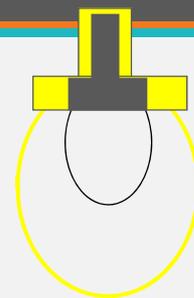
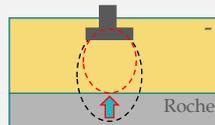
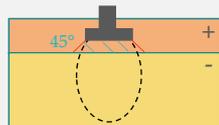
- Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement) - Evaluation de  $q_{net}$

$$q_{net} = k_p p_{le}^* j_{\delta} i_{\beta}$$



D : 4m  
B : 2 m → h<sub>r</sub> : 3 m

D : 4m  
B : 4 m → h<sub>r</sub> : 6 m



Ref : NF-P94-261



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



# Fondations superficielles

- Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement) - Evaluation

$$q_{net} = k_p p_{le}^* i_\delta i_\beta$$

Facteur de portance pressiométrique → f(sol; D<sub>e</sub>/B; B/L)  
 → NA si p<sub>l</sub>\* < 0,2 ... 0,3 MPa

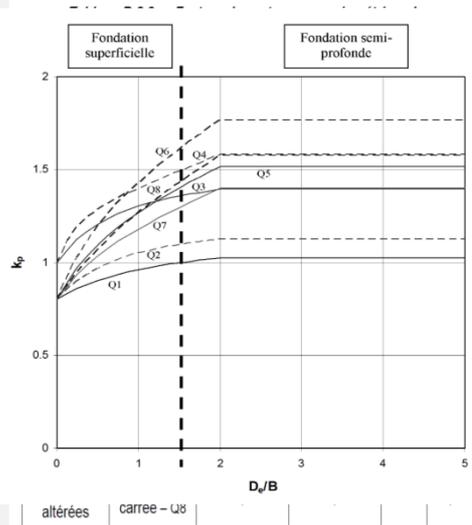
$$k_{p; \frac{B}{L}} = k_{p0} + \left( a + b \frac{D_e}{B} \right) \left( 1 - e^{-c \frac{D_e}{B}} \right) \quad B/L=1 \text{ et } B/L=0$$

$$k_{p; \frac{B}{L}} = k_{p; \frac{B}{L}=0} \left( 1 - \frac{B}{L} \right) + k_{p; \frac{B}{L}=1} \frac{B}{L} \quad B/L [0-1]$$

Ref : NF-P94-261

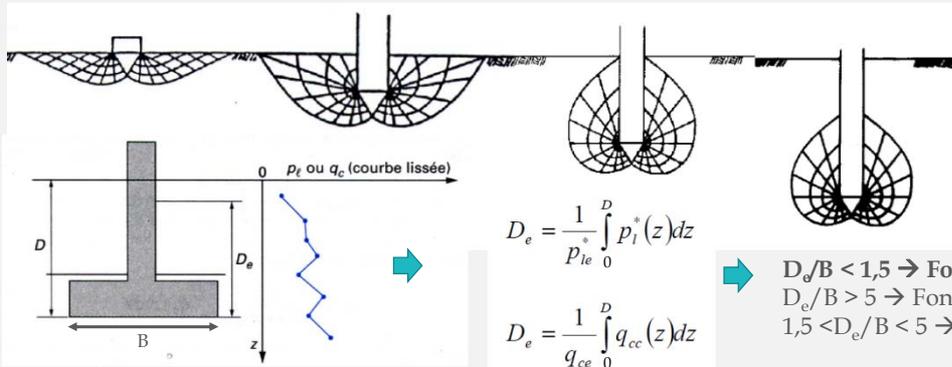


28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en



# Fondations superficielles

- Définition



D<sub>e</sub>/B < 1,5 → Fondations superficielles  
 D<sub>e</sub>/B > 5 → Fondations profondes  
 1,5 < D<sub>e</sub>/B < 5 → Fondations semi-profondes



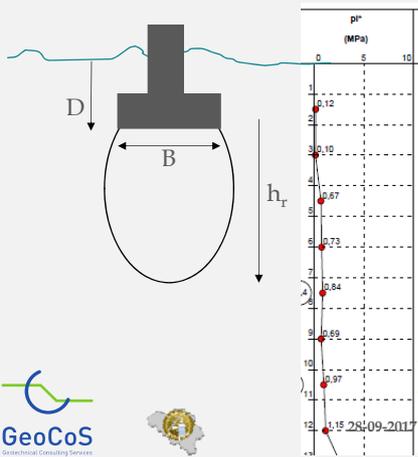
28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique



Ref : NF-P94-261  
 R. Frank

# Fondations superficielles

• Résumé



- Evaluation de  $D_e$
- Evaluation de  $h_r$
- Evaluation de  $p_{le}^*$
- Caractérisation du sol, évaluation de  $D_e/B \rightarrow$  choix de  $k_p$
- Proximité d'une pente? ( $i_\beta$ ), chargement incliné? ( $i_\delta$ )

$\rightarrow$  Calcul de  $q_{net}$

$$q_{net} = k_p p_{le}^* i_\delta i_\beta$$



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



Ref : NF-P94-261  
R. Frank

# Fondations superficielles

• Justification des fondations superficielles (ELU - GEO poinçonnement)

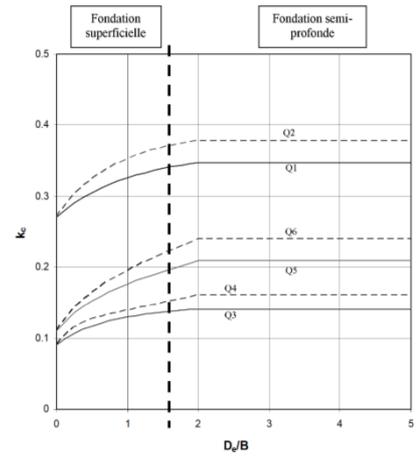
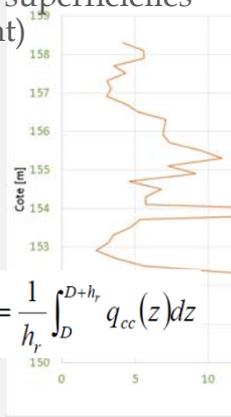
$$V_d - R_0 \leq R_{v;d}$$

$$R_{v;k} = \frac{A' q_{net}}{\gamma_{R;d:v}}$$

Evaluation de  $q_{net}$   
Méthode pénétrométrique  
Convient pour tout sol  
 $\gamma_{R;d:v} = 1,2$

$$q_{net} = k_c q_{ce} i_\delta i_\beta$$

$$q_{ce} = \frac{1}{h_r} \int_D^{D+h_r} q_{cc}(z) dz$$



Ref : NF-P94-261

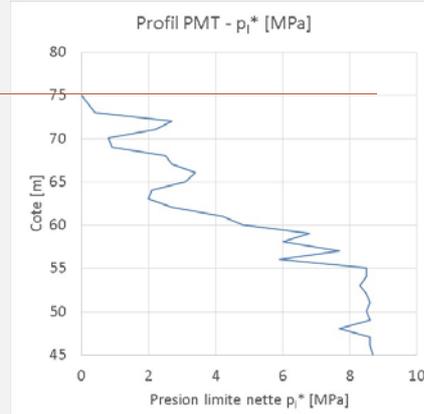
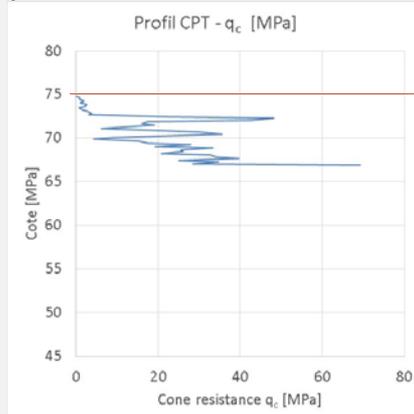


28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



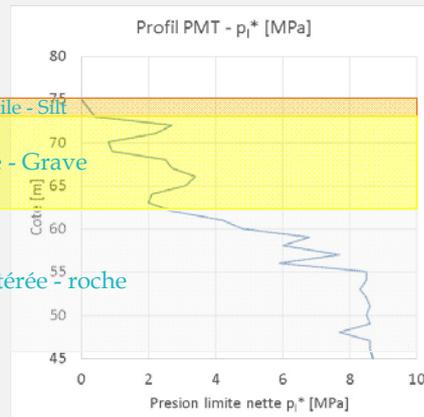
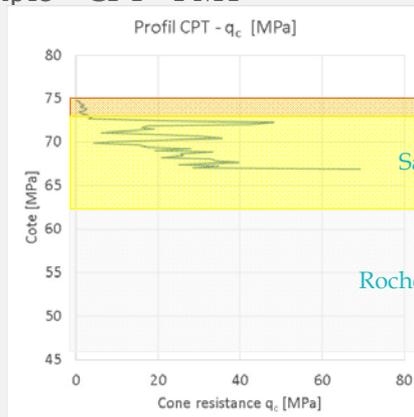
## Fondations superficielles

- Exemple - CPT - PMT



## Fondations superficielles

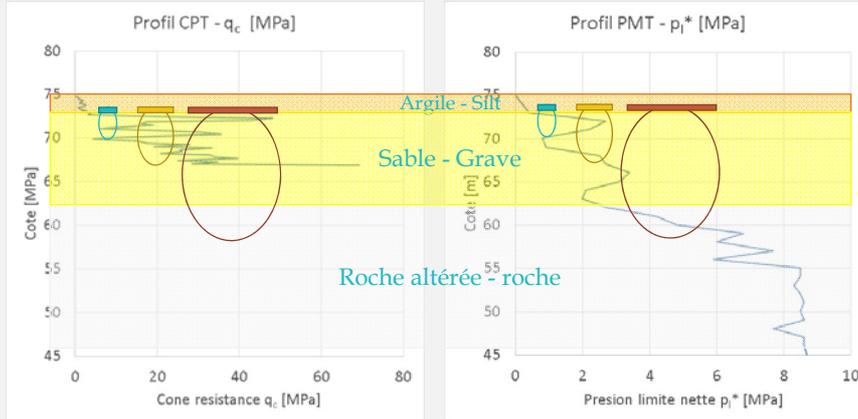
- Exemple - CPT - PMT



# Fondations superficielles

• Exemple - CPT - PMT

B = L	h <sub>r</sub>
2 m	3 m
4 m	6 m
10 m	15 m



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



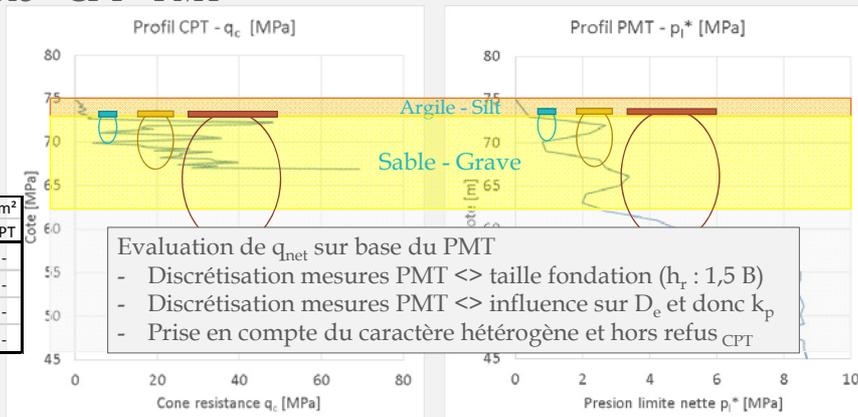
23

# Fondations superficielles

• Exemple - CPT - PMT

B = L	h <sub>r</sub>
2 m	3 m
4 m	6 m
10 m	15 m

	2x2 m <sup>2</sup>		4x4 m <sup>2</sup>		10x10 m <sup>2</sup>	
	PMT	CPT	PMT	CPT	PMT	CPT
D <sub>e</sub>	0,60	0,14	0,63	0,11	0,36	-
p <sub>1e</sub> */q <sub>ce</sub>	1,33	16,87	1,27	20,93	2,25	-
k <sub>p</sub> /k <sub>c</sub>	1,21	0,10	1,14	0,094	1,04	-
Q <sub>net</sub>	1,62	1,68	1,45	1,97	2,33	-



Evaluation de q<sub>net</sub> sur base du PMT

- Discrétisation mesures PMT <> taille fondation (h<sub>r</sub> : 1,5 B)
- Discrétisation mesures PMT <> influence sur D<sub>e</sub> et donc k<sub>p</sub>
- Prise en compte du caractère hétérogène et hors refus CPT



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



24

## Fondations superficielles

- Calcul du tassement (approche « Menard »)

Estimation sur base du module pressiométrique  $E_M$  (Ménard)

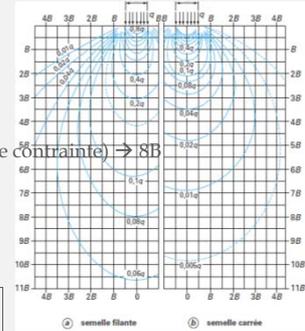
→ Fondation superficielle rigide / filante ou isolée

→ Tassement final (10 ans) intégré sur la profondeur (amortissement de l'accroissement de contrainte) → 8B

→ Fondation encastrée de B (min), sinon +20%

→ Tassement volumique et tassement déviatorique

→ Adapté aux cas de charge ELS quasi permanent



Evaluation du tassement final - sans tenir compte de la consolidation (f(t))

$$s_{oed} = \sum H_{couche\ i} \cdot \frac{\Delta\sigma'_v}{E_{0-couche\ i}}$$

ue

## Fondations superficielles

- Calcul du tassement (approche « Menard »)

$$s_f = s_c + s_d$$

$$s_c = \frac{\alpha}{9E_c} (q' - \sigma'_{v0}) \lambda_c B$$

$$s_d = \frac{2}{9E_d} (q' - \sigma'_{v0}) B_0 \left( \lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha$$

Sol homogène  $E_c = E_d = E_M$

Sol hétérogène  $E_c = E_1 (\sim B/2)$

$E_d = f(E_2 - E_{16})^{0.5B/2}$

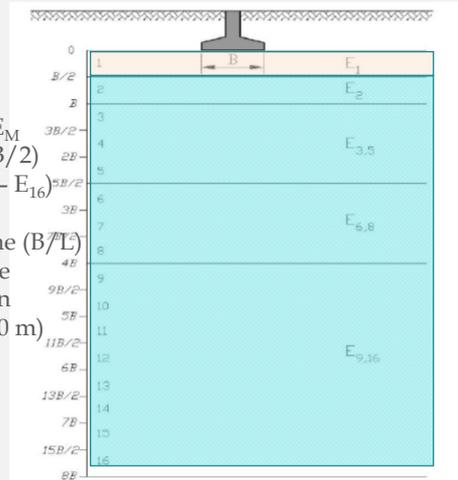
q : surcharge

$\lambda_c, \lambda_d$  : coefficient de forme (B/L)

$\alpha$  : coefficient rhéologique

B : largeur de la fondation

$B_0$  : dim de référence (0,60 m)



# Fondations superficielles

- Calcul du tassement (app)

$$s_f = s_c + s_d$$

$$s_c = \frac{\alpha}{9E_c} (q' - \sigma'_{v0}) \lambda_c B$$

$$s_d = \frac{2}{9E_d} (q' - \sigma'_{v0}) B_0 \left( \lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha$$

