

Propriétés géotechniques des plateaux et Amélioration des sols superficiels

Gery PUISSANT, Ir

Hughes LEGRAIN, Dr Ir

Cécile HAVRON, Ir

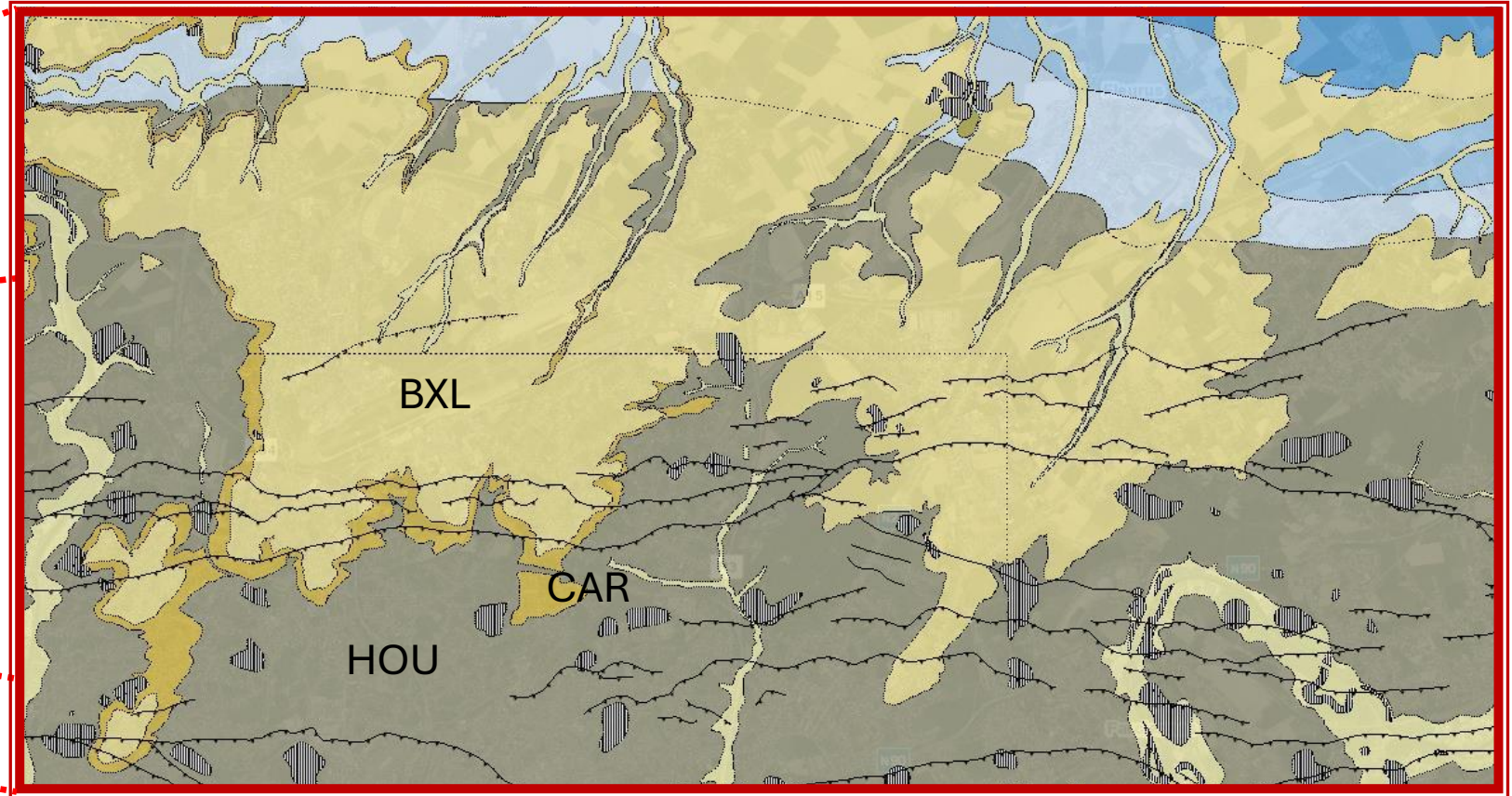
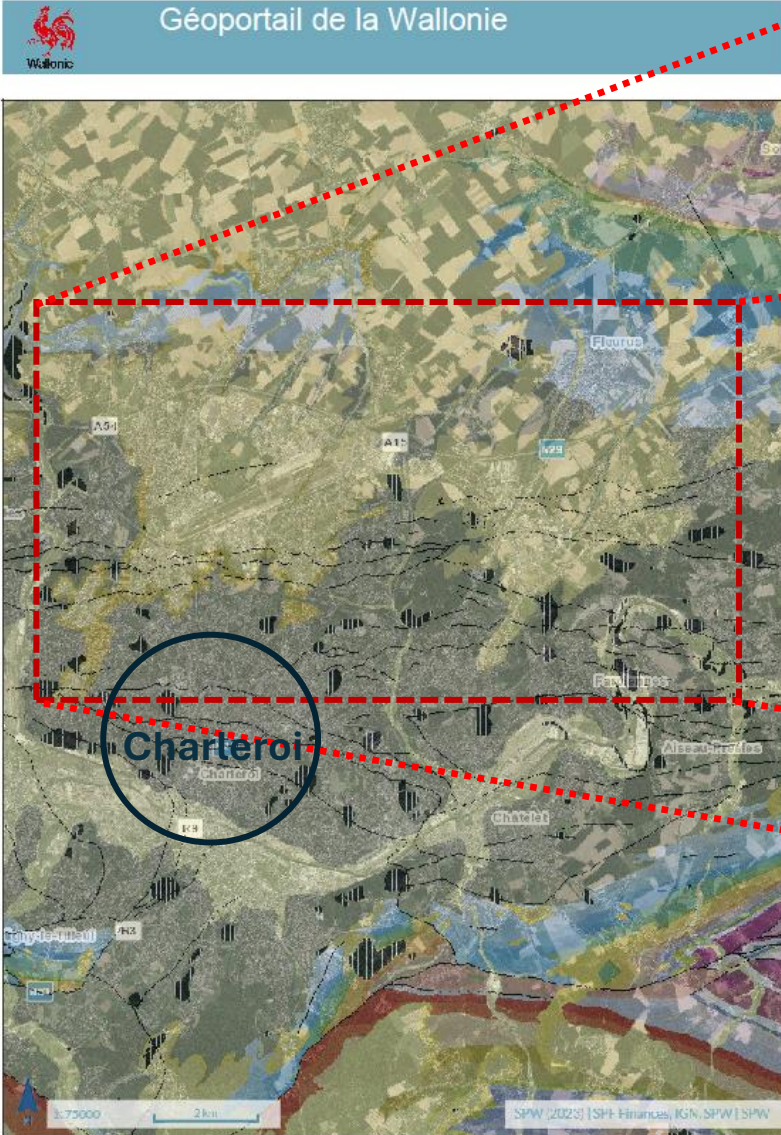


Département *Géotechnique et Environnement Sols*

www.inisma.be – geotechnique@bcrc.be

- 1. Contexte géologique**
- 2. Propriétés typiques**
- 3. Amélioration des sols et études de formulation**
- 4. Essais de contrôle des plateformes de remblais**

Contexte géologique



Les formations du **Tertiaire** (Cénozoïque – Paléogène) :

BXL : formation de Bruxelles (« sables bruxelliens »)

CAR : formation de Carnières (« Yprésien » argileux et sablo-argileux)

Le socle primaire :

HOU : Houiller

Propriétés typiques

Socle Houiller

(Voir présentations précédentes)




n'est pas toujours facilement atteignable en CPT ...

Formations argilo-sableuses (et argileuses)

- Parfois absentes
- Épaisseur limitée (quelques mètres)
- Argiles sableuses sur-consolidées :
 - $q_c \approx \text{min } 3 - 4 \text{ Mpa}$ (davantage si très sableuses)
 - frottement ↑↑↑

Propriétés typiques

Sables Bruxelliens

- En général : q_c élevé, présence de concrétions
- Les CPT y bloquent souvent
- MAIS  décalcification toujours possible

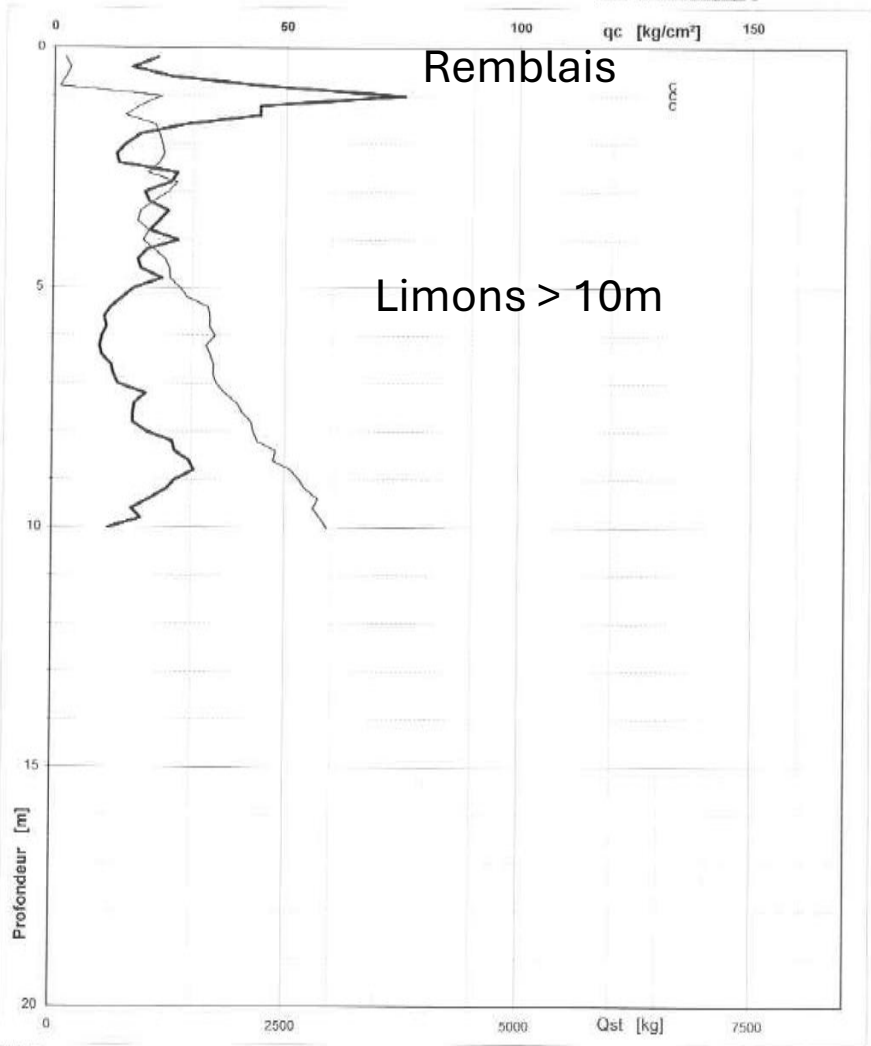
...et la couverture limoneuse !