L/B	Cercle	Carré	2	3	5	20
$\lambda_c$	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
$\lambda_d$	1,00	1,12	1,53	1,78	2,14	2,65

Type	Tourbe		Argile		Limon		Sable		Grave	
	$\alpha$	$E_M/p_1$	$\alpha$	$E_M/p_1$	$\alpha$		$\alpha$	$E_M/p_1$	$\alpha$	
surconsolidé ou très serré	-	>	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3	
normalement consolidé ou normalement serré	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4	
surconsolidé altéré et remanié ou lâche	1	9-16	2/3	8-14	1/2	5-7	1/3	-	-	

$$\frac{1}{E_d} = \frac{0,25}{E_1} + \frac{0,3}{E_2} + \frac{0,45}{E_{3;5}} + \frac{0,1}{E_{6;8}} + \frac{0,1}{E_{9;16}}$$

$$E_M = \alpha E_{oed} \text{ (Menard)}$$

$$\frac{1}{E_{i;j}} = \frac{1}{j-i+1} \sum_{k=i}^j \frac{1}{E_k}$$



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



27

# Fondations superficielles

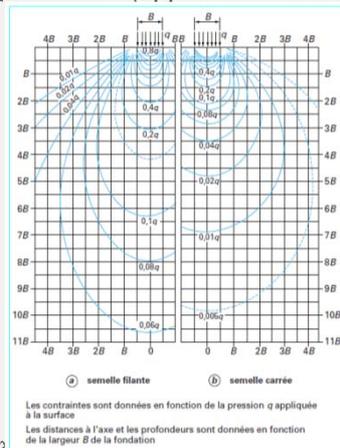
- Calcul du tassement – (approche « Menard »)

$$s_f = s_c + s_d$$

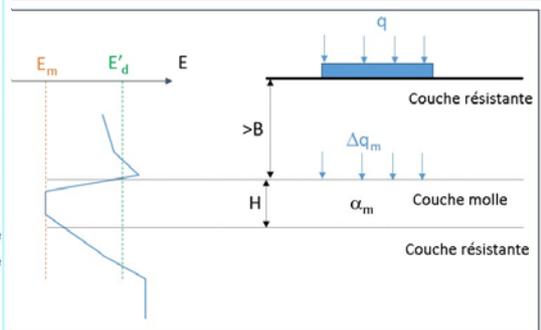
$$s_c = \frac{\alpha}{9E_c} (q' - \sigma'_{v0}) \lambda_c B$$

$$s_d = \frac{2}{9E_d} (q' - \sigma'_{v0}) B_0 \left( \lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha$$

$$s_m = \alpha_m \left( \frac{1}{E_m} - \frac{1}{E_d} \right) (\Delta q_m) H$$



+  $s_m$



mètre en Belgique



28

## Fondations superficielles

- Calcul du tassement (exemple)

$$s_c = \frac{\alpha}{9E_c} (q' - \sigma'_{v,0}) \lambda_c B$$

$$s_d = \frac{2}{9E_d} (q' - \sigma'_{v,0}) B_0 \left( \lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha$$

Fondation 2x2 m<sup>2</sup> (B)

q' : 200 kPa

α : 1/3 (sable/graves)

λ<sub>c</sub> : 1,1

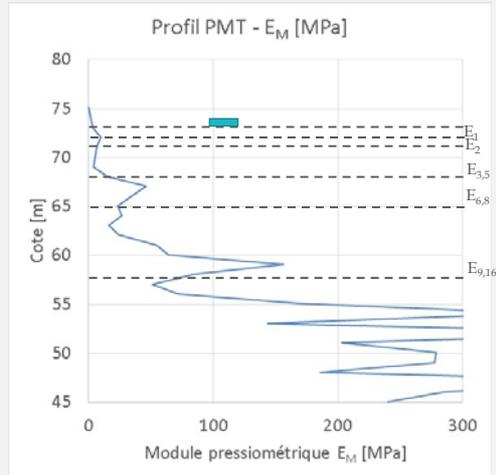
λ<sub>d</sub> : 1,12

E <sub>1</sub>	10
E <sub>2</sub>	7
E <sub>3,5</sub>	6
E <sub>6,8</sub>	32
E <sub>9,16</sub>	38
E <sub>c</sub>	10
E <sub>d</sub>	8,7

	[MPa]
s <sub>c</sub>	0,0012
s <sub>d</sub>	0,0035
	[m]

$$\frac{1}{E_d} = \frac{0,25}{E_1} + \frac{0,3}{E_2} + \frac{0,45}{E_{3,5}} + \frac{0,1}{E_{6,8}} + \frac{0,1}{E_{9,16}}$$

28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"

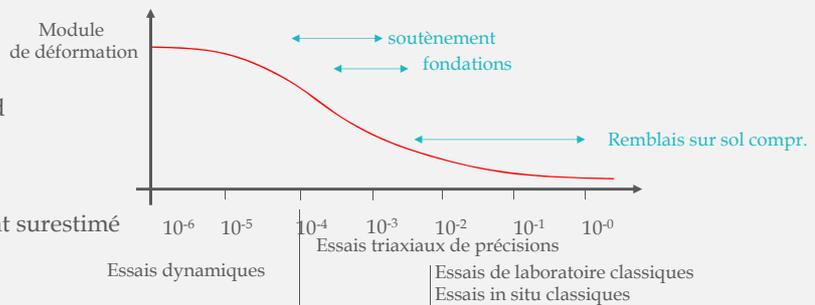


## Fondations superficielles

- Tassements - question des modules

Utilisation de E<sub>M</sub> et approche Menard  
 → Fond sup et charges ELS  
 (gamme calage modèle - expérience)

→ Si charges trop faibles → tassement surestimé



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



## Fondations superficielles

- Tassements - lien entre  $E_M$  et  $E$  (Young)

→ Equivalence entre modèle pressiométrique et modèle élastique (semelle circulaire - rigide)

$$s_c = \frac{\alpha}{9E_c} (q' - \sigma_{v0}') \lambda_c B$$

$$s_d = \frac{2}{9E_d} (q' - \sigma_{v0}') B_0 \left( \lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha$$



$$s = q \frac{1 - \nu^2}{E} B C_f$$

Coefficient de forme/rigidité (Giroud)

B [m]	0,6	1,2	3
$\alpha = 1$	2,08	2,08	2,08
$\alpha = 2/3$	2,33	2,78	3,45
$\alpha = 1/2$	2,5	3,23	4,55
$\alpha = 1/3$	2,7	4	6,25

→  $E/E_M = 2$  à  $6$  (en fonction de  $B$ ) ou  $E = 1$  à  $3 E_M/\alpha$

Ref : Combarieau



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



31

## Fondations superficielles

- Tassements - lien entre  $E_M$  et  $E$  (Young)

→ Annexe J de la norme NFP94-261

$E/E_M = 2$  à  $6$  (en fonction de  $B$ ) ou  $E = 1$  à  $3 E_M/\alpha$

Utilisation précautionneuse  
 $f(B, \text{cas de charge})$

Tableau J.2.1 — Valeurs indicatives d'un module de type Young  $E$  d'un sol par corrélation avec le module pressiométrique  $E_M$  pour le calcul des tassements des fondations superficielles à l'ELS quasi-permanent

		$E/E_M$
Argiles	Normalement consolidées	4,5
	Surconsolidées	3
Limos	Normalement consolidés	4,5
	Surconsolidés	3
Sables	Lâches	4,5
	Denses	3
Graves	Lâches	6
	Serrées	4,5

Notes :

a Les modules de type Young de sols comme les craies ou les marnes peuvent être déterminés par analogie avec les sols correspondants dans ce tableau.

b Dans le cas de surfaces chargées de grandes dimensions, comme les radiers où la pression de préconsolidation peut être dépassée, un module de type oedométrique sécant peut être défini à partir de la relation suivante :

$$M = \frac{E_M}{\alpha}$$

(où  $\alpha$  est le coefficient rhéologique défini dans l'Annexe H)

Des valeurs plus faibles de ce module de type oedométrique sécant doivent être prises compte dans certains cas, notamment celui de matériaux argileux faiblement consolidés. Dans ces cas, en l'état actuel de nos connaissances, il est par conséquent vivement recommandé de calculer les valeurs de tassement à partir de modules de déformation mesurés en laboratoire.

Ref : NF P94-261



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



32

# Fondations superficielles

Merci de votre attention



28-09-2017 Journée d'études "La pratique du pressiomètre en Belgique"



33





[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

# **Dimensionnement des fondations profondes**

*M. Allani, CSTC*





# Méthode de dimensionnement des pieux sur base de PMT

*dr. ir. Malek Allani*  
CSTC, Division Géotechnique



www.sbgimr-bvigrm.be



www.normes.be/geotechnique



www.bggg-gbms.be



## Plan

- I. Introduction: NF vs. R19
- II. Démarche de calibration NF vs. R19
- III. Calibration NF vs. R19 (résistance à la base  $R_b$ )
- IV. Calibration NF vs. R19 (résistance au frottement  $R_s$ )
- V. Méthode de dimensionnement 'préssio'
- VI. Conclusions



# I. Introduction

## Contexte

- Dimensionnement géotechnique en Belgique **NBN EN 1997-1**= cadre européen
- **Comités normatifs compétents** CEN TC 250/SC7 - Eurocode 7-1 et 7-2 & NBN E25007
- Annexes nationales en Belgique = ANB (2014)
  - Référence aux documents nationaux complémentaires
  - Méthode belge pour le dimensionnement des pieux:



Approuvé par la NBN E25007!



# I. Introduction

$$F_{c,d} \leq R_{c,d}$$

□ R19 → Méthode belge pour le dimensionnement des pieux:

- Pieu modèle
- Basé sur CPTs
- Le dimensionnement sur base du pressio n'est pas abordé

→GT 'Pressio' (GBMS, SBGIMR, CSTC, ...)

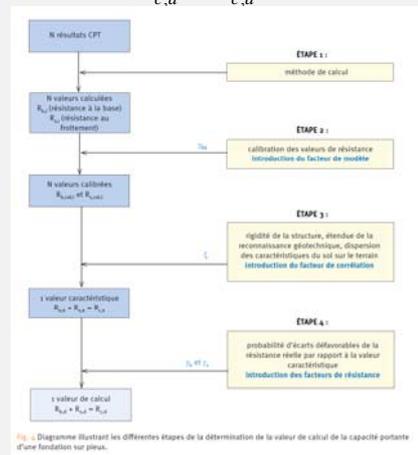


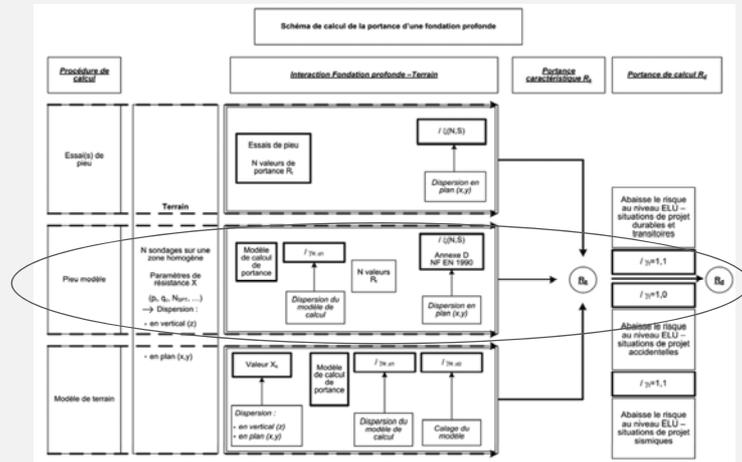
Fig. 1. Diagramme illustrant les différentes étapes de la détermination de la valeur de calcul de la capacité portante d'une fondation sur pieux.



# I. Introduction

□ Inspiration de la méthode française pour le dimensionnement des pieux NF P94 262:

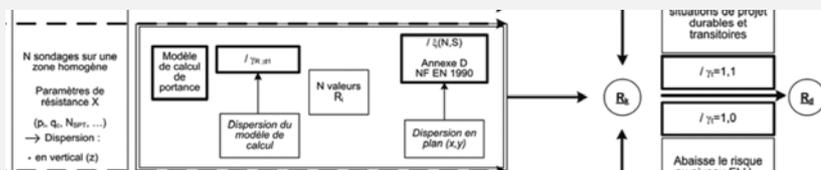
- Basée sur le 'pressio'
- Pieu modèle



# I. Introduction

• Méthode française pour le dimensionnement des pieux (pieu modèle):

- Même principe que le R19
- Facteurs partiels (modèle, corrélation, résistance)?



# I. Introduction

## Calcul de la résistance à la base $R_b$

- NF

$$R_{b,NF} = A_b q_b$$

$$q_b = k_p p_{le}^*$$

- $k_p$  : facteur de portance pressiométrique
- $p_{le}^*$  : pression limite nette équivalente déduite à partir du profil des pressions limites nettes  $p_i^*$
- $p_i^*$  : pression limite nette déduite à partir de la pression limite  $p_i$



- R19

$$R_{b,R19} = \alpha_b \varepsilon_b \beta \lambda A_b q_b$$

Facteurs selon R19      De Beer



# I. Introduction

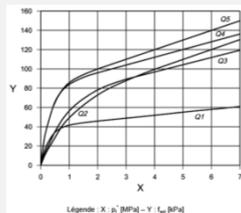
## Calcul de la résistance au frottement $R_s$

- NF

$$R_{s,NF} = \chi_s \int_0^D q_s(z) dz$$

$$q_{s,NF}(z) = \alpha_{pile\_soil} f[p_i^*(z)]$$

$\alpha_{pile\_soil}$  : paramètre adimensionnel fonction du type de pieu et du sol



- R19

$$R_{s,R19} = \chi_s \sum_i \alpha_{s,i} h_i q_{s,i}$$

$$q_{s,R19} = f(q_c)$$

Tableau 4 Valeurs de la résistance au frottement unitaire ( $q_s$ ) et du facteur ( $n_s^*$ ) selon le type de sol.

Type de sol	$q_c$ [MPa]	$n_s^*$ ou $q_s$ [kPa]	$R_s$ [%] (*)
Argile	1 - 4,5	$n_s^* = 1/30$	3 - 6 %
	$> 4,5$	$q_s = 150$	
Limons	1 - 6	$n_s^* = 1/60$	2 - 3 %
	$> 6$	$q_s = 100$	
Argile sableuse / limon sableux	1 - 10	$n_s^* = 1/80$	1 - 2 %
Sable argileux / limon argileux	$> 10$	$q_s = 125$	$< 1$ %
	1 - 10	$n_s^* = 1/90$	
Sable	10 - 20	$q_s = 110 + 4 * (q_c - 10)$	$< 1$ %
	$> 20$	$q_s = 150$	

(\*) Le coefficient de frottement ( $R_s$ ) est déterminé à partir d'un essai de pénétration statique réalisé avec un cône électrique.



## II. Démarche de calibration NF vs. R19

- ❑ CPT → essai de base en Belgique
- ❑ Il est difficile (voire impossible) à exécuter dans les sols durs (marne, roche...)
- ❑ Nécessité de proposer une méthode de calcul pressiométrique en accord avec le R19
- ❑ Exercice de calibration réalisé dans le cadre du GT 'pressio' → calibration des méthodes de calcul entre les deux normes



## II. Démarche de calibration NF vs. R19

### Exercice de calibration :

- ❑ La méthode de calcul pour la base et pour le frottement sera séparée.
- ❑ Résistance à la base → utilisation de la base de données en appliquant la NF et le R19 sur CPTs et PMTs à proximité
- ❑ Résistance au frottement → Corrélations ( $q_c-p_f^*$ )
- ❑ Présenter les valeurs calculées selon les deux méthodes et déduire des tendances selon le type de sol et de pieu
- ❑ Analyse paramétrique : influences du diamètre, de la profondeur, application des facteurs partiels. Divergences?



## II. Démarche de calibration NE vs R19

Pieux vissés

Pieux forés

Pieux battus

Pieux CFA



Deux cas extrêmes de pieux CFA ont été considérés

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
3	3	Foré tubé (virole perdus)	FPF	NF EN 1536
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
5	5	Foré simple ou boue avec ravaillage ou pulvé	FSP, FSB, FV	NF EN 1536
	6	Foré tambour creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	
7	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
9	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton - mortier - coulis)	BE	
11	11	Battu moulé	BM	NF EN 12699
	12	Battu acier fermé	BAF	
13	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN 12699
	14	Profilé H battu	HB	
15	15	Profilé H battu injecté	HBI	NF EN 12699
	16	Palplanches battues	PP	
17	17	Micropieu type I	MI1	NF EN 1536/14159/12699
	18	Micropieu type II	M2	
19	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	NF EN 1536/14159/12699
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IFS (type IV)	PIFS, MIFS	

Tableau A.1 Classes et catégories de pieux



Tableau 1 Valeurs des facteurs d'installation pour la résistance à la base (R<sub>b</sub>) et pour la résistance au frottement en compression (R<sub>c</sub>) en fonction du type de pieux.

Type de pieux	Base R <sub>b</sub>		Frot R <sub>c</sub> (°)	
	Argile tertiaire	Autres sols	Argile tertiaire	Autres sols
<b>CATÉGORIE (1) : PIEUX À PROFONDEMENT</b>				
<b>PIeux enrobés de béton</b>				
Pieu en béton préfabriqué sans base élargie	1	1	0,8	1
Pieu moulé dans le sol sans base élargie (1, fil et filot plastique)	1	1	0,9	1
Pieu moulé dans le sol à base élargie (1, fil et filot plastique)	1	1	— (1)	— (1)
Pieu moulé dans le sol à base élargie moullée dans le sol, fil et filot en béton	1	1	1,15	1,15
Pieu en acier fermé dans le banc sans base élargie (1)	1	1	0,6	0,6
Pieu en acier fermé dans le banc à base élargie (1)	1	1	— (1)	— (1)
Pieu en acier tubé ouvert, situation avec formation de bouillon (1)	1	1	0,6	0,6
<b>Pieux vissés ou catégorisés (1)</b>				
Fil en béton plastique (1)	0,8	0,7	0,9	1
Avec tubage perdu ou temporaire et injection de coulis (1)	0,8	0,8	0,6	0,6
<b>CATÉGORIE (2) : PIEUX AVEC PEU DE RETOULAGE OU DE DÉCOMPRESSION DU SOL</b>				
<b>PIeux BATTUS</b>				
Pieu en acier tubé ouvert, situation sans formation de bouillon (1)	1	1	0,6	0,6
Profilés en I et palplanches	1	1	0,6	0,6
<b>PIeux vissés de catégorie II (1)</b>				
Fil en béton plastique (1)	0,8	0,5	0,6	0,6
Avec tubage perdu ou temporaire et injection de coulis (1)	0,8	0,5	0,6	0,6
<b>PIeux à tige creuse avec supports vissés à limiter la décompression du sol</b>				
Tige creuse avec tube central de grand diamètre et profilés hélicoïdaux (1)	0,8	0,5 (0,8 (1))	0,6	0,6 (0,7 (1))
Avec surpression	0,8	0,5	0,6	0,6
Tube	0,8	0,5	0,3	0,4
<b>CATÉGORIE (3) : PIEUX EN TIGES CONTINUES</b>				
<b>PIeux à tige creuse continue sans dispositifs visant à limiter la décompression du sol</b>				
	0,8	0,5	0,3	0,4
<b>PIeux FORÉS</b>				
Exclusif avec un tubage temporaire	0,8	0,5	— (1)	— (1)
Exclusif avec base bertonitique	0,8	0,5	0,5	0,6
Exclusif sans tubage temporaire ni base bertonitique	0,8	— (1)	0,5	— (1)



## III. Calibration NF vs. R19 (R<sub>b</sub>)

Ensemble des données disponibles (GT 'pressio')

→ différents types de sol

+

→ différents types de pieux (vissés, forés, battus, CFA)

$$R_{b,NF} / R_{b,R19} = ?$$

+ idée sur R<sub>s</sub> et R<sub>tot</sub>

SITE	Nature du sol	Investigation de sol		Pieux		Contact
		CPT	PMT	Type	Longueur	
site 1	Limon, sable	Oui (CPT-E)	Oui	Pieux vissés, pieux prefab	9.50 m	CSTC
site 2	Argile de Boom	Oui (CPT-E)	Oui	Pieux vissés, pieux prefab	7.50 - 11.50 m	CSTC
site 3	Argile tertiaire et sable	oui (CPT-M)	oui			Franki
site 4	sol hétérogène et argile surconsolidée	oui (CPT-M)	oui			Franki
site 5	Sable compact	oui (CPT-E)	oui			CFE
site 6		oui	oui			CFE
site 7		oui (CPT-E)	oui			CFE
site 8		oui (CPT-E)	oui			CFE
site 9		oui	oui			CFE
site 10	leperse klei	Ja (CPT-E15-10-M)	Ja	CFA - 600	22 m	TucRail
site 11	zand	Ja (CPT-E15-10)	Ja	tubex fundex	9, 10 m	TucRail
site 12	zand	Ja (CPT-E15)	Ja	geïnjecteerde boorpalen	17,4 m	TucRail
site 13	zand	oui	oui			TucRail
site 14	remblais, alluvions	Oui (CPT-M)	Oui	Pieux PCS-lambda	10m - 12m	SPW
site 15	remblais, alluvions	Oui (CPT-M)	Oui	Pieux forés	15m	SPW
site 16	remblais, alluvions	Oui (CPT-M)	Oui	Micropieux	13m - 17m	SPW
site 17	remblais, alluvions	Oui (CPT-M)	Oui	Pieux forés	14m	SPW
site 18	alluvions, schistes décomposés, schiste	Oui (CPT-M)	Oui	Pieux forés	15m	SPW
site 19	schistes décomposés - schistes	Oui (CPT-M)	Oui	Micropieux	11 m	SPW
site 20	Alluvions de Meuse/schiste	Oui (CPT-E)	Oui	Pieux forés de gros diamètres	11 à 15 m	Tractebel
site 21	Alluvions de Meuse/schiste	Oui (CPT-E)	Oui	Pieux forés de gros diamètres	11 à 15 m	Tractebel



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 1 (base: sable tertiaire)
- Pieux vissés
  - Calculs ponctuels

site 1												
Pieux vissés				NF					NB			
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base	kp /kpmax	ple* [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]	qb [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]
a1 fundex 38/45	7.38	limon sol het	sable	1	/	1000	891	1891	/	1378	892	2270
A2 Olivier 36/51	11.5	limon sol het	sable	1	/	1505	1175	2680	/	1707	1069	2776
A3 OMega 41/41	7.53	limon sol het	sable	1	/	836	926	1762	/	1185	881	2066
A4 de wall 41/41	11.73	limon sol het	sable	1	/	833	942	1775	/	1236	859	2095
B3 atlas 36/51	11.68	limon sol het	sable	1	/	1294	1147	2441	/	2044	1001	3045
b4 atlas 36/51	7.43	limon sol het	sable	1	/	1294	1147	2441	/	1911	1137	3048
C1 fundex 38/45	7.67	limon sol het	sable	1	/	1006	918	1924	/	1526	762	2288
C2 olivier 36/51	11.83	limon sol het	sable	1	/	1510	1155	2665	/	1808	883	2691
c3 omega 41/41	11.76	limon sol het	sable	1	/	836	926	1762	/	1260	740	2000
C4 deWaal 41/41	7.72	limon sol het	sable	1	/	832	940	1772	/	1304	759	2063

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 1 (base: sable tertiaire)
- Pieux vissés
  - Calculs ponctuels

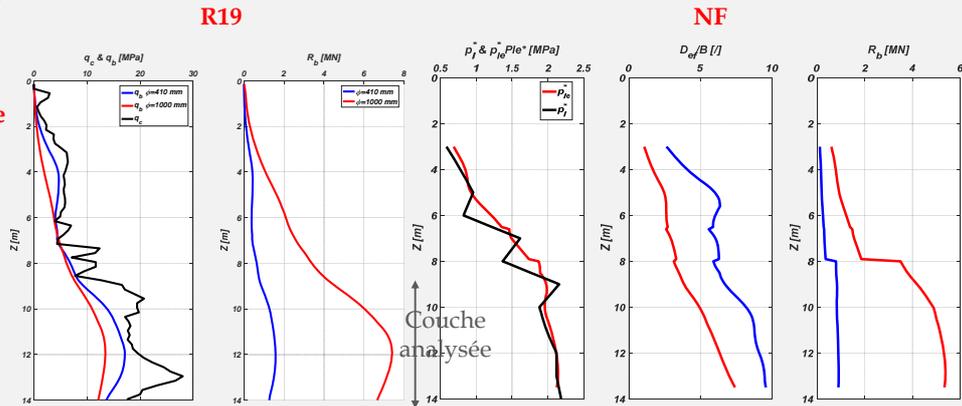
site 1						
Pieux vissés				$R_{b,NF} / R_{b,R19}$	$R_{s,NF} / R_{s,R19}$	$R_{c,NF} / R_{c,R19}$
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base			
A2 Fundex 38/45	7.38	limon sol het	sable	0.73	1.00	0.83
A3 Fundex 38/45	11.5	limon sol het	sable	0.88	1.10	0.97
B1 De waAl 41/41	7.53	limon sol het	sable	0.71	1.05	0.85
B2 De wall 41/41	11.73	limon sol het	sable	0.67	1.10	0.85
B3 olivier 36/51	11.68	limon sol het	sable	0.63	1.15	0.80
B4 olivier 36/51	7.43	limon sol het	sable	0.68	1.01	0.80
C1 Omega 41/41	7.67	limon sol het	sable	0.66	1.20	0.84
C2 omega 41/41	11.83	limon sol het	sable	0.84	1.31	0.99
C3 atlas 36/51	11.76	limon sol het	sable	0.66	1.25	0.88
C4 atlas 36/51	7.72	limon sol het	sable	0.64	1.24	0.86
<b>Moyenne</b>				<b>0.71</b>	<b>1.14</b>	<b>0.87</b>

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 1 (base: sable tertiaire)
- Pieux vissés
  - Analyse paramétrique

site 1

CPT A1 vs PMT1 bis



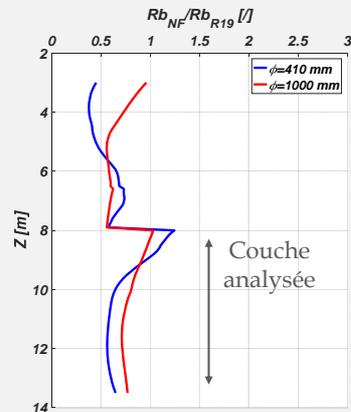
### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 1 (base: sable tertiaire)
  - Ratio NF/R19 :
    - ✓ Assez constant avec la profondeur
    - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre
- Pieux vissés
  - Analyse paramétrique

$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.6-0.7$$

site 1

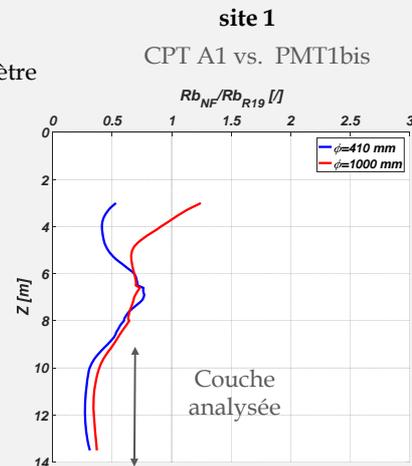
CPT A1 vs. PMT1bis



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Ratio NF/R19 :
      - ✓ Assez constant avec la profondeur
      - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre
- Site 1 (base: sable tertiaire)
- Pieux forés
  - Analyse paramétrique

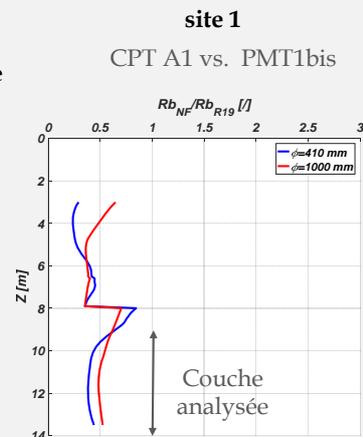
$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.4$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Ratio NF/R19 :
      - ✓ Assez constant avec la profondeur
      - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre
- Site 1 (base: sable tertiaire)
- Pieux battus
  - Analyse paramétrique

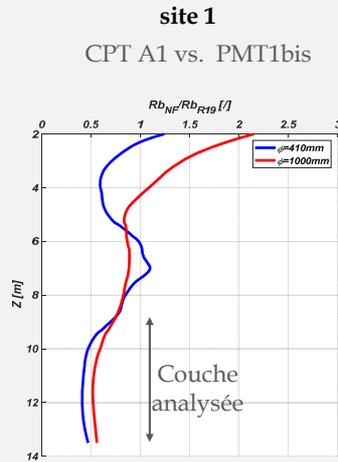
$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.4-0.5$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 1 (base: sable tertiaire)
  - Ratio NF/R19 :
    - ✓ Assez constant avec la profondeur
    - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre
- Pieux CFA
  - Analyse paramétrique

$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.4-0.6$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 2 (base: argile tertiaire)
- Pieux vissés
  - Calculs ponctuels

				site 2								
Pieux vissés				NF					NB			
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base	kp /kpmx	ple* [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]	qb [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]
A2 Fundex 38/45	7.38	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	218	520	738	/	255	361	616
A3 Fundex 38/45	11.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	255	895	1150	/	322	853	1175
B1 De waAl 41/41	7.53	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	185	576	761	/	212	448	660
B2 De wall 41/41	11.73	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	220	989	1209	/	252	916	1168
B3 oliviar 36/51	11.68	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	338	1224	1562	/	374	1124	1498
B4 oliviar 36/51	7.43	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	282	704	986	/	336	577	913
C1 Omega 41/41	7.67	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	188	589	777	/	221	500	721
C2 omega 41/41	11.83	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	224	999	1223	/	198	912	1110
C3 atlas 36/51	11.76	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	343	1234	1577	/	366	1199	1565
C4 atlas 36/51	7.72	argile tertiaire	argile tertiaire	1	/	293	739	1032	/	350	653.28	1003.28
A1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.91	184	576	760	2.16	204	454	658
B1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.91	184	576	760	2.25	212	515	727
C1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.91	184	576	760	2.29	216	527	743
A8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.806	165	586	751	2.27	215	442	657
B8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.806	165	586	751	2.27	215	517	732