- Limons \pm argileux, parfois légèrement sableux de qualité « courante » : $q_c \approx 1-2-3$ Mpa
- Sur des épaisseurs variables : 2-3 m jusqu'à > 10 m !

Remarque : niveaux de la nappe « superficielle »

- Très variables... (niveau piézométrique pas horizontal à l'échelle « locale »/subrégionale)
- (nombreuses petites vallées composant le bassin-versant nord de la Sambre, nappes perchées sur les sols argileux et le socles)

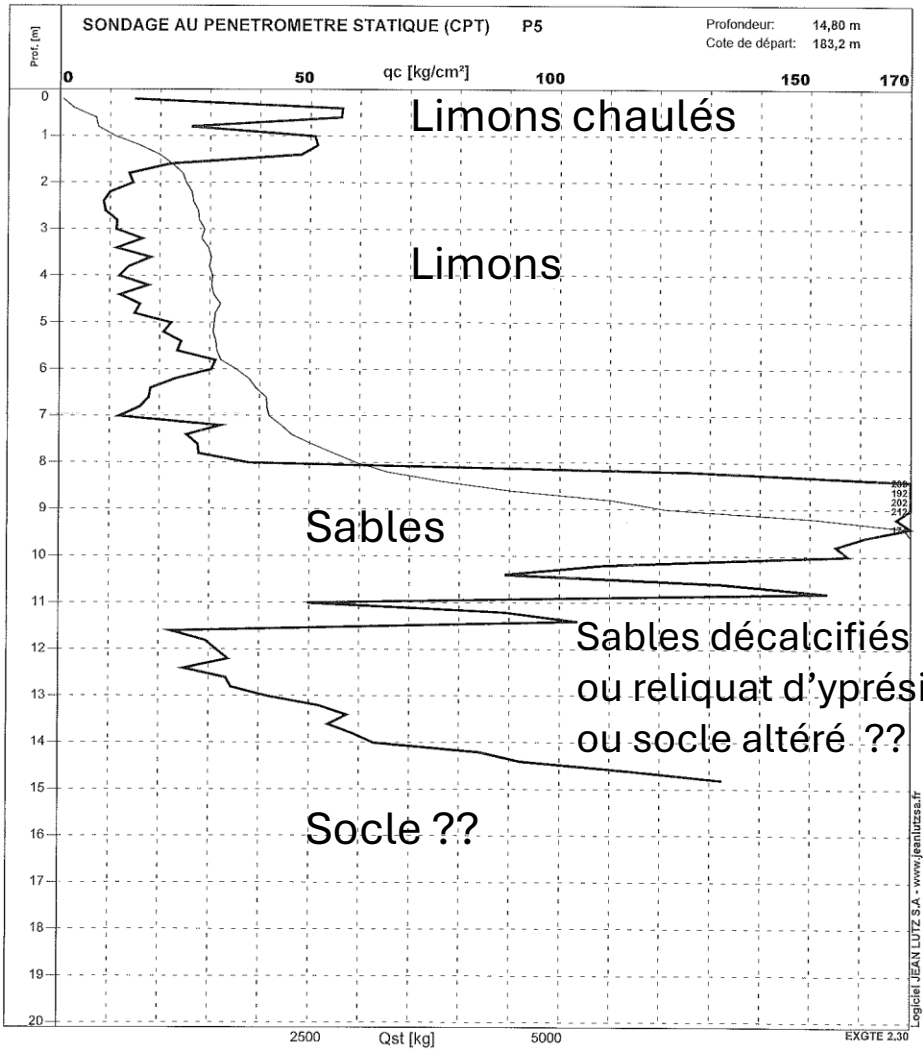
Cote de départ [m] : -



Légende :
c Chocs pendant l'enfoncement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

Matériel utilisé :
Capacité de l'appareil hydraulique [T] 10
Section de la pointe [cm²] et type 10 M1
Section des tubes allongés [cm²] 10

Observations dans le trou	Profondeur d'éboulement [m]	Profondeur du niveau d'eau [m]
En fin d'essai	8,40	-
En fin de chantier	8,40	-