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

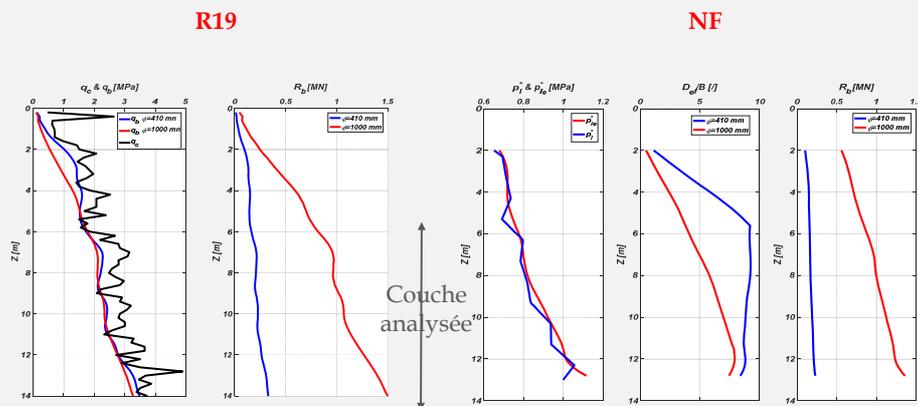
- Site 2 (base: argile tertiaire)
- Pieux vissés
  - Calculs ponctuels

Site 2						
Pieux vissés				$R_{b,NF} / R_{b,R19}$	$R_{s,NF} / R_{s,R19}$	$R_{c,NF} / R_{c,R19}$
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base			
A2 Fundex 38/45	7.38	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.85	1.44	1.20
A3 Fundex 38/45	11.5	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.79	1.05	0.98
B1 De waAl 41/41	7.53	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.87	1.29	1.15
B2 De wall 41/41	11.73	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.87	1.08	1.04
B3 olivier 36/51	11.68	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.90	1.09	1.04
B4 olivier 36/51	7.43	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.84	1.22	1.08
C1 Omega 41/41	7.67	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.85	1.18	1.08
C2 omega 41/41	11.83	Argile tertiaire	Argile tertiaire	1.13	1.10	1.10
C3 atlas 36/51	11.76	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.94	1.03	1.01
C4 atlas 36/51	7.72	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.84	1.13	1.03
A1 41/41	7.5	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.90	1.27	1.16
B1 41/41	7.5	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.87	1.12	1.05
C1 41/41	7.5	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.85	1.09	1.02
AS 41/41	7.5	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.77	1.33	1.14
BS 41/41	7.5	Argile tertiaire	Argile tertiaire	0.77	1.13	1.03
Moyenne				0.87	1.17	1.07

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 2 (base: argile tertiaire)
- Pieux vissés
  - Analyse paramétrique

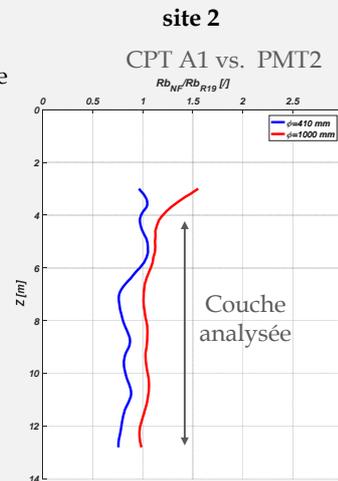
site 2  
CPT A1 vs PMT2



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 2 (base: argile tertiaire)
  - Ratio NF/R19 :
    - ✓ Assez constant avec la profondeur
    - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre
- Pieux vissés
  - **Analyse paramétrique**

$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.9-1$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 2 (base: argile tertiaire)
- Pieux forés
  - **Calculs ponctuels**

site 2												
Pieux forés sous boue				NF					NB			
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base	kp /kpmx	ple* [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]	qb [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]
A1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.9	136	379	515	2.16	204	252	456
B1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.9	136	379	515	2.25	212	286	498
C1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.9	136	379	515	2.29	216	293	509
B8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.9	122	385	507	2.27	215	246	461
C8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.9	122	385	507	2.27	215	287	502

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 2 (base: argile tertiaire)

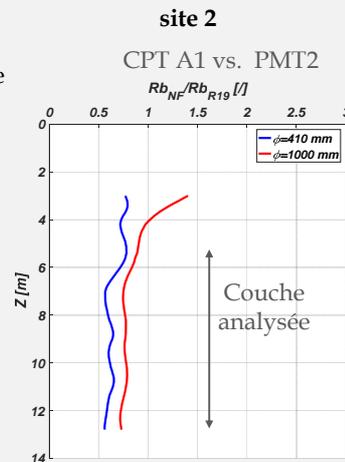
- Pieux forés
  - Calculs ponctuels

site 2						
Pieux forés sous boue				$R_{b,NF} / R_{b,R19}$	$R_{s,NF} / R_{s,R19}$	$R_{c,NF} / R_{c,R19}$
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base			
A1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.67	1.50	1.13
B1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.64	1.32	1.03
C1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.63	1.29	1.01
B8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.57	1.57	1.10
C8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.57	1.34	1.01
Moyenne				0.61	1.41	1.06

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 2 (base: argile tertiaire)
  - Ratio NF/R19 :
    - Assez constant avec la profondeur
    - Augmente légèrement avec le diamètre
- Pieux forés
  - Analyse paramétrique

$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.6-0.7$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 2 (base: argile tertiaire)
- Pieux battus
  - Calculs ponctuels

site 2												
Pieux battus				NF					NB			
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base	kp /kpmx	ple* [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]	qb [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]
A1 de wall 35*35	7.39	argile tertiaire	argile tertiaire	/	0.85	147	387	534	/	236	441	677
A4 de wall 35*35	11.58	argile tertiaire	argile tertiaire	/	1.05	173	613	786	/	293	1019	1312
A1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.86	143	339	482	2.16	255	454	709
B1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.86	143	339	482	2.25	265	515	780
C1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.86	143	339	482	2.29	270	527	797
A8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.9	160	333	493	2.27	269	442	711
B8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	1	0.9	160	333	493	2.27	269	517	786

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

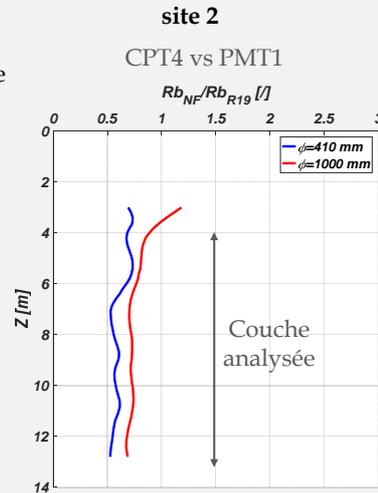
- Site 2 (base: argile tertiaire)
- Pieux battus
  - Calculs ponctuels

site 2						
Pieux battus				$R_{b,NF} / R_{b,R19}$	$R_{s,NF} / R_{s,R19}$	$R_{tot,NF} / R_{tot,R19}$
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base			
A1 de wall 35*35	7.39	argile tertiaire	argile tertiaire	0.62	0.88	0.79
A4 de wall 35*35	11.58	argile tertiaire	argile tertiaire	0.59	0.60	0.60
A1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.56	0.75	0.68
B1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.54	0.66	0.62
C1 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.53	0.64	0.60
A8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.60	0.75	0.69
B8 41/41	7.5	argile tertiaire	argile tertiaire	0.60	0.64	0.63
Moyenne				0.58	0.70	0.66

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 2 (base: argile tertiaire)
  - Ratio NF/R19 :
    - ✓ Assez constant avec la profondeur
    - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre
- Pieux battus
  - Analyse paramétrique

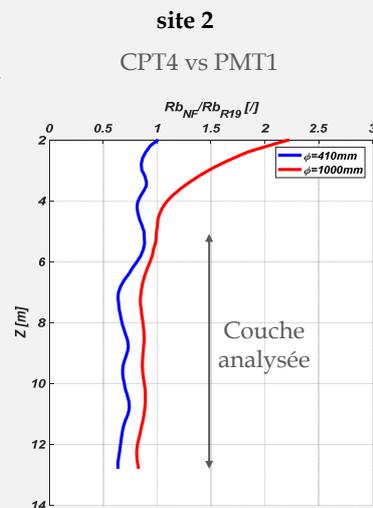
$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.6-0.7$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 2 (base: argile tertiaire)
  - Ratio NF/R19 :
    - ✓ Assez constant avec la profondeur
    - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre
- Pieux CFA
  - Analyse paramétrique

$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.8-0.9$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 3 (base: argile & sable tertiaire)
- Pieux CFA
  - Calculs ponctuels

site 3															
Pieux CFA $\Phi=460\text{mm}$				NF						NB					
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base	kp /kpmx	ple* [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]	qb [MPa]	Rb1 [kN]	Rb2 [kN]	Rs1 [kN]	Rs2 [kN]	Rtot1 [kN]	Rtot2 [kN]
P58	16	Sable (2m) Limon(4m) Sable(2m)	argile tertiaire	1	0.98	221	1472	1693	2.68	314	314	951	512	1265	826
P69	10	Sable (5m) Limon(1m) Sable(2m)	argile tertiaire	1	1.02	221	913	1134	1.71	200	200	672	377	872	577
P36	19	Sable argileux (9m) Argile/limon(4m) Sable(4m)	argile tertiaire	1	1.31	283	1911	2194	2.68	314	314	1586	890	1900	1204
Z2	12	Sable	sable et limon	1	1.22	336	1157	1493	6.37	521	635	990	566	1625	1201
Z2	16	Sable	sable	1	1.44	395	1677	2072	4.8	479	399	1383	790	1782	1189
Z3	16	Sable	sable et limon	1	1.94	534	1653	2187	12.9	1286	1072	1393	796	2465	1868

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 3 (base: argile & sable tertiaire)
- Pieux CFA
  - Calculs ponctuels

site 3									
Pieux CFA $\Phi=460\text{mm}$				$R_{b,NF} / R_{b1,R19}$	$R_{s,NF} / R_{s1,R19}$	$R_{b,NF} / R_{b2,R19}$	$R_{s,NF} / R_{s2,R19}$	$R_{c,NF} / R_{c1,R19}$	$R_{c,NF} / R_{c2,R19}$
Pieu	L (m)	Couches frottement	Sol base						
P58	16	Sable (2m) Limon(4m) Sable(2m)	argile tertiaire	0.70	1.55	0.70	2.88	1.34	2.05
P69	10	Sable (5m) Limon(1m) Sable(2m)	argile tertiaire	1.11	1.36	1.11	2.42	1.30	1.97
P36	19	Sable argileux (9m) Argile/limon(4m) Sable(4m)	argile tertiaire	0.90	1.20	0.90	2.15	1.15	1.82
Z2	12	Sable	sable et limon	0.64	1.17	0.53	2.04	0.92	1.24
Z2	16	Sable	sable et limon	0.82	1.21	0.99	2.12	1.16	1.74
Z3	12	Sable	sable et limon	0.42	1.19	0.50	2.08	0.89	1.17
Moyenne P58-P36				0.90	1.37	0.90	2.48	1.26	1.95
Moyenne Z2-Z3				0.63	1.19	0.67	2.08	0.99	1.39

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

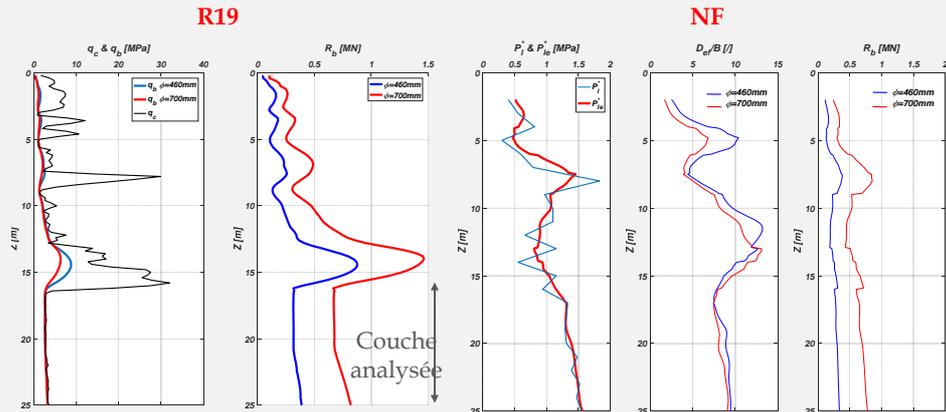
site 3

CPT DKM2361 vs. PMT P36

- Site 3 (base: argile & sable tertiaire)

- Pieux CFA

- Analyse paramétrique



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

site 3

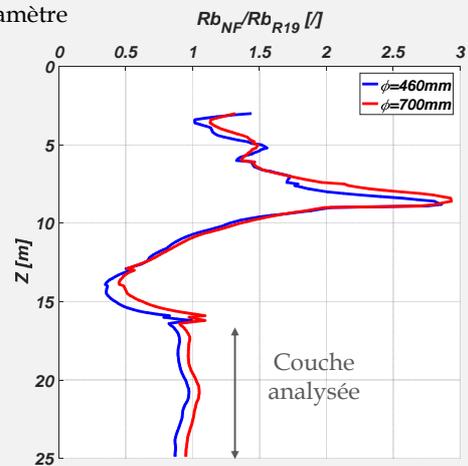
CPT DKM2361 vs. PMT P36

- Site 3 (base: sable & argile tertiaire)
  - Ratio NF/R19 :
    - ✓ Assez constant avec la profondeur
    - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre

- Pieux CFA

- Analyse paramétrique

$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.9-0.1$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 4 (base: argile tertiaire)
- Pieux CFA
  - **Calculs ponctuels**

site 4															
Pieux CFA $\Phi=460\text{mm}$				NF					NB						
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base	kp /kpmx	ple* [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]	qb [MPa]	Rb1 [kN]	Rb2 [kN]	Rs1 [kN]	Rs2 [kN]	Rtot1 [kN]	Rtot2 [kN]
F16 vs. P16_2010	16	Remblai limon sable grveleux	argile sableuse tertiaire	1	1.26	347	1249	1596	3.56	417	417	880	417	1297	834
SP1 vs. P04_2013	16	Remblai limon sable grveleux	argile sableuse tertiaire	1	1.56	338	1090	1428	3.35	392	392	1005	550	1397	942

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 4 (base: argile tertiaire)
- Pieux CFA
  - **Calculs ponctuels**

Pieux CFA $\Phi=460\text{mm}$				Site 4					
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base	$\frac{R_{b,NF}}{R_{b1,R19}}$	$\frac{R_{s,NF}}{R_{s1,R19}}$	$\frac{R_{d,NF}}{R_{d2,R19}}$	$\frac{R_{s,NF}/R_{s2}}{R_{19}}$	$\frac{R_{c,NF}}{R_{c1,R19}}$	$\frac{R_{c,NF}}{R_{c2,R19}}$
F16 vs. P16_2010	16	Remblai limon sable grveleux	argile sableuse tertiaire	0.83	1.42	0.83	3.00	1.23	1.91
SP1 vs. P04_2013	16	Remblai limon sable grveleux	argile sableuse tertiaire	0.86	1.08	0.86	1.98	1.02	1.52
Moyenne				0.85	1.25	0.85	2.49	1.13	1.71