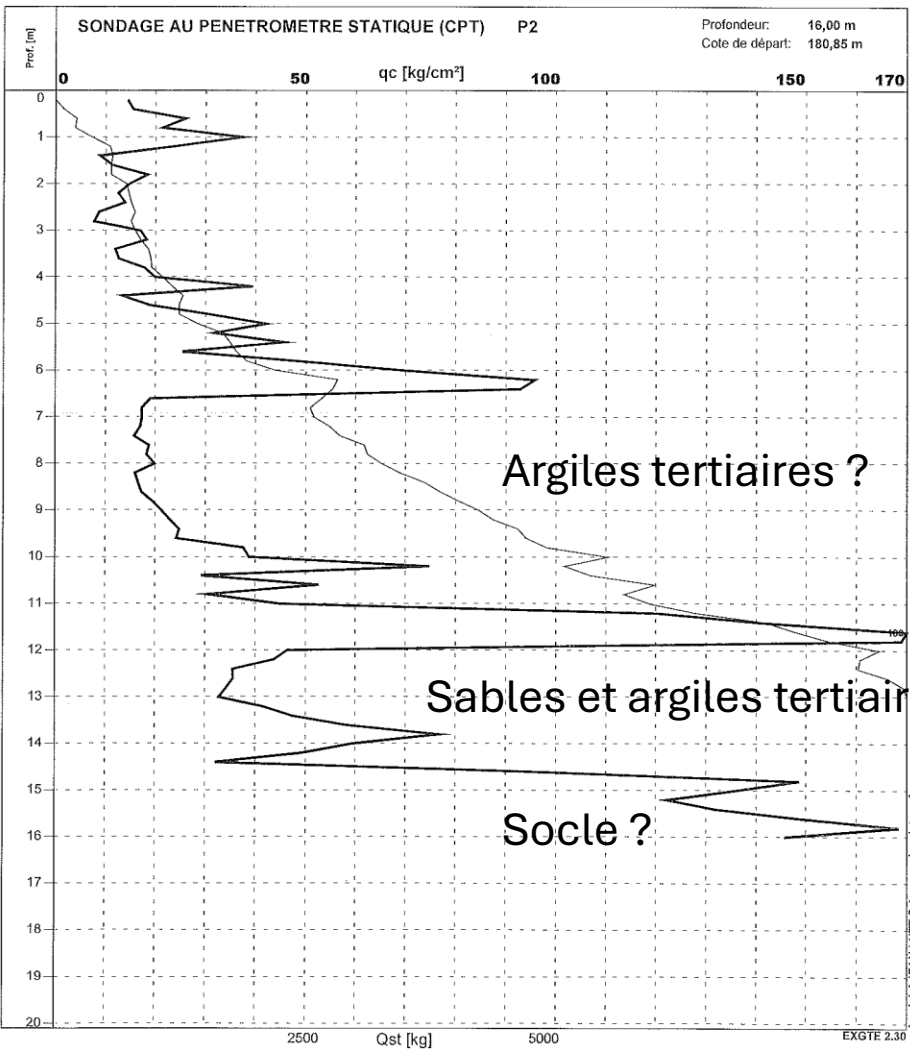


Légende :
c Chocs pendant l'enfoncement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

Matériel utilisé :
Capacité de l'appareil hydraulique [T] 20
Section de la pointe [cm²] et type 10 M1
Section des tubes allongés [cm²] 10

Observations dans le trou	Profondeur en fin d'essai [m]	Profondeur en fin de chantier [m]
Niveau d'eau	3,90	-
Eboulement	-	-

Logiciel JEAN LUTZ S.A. - www.jeanlutzs.fr

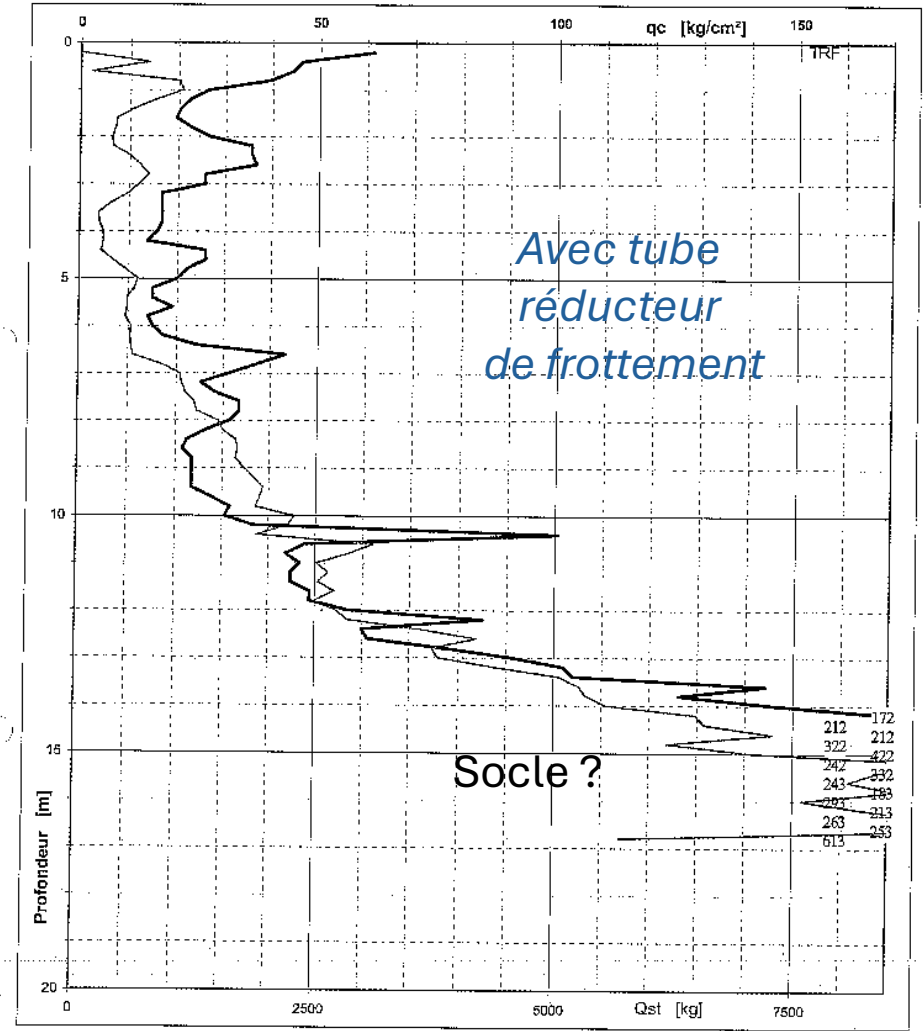


Légende:
c Chocs pendant l'enfoncement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

Matériel utilisé:
Capacité de l'appareil hydraulique [T] 20
Section de la pointe [cm²] et type 10 M1
Section des tubes allongés [cm²] 10

Observations dans le trou	Profondeur en fin d'essai [m]	Profondeur en fin de chantier [m]
Niveau d'eau	1,50	-
Éboulement	-	-

Cote de départ [m]: -2.35

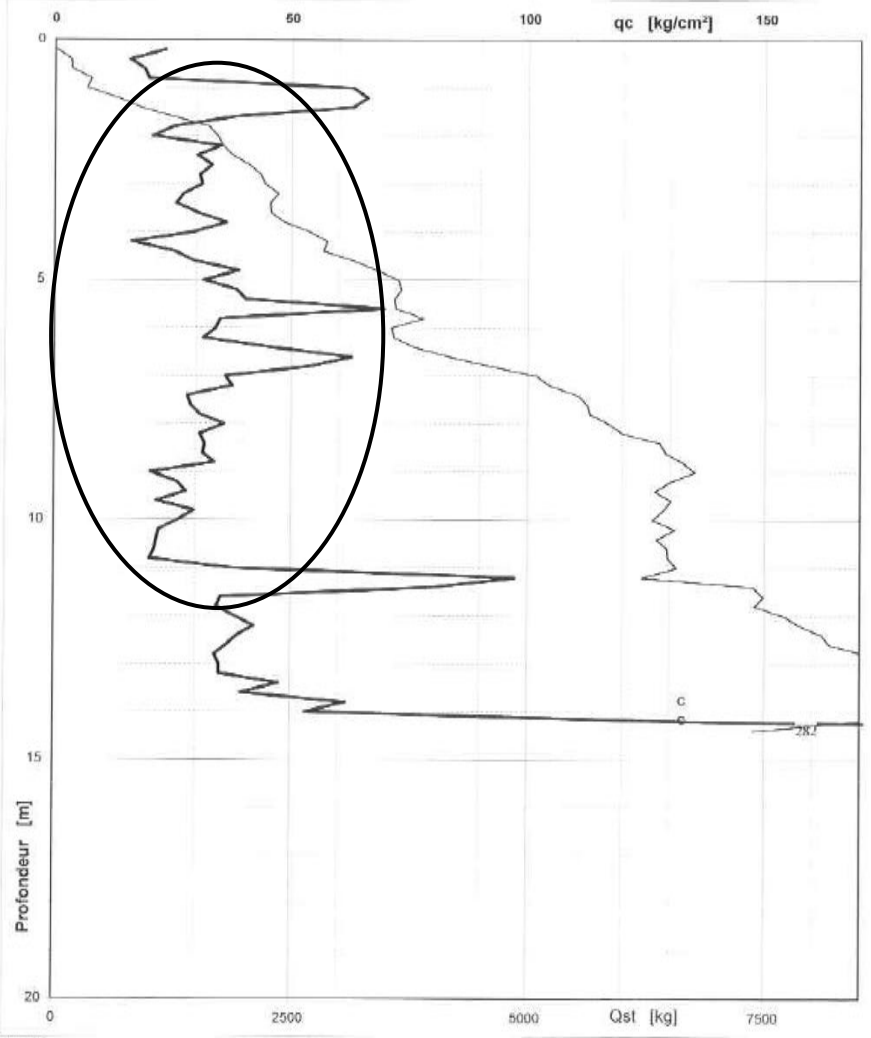


Légende:
c Chocs pendant l'enfoncement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

Matériel utilisé:
Capacité de l'appareil hydraulique [T] 10 Magirus
Section de la pointe [cm²] et type 10 M1
Section des tubes allongés [cm²] 10

Observations dans le trou	Profondeur d'éboulement [m]	Profondeur du niveau d'eau [m]
En fin d'essai	10.70	8.90
En fin de chantier	-	-