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

site 4

CPT4 vs PMT1

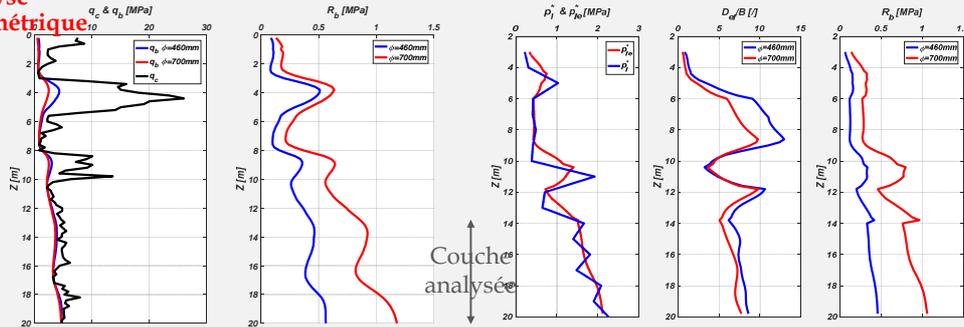
- Site 4 (base: argile tertiaire)

- Pieux CFA

R19

NF

- Analyse paramétrique



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 4 (base: argile tertiaire)

□ Ratio NF/R19 :

- ✓ Assez constant avec la profondeur
- ✓ Augmente légèrement avec le diamètre

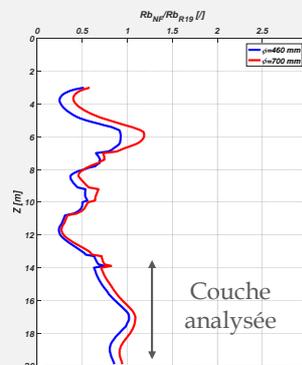
- Pieux CFA

- Analyse paramétrique

$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.8-1$$

Site 4

CPT4 vs PMT1



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 5 (base: sable tertiaire)
- Pieux CFA
  - Calculs ponctuels

site 5															
Pieux CFA $\Phi=460\text{mm}$				NF					NB						
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base	kp /kpmx	ple* [MPa]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rtot [kN]	qb [MPa]	Rb1 [kN]	Rb2 [kN]	Rs1 [kN]	Rs2 [kN]	Rtot1 [kN]	Rtot2 [kN]
SP1	15	Sable	Sable	1	5.12	1404	1801	3205	17.85	1780	1483	1977	1130	3757	2910
SP7	15	Sable	Sable	1	3.48	956	1708	2664	15.65	1557	1298	1829	1045	3386	2602
SP3	15	Sable	Sable	1	4.25	1167	1613	2780	25.86	2579	2149	1795	1026	4374	3605
SP4	15	Sable	Sable	1	4.68	1283	1696	2979	31.95	3186	2655	1949	1114	5135	4300
SP8	15	Sable	Sable	1	2.42	836	1748	2584	17.2	1714	1429	1726	986	3440	2700

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

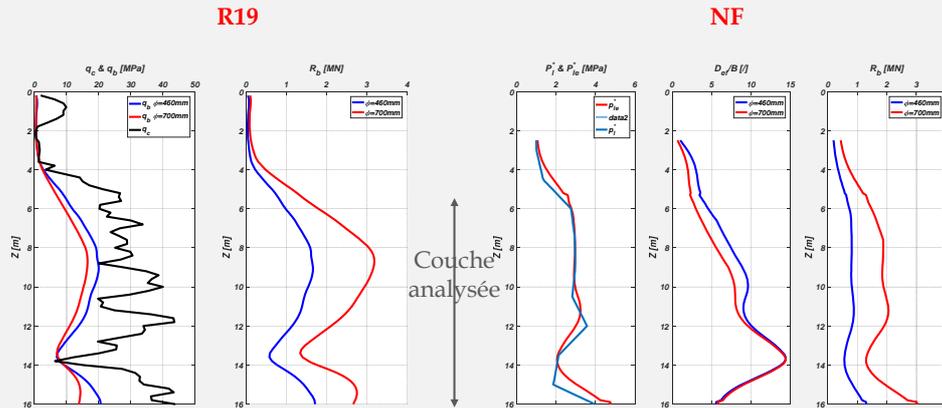
- Site 5 (base: sable tertiaire)
- Pieux CFA
  - Calculs ponctuels

site 5									
Pieux CFA $\Phi=460\text{mm}$				$R_{b,NF} / R_{b1,R19}$	$R_{s,NF} / R_{s1,R19}$	$R_{b,NF} / R_{b2,R19}$	$R_{s,NF} / R_{s2,R19}$	$R_{c,NF} / R_{c1,R19}$	$R_{c,NF} / R_{c2,R19}$
Pieu	L (m)	couches frottement	Sol base						
SP1	15	Sable	Sable	0.79	0.91	0.95	1.59	0.85	1.10
SP7	15	Sable	Sable	0.61	0.93	0.74	1.63	0.79	1.02
SP3	15	Sable	Sable	0.45	0.90	0.54	1.57	0.64	0.77
SP4	15	Sable	Sable	0.40	0.87	0.48	1.52	0.58	0.69
SP8	15	Sable	Sable	0.49	1.01	0.59	1.77	0.75	0.96
Moyenne				0.55	0.93	0.66	1.62	0.72	0.91

### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 5 (base: sable tertiaire)
- Pieux CFA
  - Analyse paramétrique

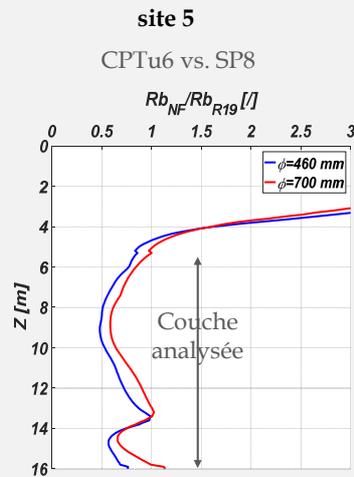
site 5  
CPTu6 vs. SP8



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Site 5 (base: sable tertiaire)
  - Ratio NF/R19 :
    - ✓ Assez constant avec la profondeur
    - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre
    - ✓ Influence couche molle
- Pieux CFA
  - Analyse paramétrique

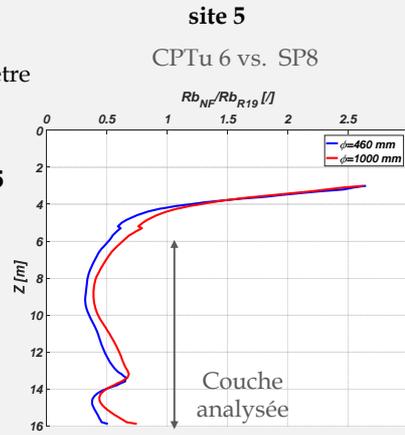
$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.6-0.7$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Ratio NF/R19 :
  - ✓ Assez constant avec la profondeur
  - ✓ Augmente légèrement avec le diamètre
- Site 5 (base: sable tertiaire)
- Pieux forés
  - Analyse paramétrique

$$R_{b,NF} / R_{b,R19} \approx 0.4-0.5$$



### III. Calibration NF vs. R19 ( $R_b$ )

- Moyenne de toutes les valeurs  $\frac{R_{b,NF}}{R_{b,R19}}$  selon le type de sol et le type de pieu.

Type de pieux \ Type de sol	ARGILE TERTIAIRE	AUTRES SOLS
PIEUX VISSÉS	0.9 - 1	0.6 - 0.7
PIEUX BATTUS	0.6 - 0.7	0.4 - 0.5
PIEUX FORÉS	0.6 - 0.7	0.4 - 0.5
CFA	0.8 - 1	0.6 - 0.7

- La NF est plus conservative pour la base. Un peu trop pour les pieux battus et forés.

## IV. Calibration NF vs. R19 ( $R_s$ )

### Plusieurs corrélations ( $q_c, p_l$ ) existent:

- ❑ Corrélations de Vaillant et Aubrion (2014):
  - + de 150 dossiers (8000 essais)
  - ✓ Argile :  $q_c/p_l$  : moyenne de 3.1 et médiane de 2.4
  - ✓ Limon :  $q_c/p_l$  : moyenne de 4.4 et médiane de 3.8
  - ✓ Sable :  $q_c/p_l$  : moyenne de 8.6 et médiane de 8.3

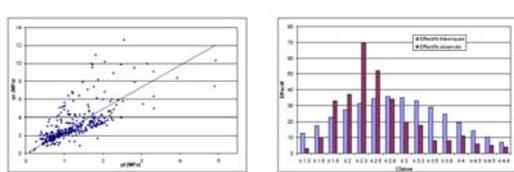
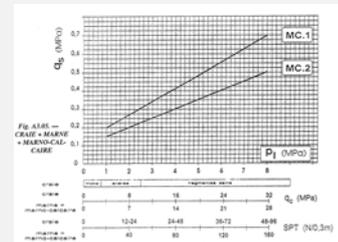


Figure 2 .  $q_c$  en fonction de  $p_l$  et distribution de  $q_c/p_l$  pour les argiles

- ❑ Corrélations de Silence (1996) de ( $q_c-p_l$ ):

- ✓ Argile :  $q_c/p_l=3$
- ✓ Limon :  $q_c/p_l=6$
- ✓ Sable :  $q_c/p_l=9$
- ✓ Mix :  $q_c/p_l=4$

- ❑ Corrélations des Recommandations TA 95



## IV. Calibration NF vs. R19 ( $R_s$ )

Les corrélations suivantes ont été retenues:

- ❑ Corrélations selon Silence (1996) de ( $q_c-p_l$ ):
  - ✓ Argile :  $q_c/p_l=3$
  - ✓ Limon :  $q_c/p_l=6$
  - ✓ Sable :  $q_c/p_l=9$
  - ✓ Mix :  $q_c/p_l=4$
- ❑ Proposition des courbes de frottement pour la craie, la marne et la roche altérée (selon TA 95):
  - ✓ Craie :  $q_c/p_l=4$
  - ✓ Marne :  $q_c/p_l=3.5$
  - ✓ Roche altérée :  $q_c/p_l=?$
- Avantage méthode pressiométrique
- ❑ Vérification des corrélations avec les essais à Limelette et à Wavre-Sainte-Catherine:

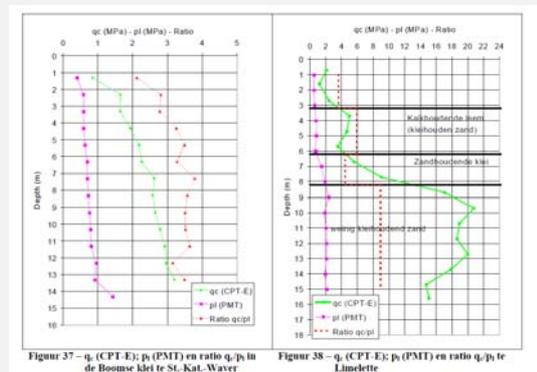


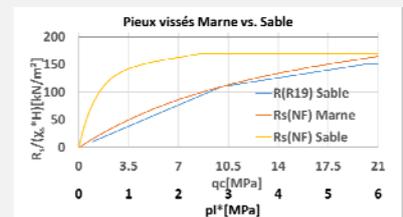
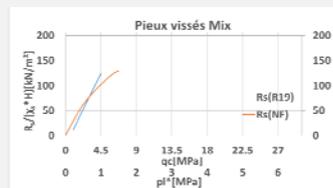
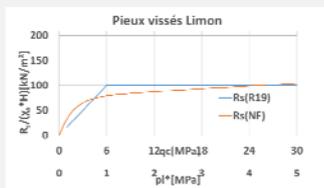
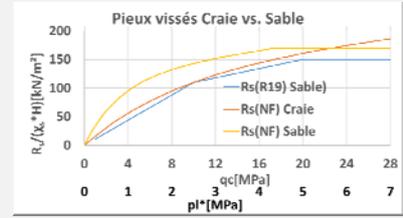
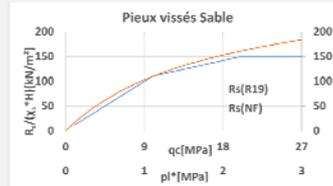
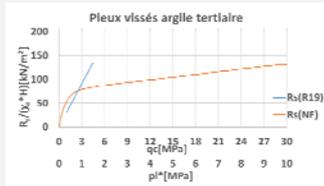
Figure 37 -  $q_c$  (CPT-E);  $p_l$  (PMT) en ratio  $q_c/p_l$  in de Boomsse klei te St. Kat. Waver

Figure 38 -  $q_c$  (CPT-E);  $p_l$  (PMT) en ratio  $q_c/p_l$  te Limelette

## IV. Calibration NF vs. R19 ( $R_s$ )

### Pieux vissés

Comparaison NF vs. R19 de  $\alpha_s q_s$

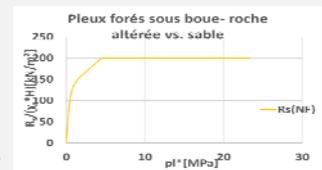
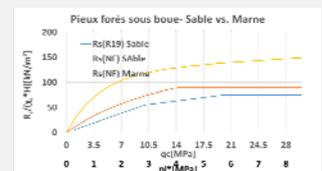
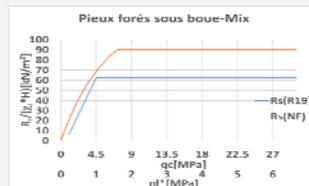
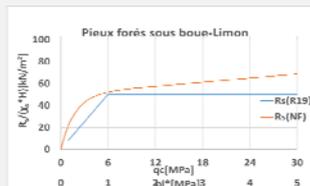
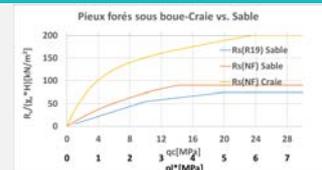
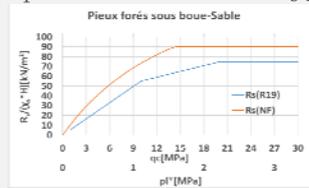
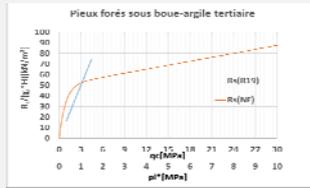


- Bonne correspondance vs. R19 & NF → conversion  $q_c/p_1$
- Proposition des courbes pour la craie, la marne et la roche altérée

## IV. Calibration NF vs. R19 ( $R_s$ )

### Pieux forés

Comparaison NF vs. R19 de  $\alpha_s q_s$

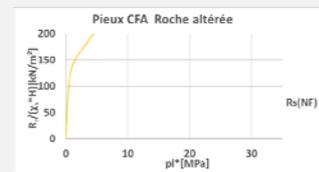
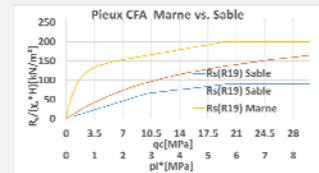
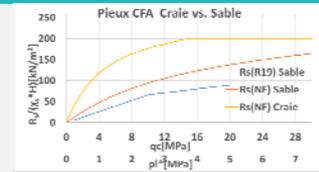
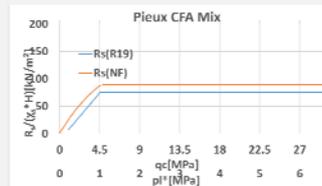
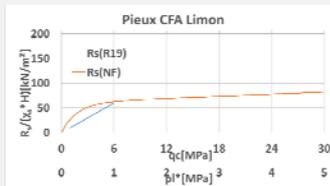
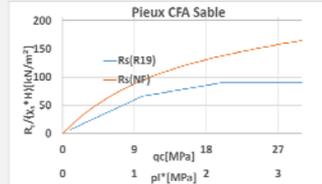
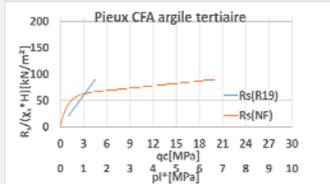


- R19 & NF → conversion  $q_c/p_1$
- Proposition des courbes pour la craie, la marne et la roche altérée

## IV. Calibration NF vs. R19 ( $R_s$ )

### Pieux CFA

Comparaison NF vs. R19 de  $\alpha_s q_s$

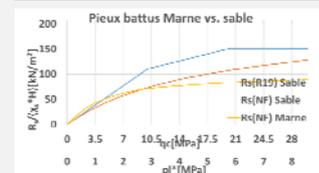
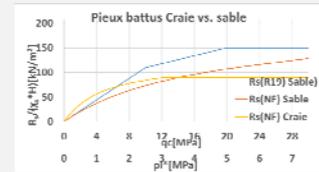
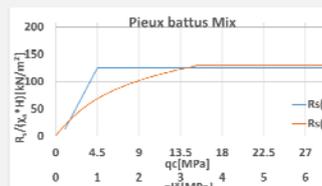
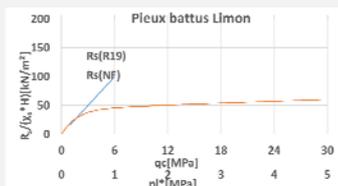
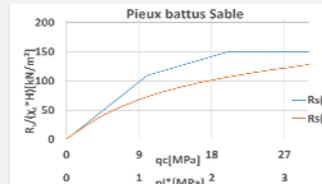
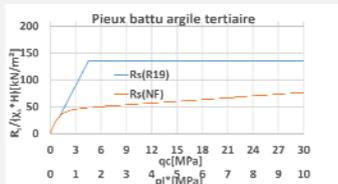


- R19 & NF → conversion  $q_c/p_l$
- Proposition des courbes pour la craie, la marne et la roche altérée

## IV. Calibration NF vs. R19 ( $R_s$ )

### Pieux battus

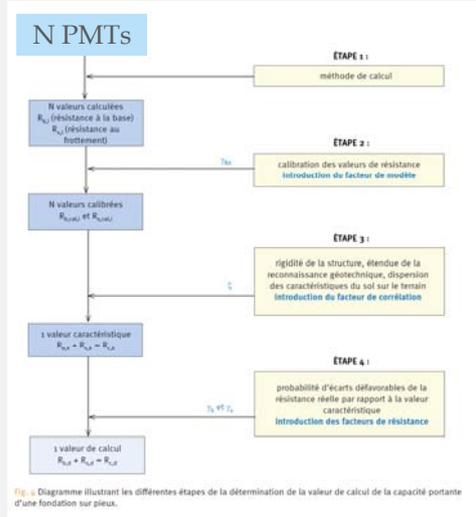
Comparaison NF vs. R19 de  $\alpha_s q_s$



- R19 & NF → conversion  $q_c/p_l$
- Proposition des courbes pour la craie, la marne et la roche altérée

## V. Méthode de dimensionnement 'pressio'

- ❑ Mêmes étapes que le calcul sur base des CPTs
- ❑ La méthode de calcul change



## V. Méthode de dimensionnement 'pressio'

(base)

$$R_{b,NF} = A_b q_b$$

$$q_b = \alpha_{b,PMT} p_{le}^*$$

NF

$$\alpha_{b,PMT} = \frac{k_p}{k_p'}$$

NF

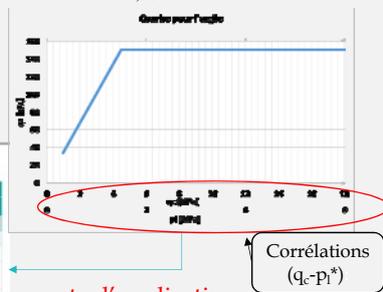
$\alpha_b$  n'est plus d'application



(frottement)

$$R_{s,R19} = \chi_s \sum_i \alpha_{s,i} h_i q_{s,i}$$

$$q_{s,R19} = f(p_i)$$



$\alpha_s$  reste d'application

Calibration (R19-NF)

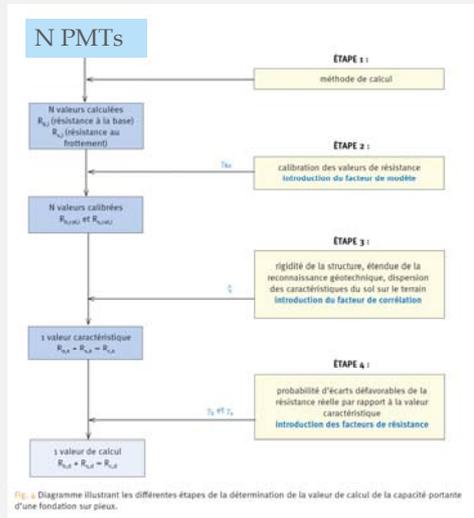
Type de sol	ARGILE TERTIAIRE	AUTRES SOLS
PIEUX VISSÉS	0.9 - 1	0.6 - 0.7
PIEUX BATTUS	0.6 - 0.7	0.4 - 0.5
PIEUX FORÉS	0.6 - 0.7	0.3 - 0.4
CFA	0.9 - 1	0.6 - 0.7

Tableau 5 Valeurs des facteurs d'installation pour la résistance à la base ( $\alpha_b$ ) et pour la résistance au frottement en compression ( $\alpha_s$ ) en fonction du type de pieux.

Type de pieux	Base $\alpha_b$		Fût $\alpha_s$ (*)	
	Argile tertiaire	Autres sols	Argile tertiaire	Autres sols
PIEUX VISSÉS BATTUS	1	1	0,9	1
Pieux moulés dans le sol sans base élargie (*), fût en béton plastique	1	1	0,9	1
Pieux moulés dans le sol à base élargie (*), fût en béton plastique	1	1	— (*)	— (*)
Pieux moulés dans le sol à base élargie moulée dans le sol, fût en béton sec	1	1	1,15	1,15
Pieux en acier fermé dans le bas sans base élargie (*)	1	1	0,6	0,6
Pieux en acier fermé dans le bas à base élargie (*)	1	1	— (*)	— (*)
Pieux en acier tubé ouvert, situation avec formation de bouillottes (†)	1	1	0,6	0,6

## V. Méthode de dimensionnement 'pressio'

- ❑ Mêmes étapes que le calcul sur base des CPTs
- ❑ La méthode de calcul change
- ❑ Le reste du calcul est identique



## VI. Conclusions

- Absence de méthode pressiométrique pour le dimensionnement géotechnique des pieux en Belgique
- Proposition d'une méthode basée sur la calibration R19 vs. NF
  - Large base de données pour  $R_b$
  - Corrélations  $(q_c - p_1^*)$  pour  $R_s$
- Incorporation de la méthode pressiométrique → avantages 'pressio' dans d'autres types de sols/roches







[www.sbgimr-bvigrm.be](http://www.sbgimr-bvigrm.be)

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de  
Mécanique des Roches  
Belgische Vereniging voor Ingenieursgeologie  
en Rotsmechanica



[www.normes.be/geotechnique](http://www.normes.be/geotechnique)



[www.bggg-gbms.be](http://www.bggg-gbms.be)

Groupement Belge de Mécanique des Sols  
et de la Géotechnique  
Belgische Groepering voor Grondmechanica  
en Geotechniek

## Case histories

*G. Laurent*





# Cases histories

Grégory Laurent, Franki Foundations



## Cas 1 - Les Papeteries de Genval - Phase II - Lots 6 et 9

Présentation du projet

- Ancienne friche industrielle dans la vallée de la Lasne
- Création de nouveaux quartiers (logements, commerces, parking)

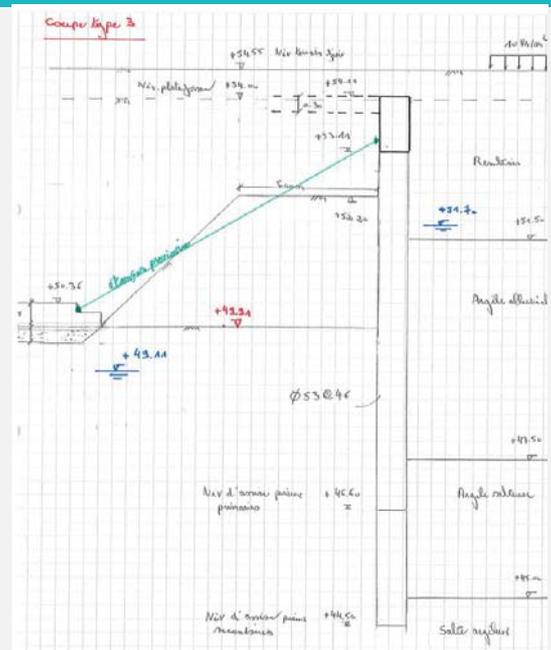
Phase II  
Lots 6 et 9



# Cas 1 - Les Papeteries de Genval - Phase II - Lots 6 et 9

## Présentation du projet

- Travaux géotechniques
  - Réalisation d'une paroi de soutènement étanche
    - 4,50m de poussée de terre
    - 2,00m de poussée d'eau
    - Charge verticale répartie + charge ponctuelle
    - Choix : pieux forés double rotation dia 53
      - + ponctuellement pieux primaires porteurs Omega 51 plus profonds
    - Maintien d'une banquette et réalisation du radier
    - Etaçons obliques
  - Pieux de fondation 1050 kN ELS

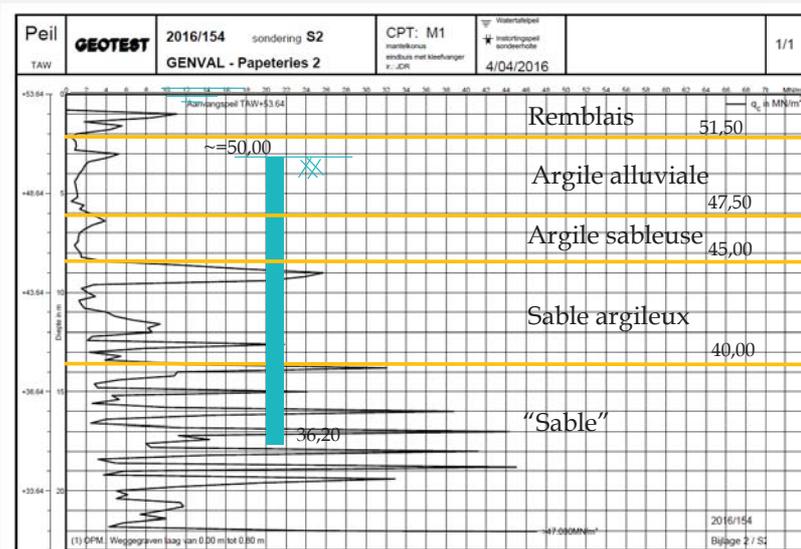


28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

# Cas 1 - Les Papeteries de Genval - Phase II - Lot 9

## Contexte géotechnique



- Données géotechniques disponibles:
  - 9 essais CPT mécaniques 200 kN CPT avec beaucoup de pics dans la couche de sable caillouteuse
  - Expérience de la phase I -> difficultés de refouler le terrain dans les couches de "sable" (durée de forage ↗, rendement ↘)

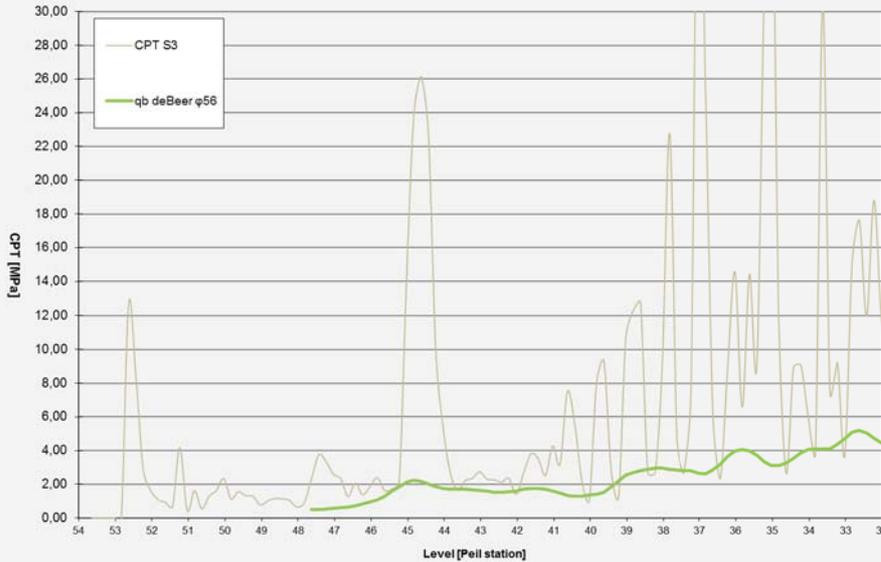
28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

# Cas 1 - Les Papeteries de Genval - Phase II - Lot 9

## Contexte géotechnique

Prédimensionnement des pieux - résistance à la base ?