Cote de départ [m]: +2,15



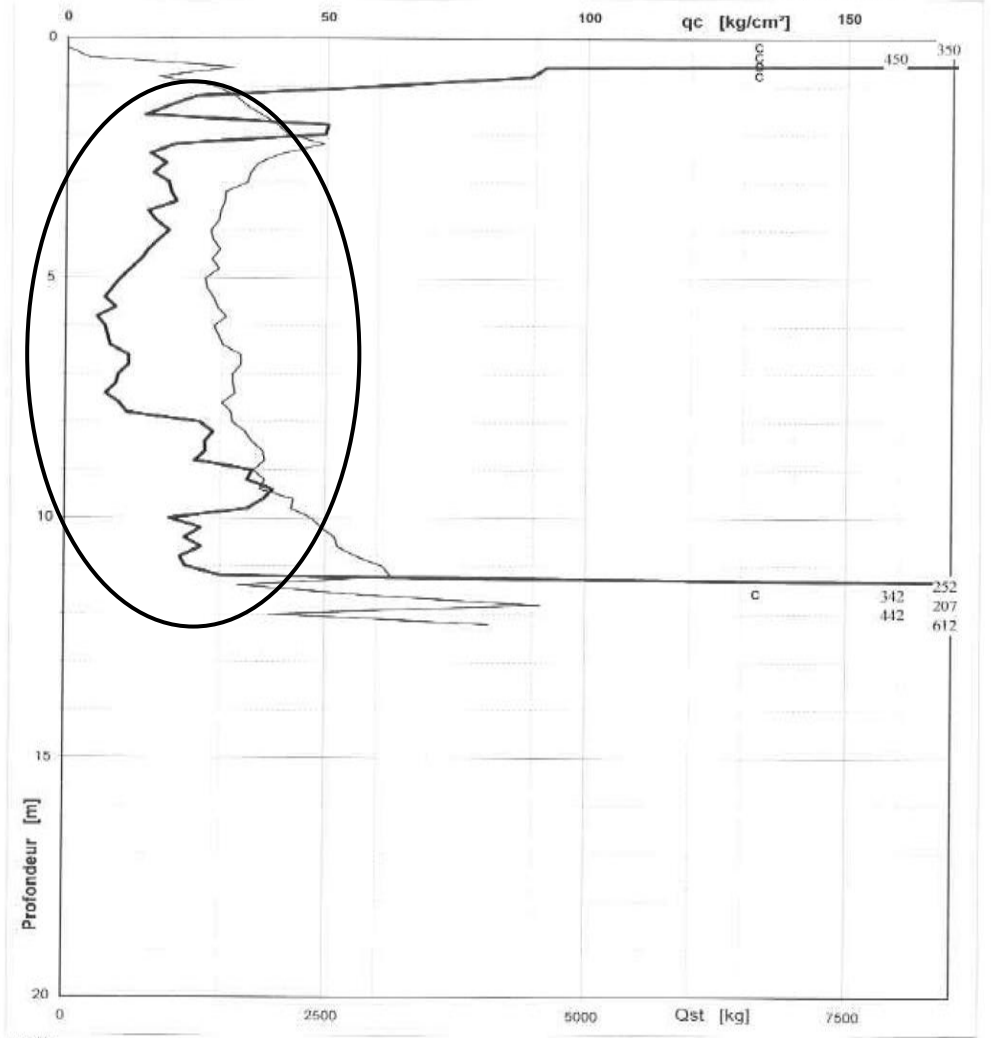
Légende:
c Chocs pendant renforcement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

Matériel utilisé:
Capacité de l'appareil hydraulique [T]: 10
Section de la pointe [cm²] et type: 10 M1
Section des tubes allongés [cm]: 10

Observations dans le trou	Profondeur d'éboulement [m]	Profondeur du niveau d'eau [m]
En fin d'essai	13,70	-
En fin de chantier	-	-

2 essais proches...

Cote de départ [m]: +1,90

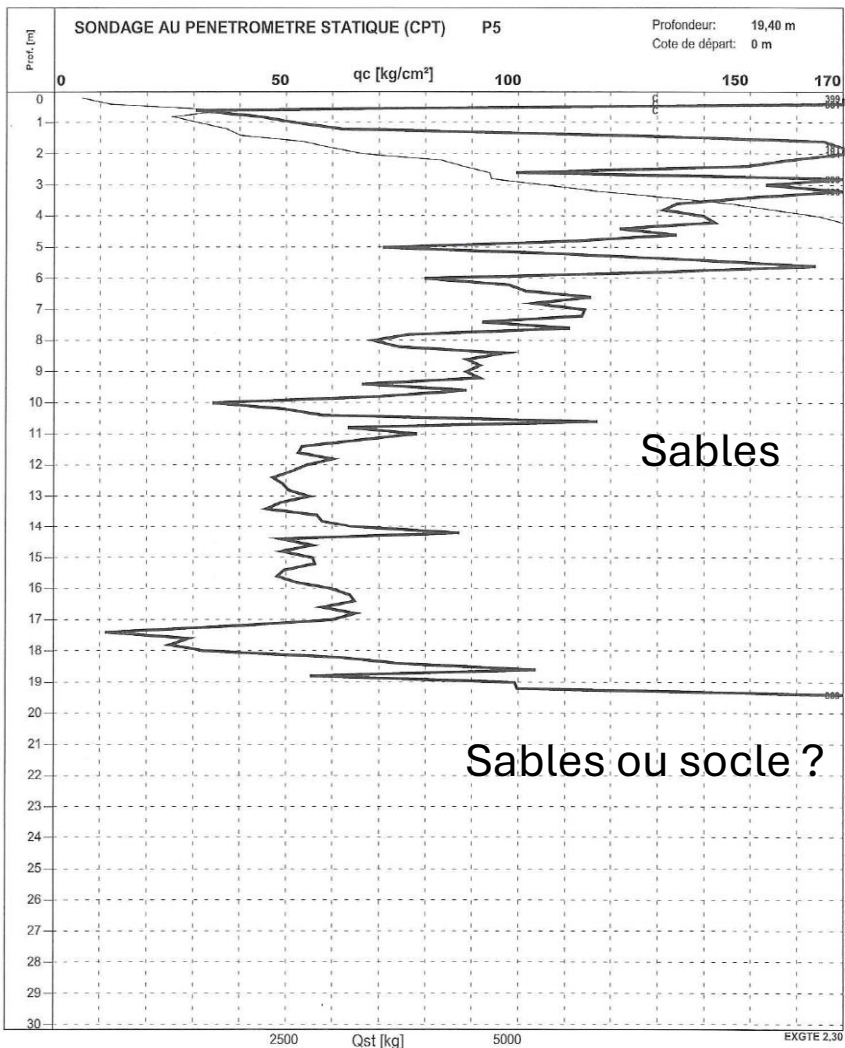


Légende:
c Chocs pendant renforcement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

Matériel utilisé:
Capacité de l'appareil hydraulique [T]: 10
Section de la pointe [cm²] et type: 10 M1
Section des tubes allongés [cm]: 10