- $q_b$  = résistance à la base unitaire calculée par la méthode de De Beer ( $q_c$  tous les 0,20m,  $D_c$ ,  $D_b$ ,  $e_q$ )
- Méthode De Beer n'est pas adaptée à tous les terrains
- Campagne d'essais supplémentaires :
  - 3 forages de reconnaissance
  - piézomètres
  - 3 essais pressiométriques au droit des forages

NB : Les résultats pressiométriques permettent également de mieux évaluer les caractéristiques du terrain et définir des modules de réaction horizontale pour le calcul du soutènement

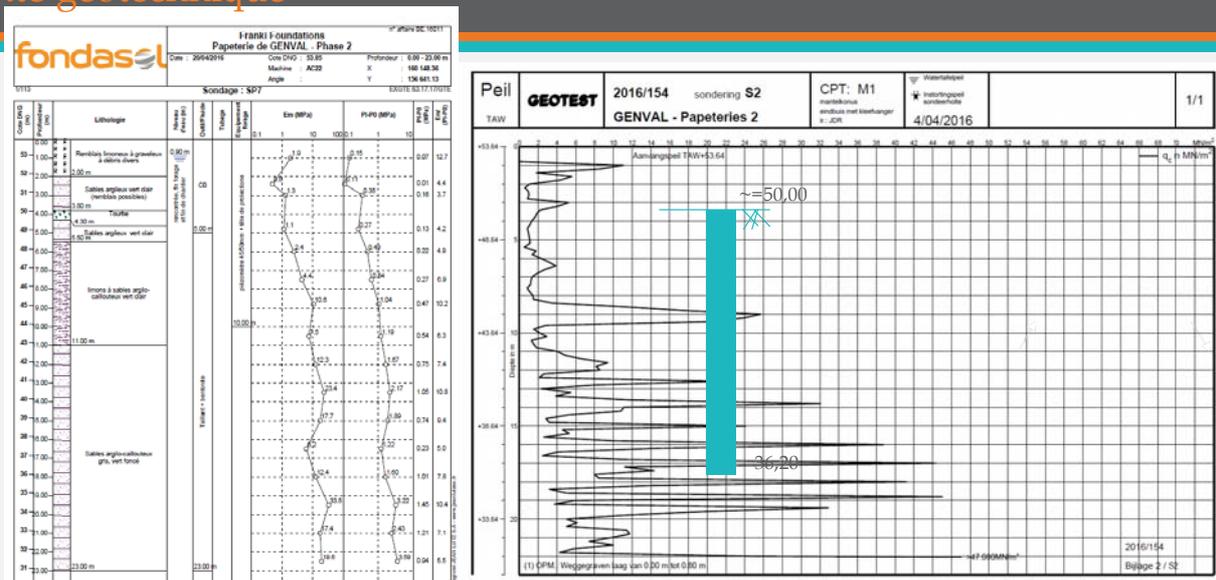
28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

5

# Cas 1 - Les Papeteries de Genval - Phase II - Lot 9

## Contexte géotechnique



Pressiomètre : mesure tous les 1,50m      CPT : mesure tous les 0,20m  
 → Lissage en utilisant les résultats pressiométriques

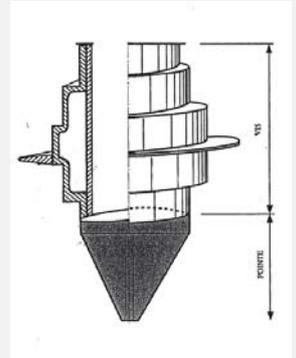
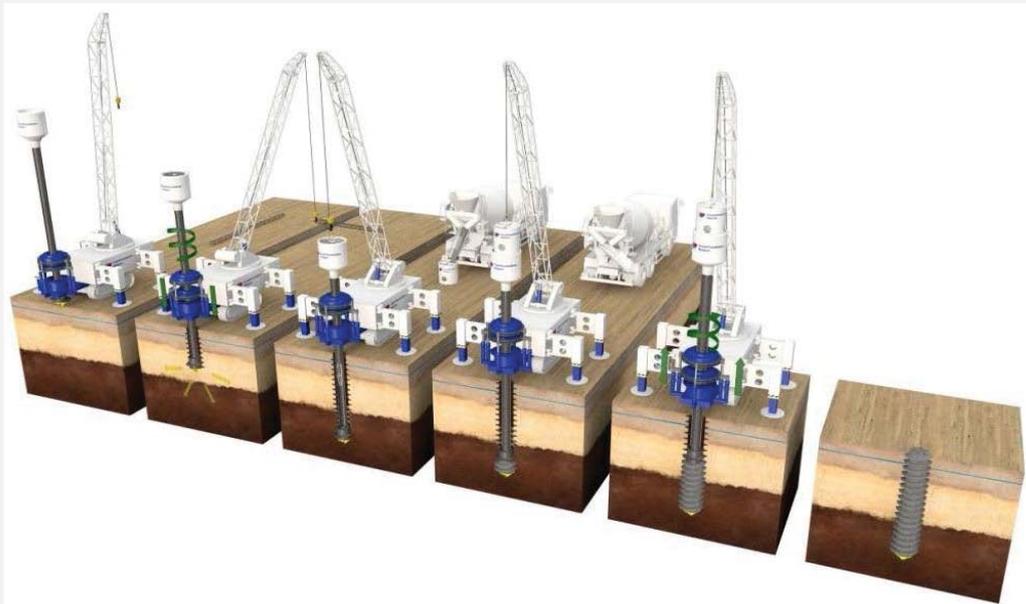
28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

6

# Cas 1 - Les Papeteries de Genval - Phase II - Lot 9

Choix des pieux de fondation : pieux vissés Atlas 36/56 - Capacité 1050 kN ELS



28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

7

# Cas 1 - Les Papeteries de Genval - Phase II - Lot 9

Capacité portante Atlas 36/56 - résistance à la base (rapport 12 CSTC)

- Résistance à la pointe :  $R_b = \alpha_b \times \varepsilon_b \times \beta \times \lambda \times A_b \times q_b$ 
  - $\alpha_b$ : Facteur d'installation facteur empirique, déduit d'essais de mise en charge statique, qui tient compte de l'influence de la méthode d'installation (cfr. fiche pieux = 0,70 pour pieux Atlas dans sable)
  - $\varepsilon_b$ : Facteur d'échelle pour la fissuration dans l'argile tertiaire surconsolidée (= 1,00)
  - $\beta$ : Facteur de forme (= 1,00 pour pieux avec base circulaire)
  - $\lambda$ : Facteur de réduction pour les pieux à base élargie dû à la décompression du sol autour (=1,00)
  - $A_b$  = surface de base de la fondation ( $D_{b,eq} = 560$  mm)
  - $q_b$  = résistance à la base unitaire calculée par la méthode de De Beer ( $q_c$  tous les 0,20m,  $D_c$ ,  $D_{b,eq}$ )

➔ Calcul du  $q_b$  sur base du pressiomètre  $q_b = k_p \times p_{le}^*$  (NF P94-262)

- $k_p$  = facteur de portance (type pieu, type sol) = 3,60
- $p_{le}^*$  = pression limite nette équivalente

VII 2-2 Terme de pointe Facteur de portance du pieu ATLAS

	PRESSIOMETRE $k_p$	PENETROMETRE $k_p$
ARGILE	1,6 à 1,8	0,55 à 0,65
SABLE	3,6 à 4,2	0,50 à 0,75
GRAVES*	≥ 3,6	≥ 0,5
CRAIES	≥ 2,4	≥ 0,6
MARNES	≥ 2,4	≥ 0,7

[CDC Pieux Atlas]

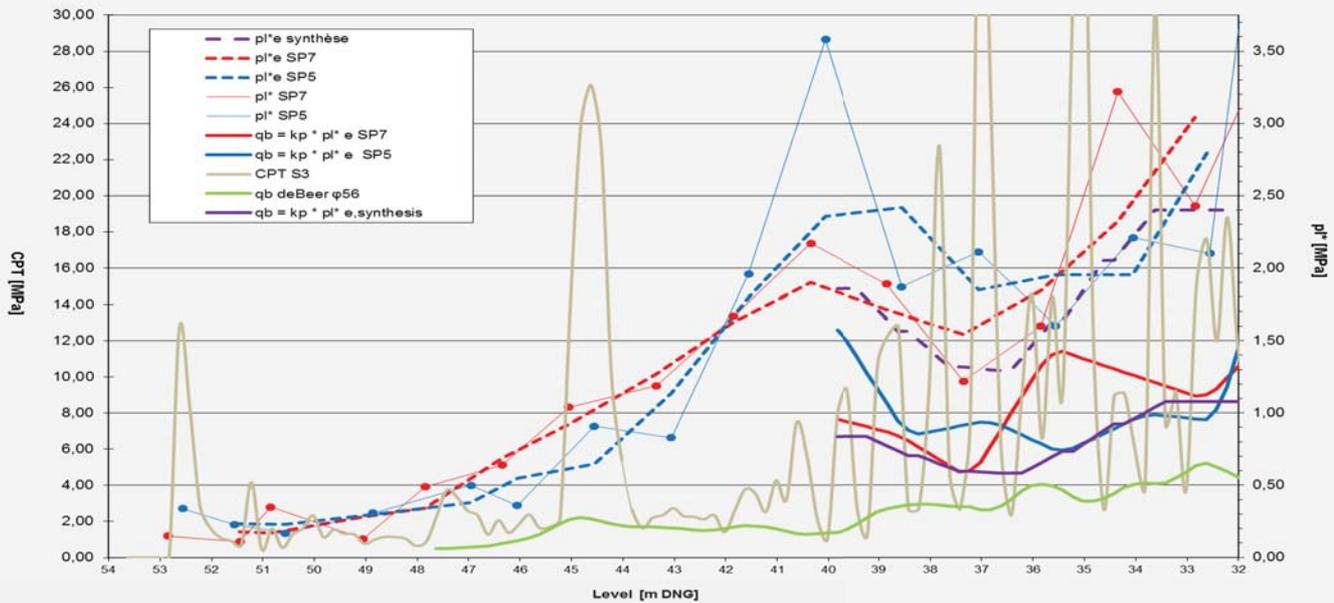
8

28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

# Cas 1 - Les Papeteries de Genval - Phase II - Lot 9

Capacité portante Atlas 36/56 - résistance à la base



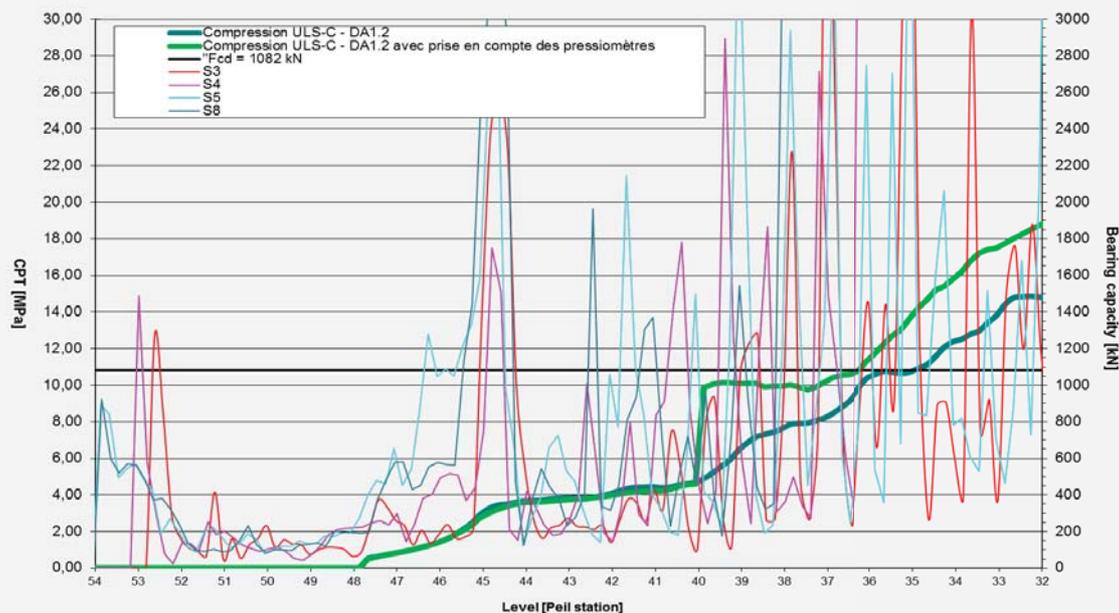
28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

9

# Cas 1 - Les Papeteries de Genval - Phase II - Lot 9

Capacité portante Atlas 36/56 (pointe + frottement) -  $F_{cd} = 1,03 \times 1050 = 1082 \text{ kN}$



CPT : assise +34,90  
 ■ Rbd = 295 kN (27%)  
 ■ Rsd = 788 kN (73%)

Pressio : assise +36,20  
 ■ Rbd = 468 kN (42%)  
 ■ Rsd = 642 kN (58%)

→ Gain de 10%

28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

10

# Cas 2 – Projet Greensky 2 – E40 Lincet

## Présentation du projet

- Partenariat public/privé Engie Electrabel, la ville de Saint Trond, l'intercommunale Bruxelloise de l'Energie et Infrabel
- Phase II : construction de 9 nouvelles éoliennes type Vestas V100 - 2MW
- Au total 25 éoliennes
- Electricité injectée sur le réseau ferroviaire ("train à voile") et le surplus pour les ménages de la région
- Socle 24 pieux inclinés (1/8)
  - Compression/traction : 1500 kN/150 kN ELS
  - Effort horizontal: 50 kN



28 septembre 2017

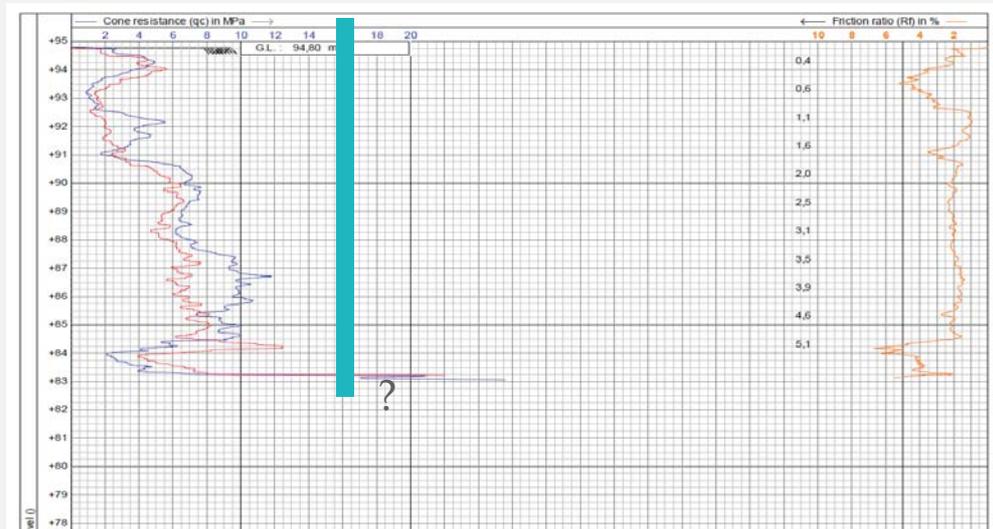
Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

11

# Cas 2 – Projet Greensky 2 – E40 Lincet

## Contexte géotechnique W08

- En Belgique, on a l'habitude de réaliser des CPT
- Cause du refus ?
  - Pierre de sable ?
  - Caillou?
  - Sable calcaireux?
  - Marne ?
- Quid sous le refus ?
  - qc élevé localement ?
  - qc diminue après ?