Observations dans le trou	Profondeur d'éboulement [m]	Profondeur du niveau d'eau [m]
En fin d'essai	0,60	-
En fin de chantier	-	-

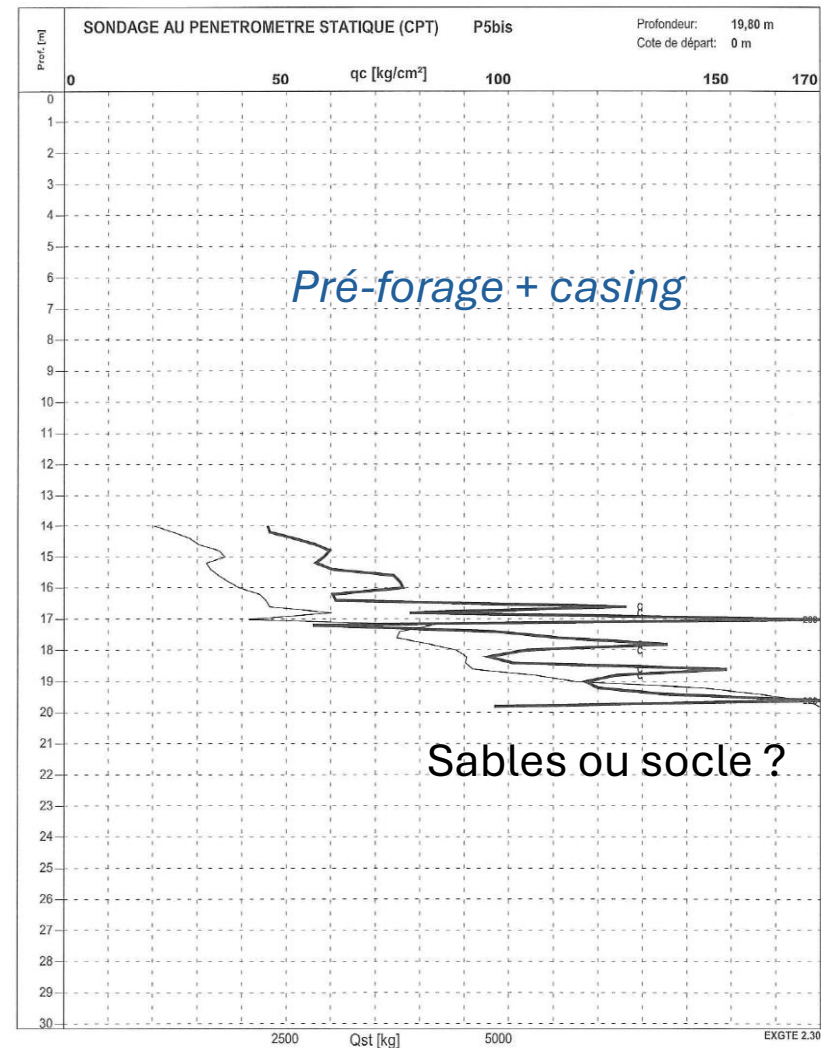
es pièges de la géologie de



Légende: c Chocs pendant l'enfoncement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

Matériel utilisé: Capacité de l'appareil hydraulique [T] 20
Section de la pointe [cm²] et type 10 M1
Section des tubes allongés [cm²] 10

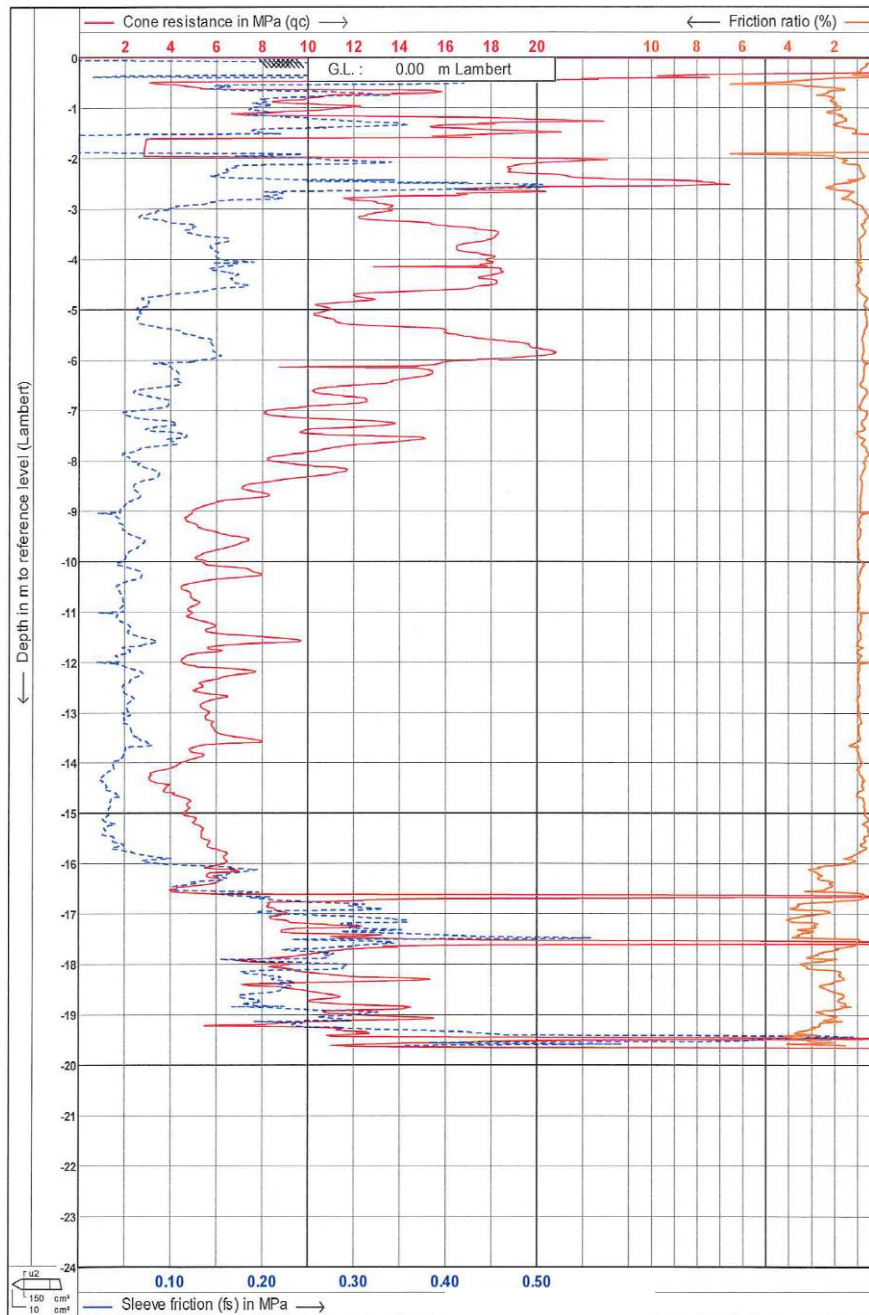
Observations dans le trou	Profondeur en fin d'essai [m]	Profondeur en fin de chantier [m]
Niveau d'eau	7,00	-
Eboulement	7,00	-