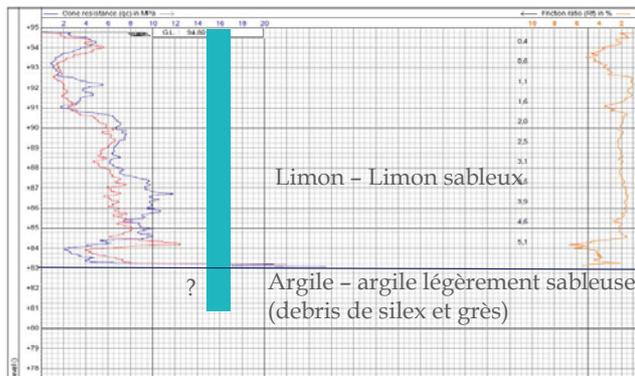
28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

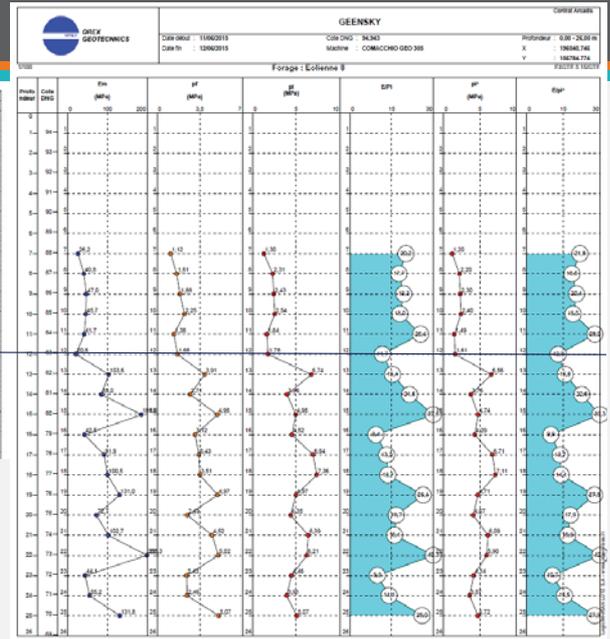
12

# Cas 2 – Projet Greensky 2 – E40 Lincet

## Contexte géotechnique W08



A partir de +77,00 : Marne



- Par socle : 3 CPTE + 1 forage + 1 pressiomètre
- Choix technique de pieu : pieu PCS-λ dia 600mm

(pieu à la tarière continue avec un tube central large au sens du rapport 19 du CSTC)

# Cas 2 – Projet Greensky 2 – E40 Lincet

## Principe pour le calcul de la capacité portante (rapport 12 CSTC)

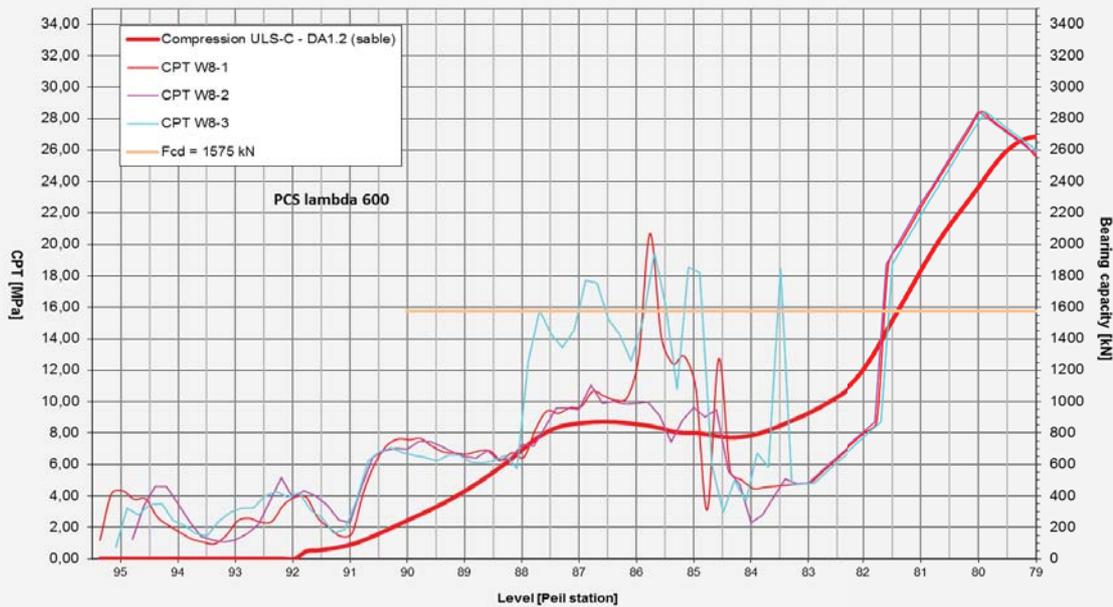
- Prolonger les CPT par des valeurs de  $q_c$  déduites du pressiomètre
- Van Wambeke et d'Hemricourt (1982): règle des "3-6-9" des argiles aux sables pour  $q_c/p_l$
- Classes de sol en fonction du  $p_l^*$  (NF P 94-262)
- Forage mentionne argile mais  $p_l^* > 4$  MPa
  - Sable compact? Marne ?
- Etude de sensibilité : influence sable VS argile
  - Argile/argile sableuse  $p_l^* < 3$  MPa ->  $q_c = 3 p_l^*$
  - $p_l^* > 3$  MPa -> sable argileux ->  $q_c = 6 p_l^*$
- Argile/argile sableuse  $p_l^* < 3$  MPa ->  $q_c = 3 p_l^*$
- $p_l^* > 3$  MPa -> argile ->  $q_c = 3 p_l^*$

Tableau B.2.1 – Classement des sols selon différents critères

Classes de sol		$I_p$	$p_l^*$ (MPa)	$q_c$ (MPa)	$(N_{1,60})$	$c_u$ (kPa)
Argiles et limons	Très mous à mous	0,0 - 0,50	< 0,4	< 1,0		< 75
	Fermes	0,50 - 0,75	0,4 à 1,2	1,0 à 2,5		75 ≤ $c_u$ ≤ 150
	Raides	0,75 - 1,00	1,2 à 2	2,5 à 4,0		150 ≤ $c_u$ < 300
	Très raides	> 1,00	≥ 2	≥ 4,0		300 ≤ $c_u$
Sols intermédiaires (sable limoneux, sable argileux, argile sableuse)						
Classement à réaliser selon les indications des figures B.2.1 à B.2.4						
Sables et graves	Très lâches		< 0,2	< 1,5	< 3	
	Lâches		0,2 à 0,5	1,5 à 4	3 à 8	
	Moyennement denses		0,5 à 1	4 à 10	8 à 25	
	Denses		1 à 2	10 à 20	25 à 42	
Craies	Très denses		> 2	> 20	42 à 58	
	Molles		< 0,7	< 5		
	Altérées		0,7 à 3	5 à 15		
Marne et calcaire marneux	Saines		≥ 3	≥ 15		
	Tendres		< 1	< 5		
	Raides		1 à 4	5 à 15		
Rocher	Très raides		> 4	> 15		
	Altéré		2,5 à 4			
	Fragmenté		> 4			

# Cas 2 – Projet Greensky 2 – E40 Lincet

Capacité portante NAD – hypothèse sable argileux –  $F_{cd} = 1,05 \times 1500 = 1575 \text{ kN}$



Assise : +81,40 mTAW

- Base : 60%
- Frottement : 40%

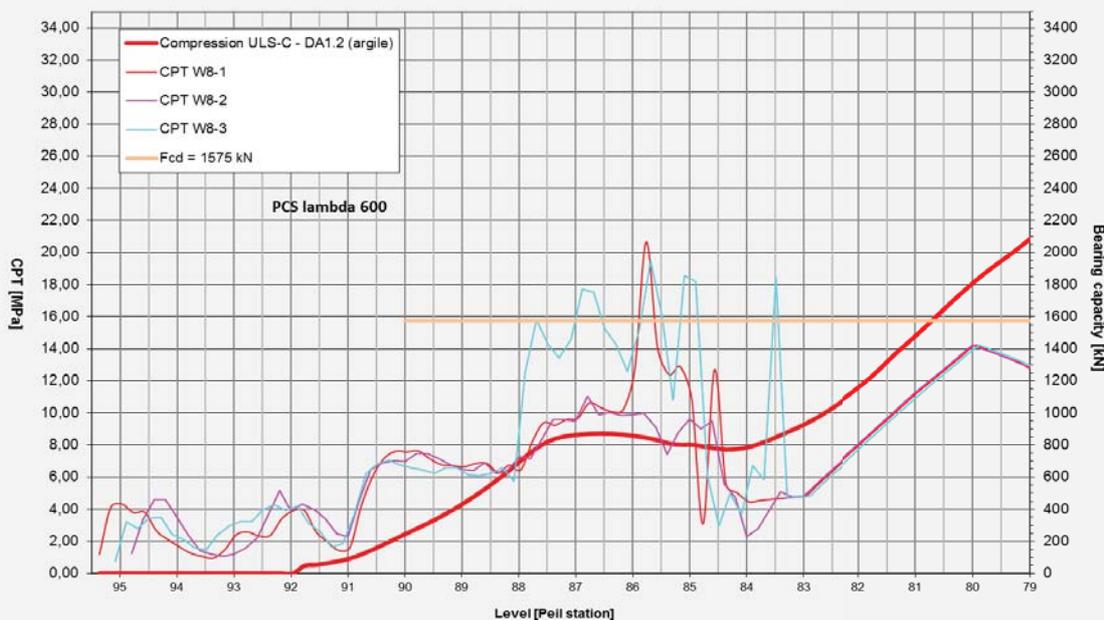
28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

15

# Cas 2 – Projet Greensky 2 – E40 Lincet

Capacité portante NAD – hypothèse argile -  $F_{cd} = 1,05 \times 1500 = 1575 \text{ kN}$



Assise : +80,50 mTAW

- Base : 55%
- Frottement : 45%

28 septembre 2017

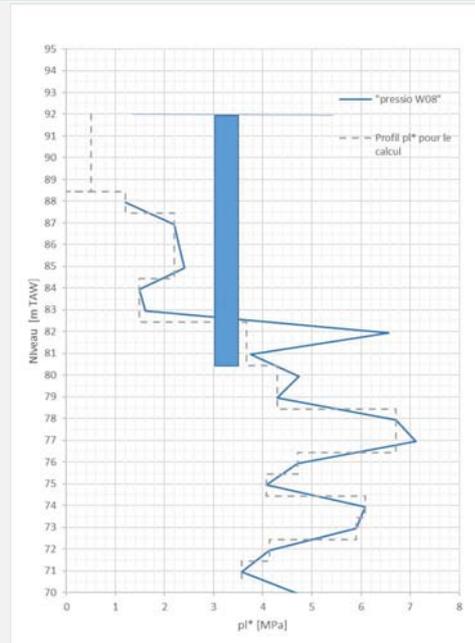
Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

16

## Cas 2 – Projet Greensky 2 – E40 Lincet

Calcul de la capacité portante selon la norme française (NF P 94-262)

- Définition d'un profil de pression  $p_l^*$
- Pieu PCS- $\lambda$  = classe de pieu 2 catégorie 6
- Utilisation du logiciel Foxta (Terrasol)
- Procédure du "modèle de terrain"
- Classe de sol :
  - Entre +92,00 et +83,00 : limon
  - A partir de +83,00 : sol intermédiaire (tendance argileuse)
- $N_{sk} = 1500$  kN ELS caractéristique



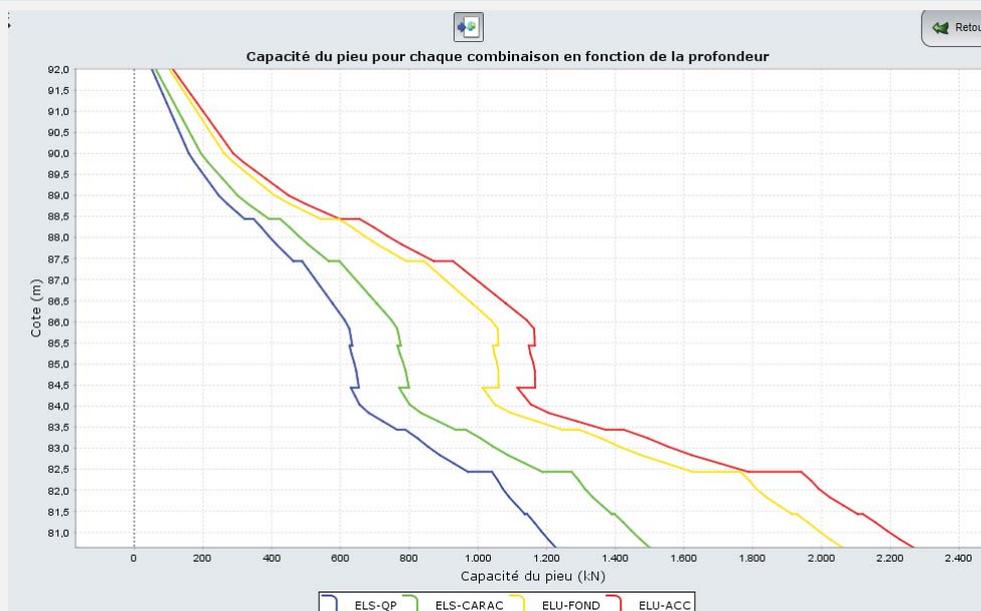
28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

17

## Cas 2 – Projet Greensky 2 – E40 Lincet

Calcul de la capacité portante selon la norme française (NF P 94-262)



Résultats Foxta

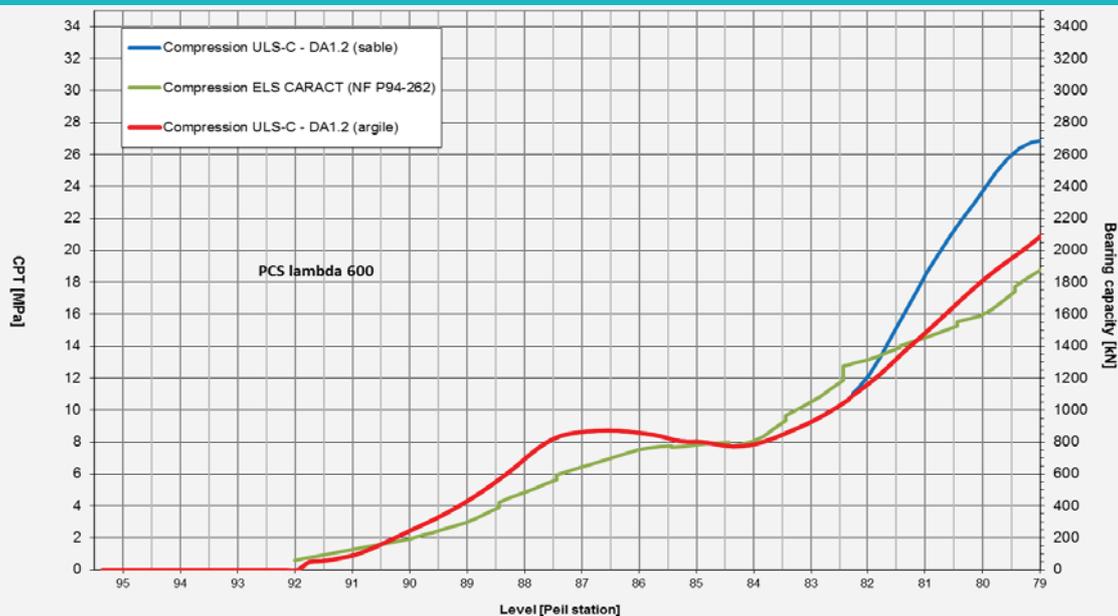
28 septembre 2017

Journée d'étude "La pratique du pressiomètre en Belgique"

18

# Cas 2 – Projet Greensky 2 – E40 Lincet

## Comparaison des courbes de portance



NF94-262 :  
 Q-ELS CARACT : 1500kN  
 Assise : +80,60 m TAW  
 Base : 52%  
 Frottement : 48%

NAD (rapport 12)  
 Fcd = 1575kN  
 Assise : +80,50 mTAW  
 Base : 55%  
 Frottement : 45%

Conclusion :  
 assise à +80,50  
 mTAW confirmé

## Conclusion

- Dans certains terrains, les essais CPT ne permettent pas un dimensionnement fin des fondations profondes.
- Nécessité de réaliser des essais pressiométriques connus de tous dans certains terrains.
- Ces deux exemples montrent un intérêt dans la gestion des risques et des opportunités.
- Des questions restent en suspens :
  - Nombre d'essais pressiométriques représentatifs ?
  - Quel cadre normatif utiliser ?
- Nécessité d'une méthode de calcul pressiométrique en accord avec le nouveau rapport 19 du CSTC.