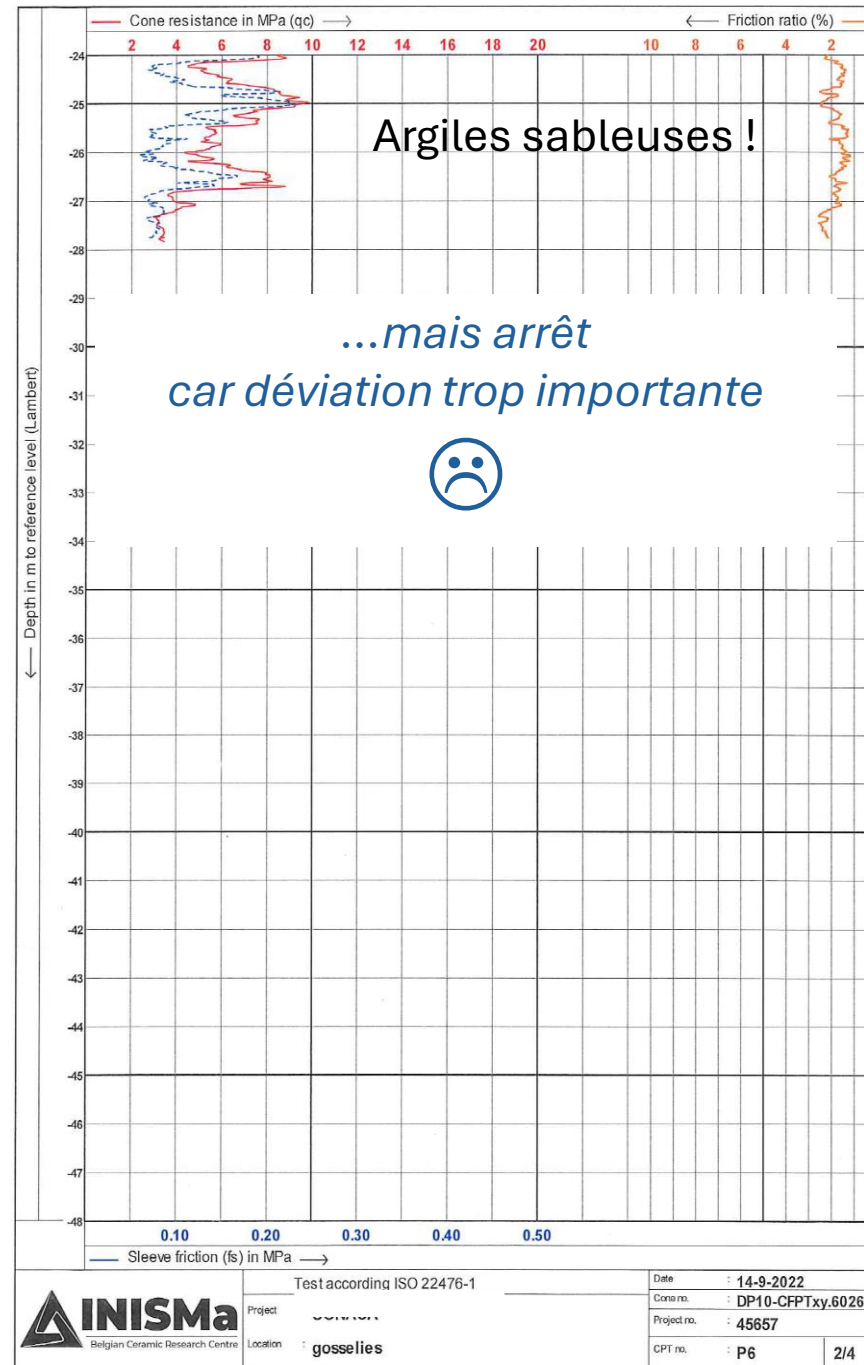
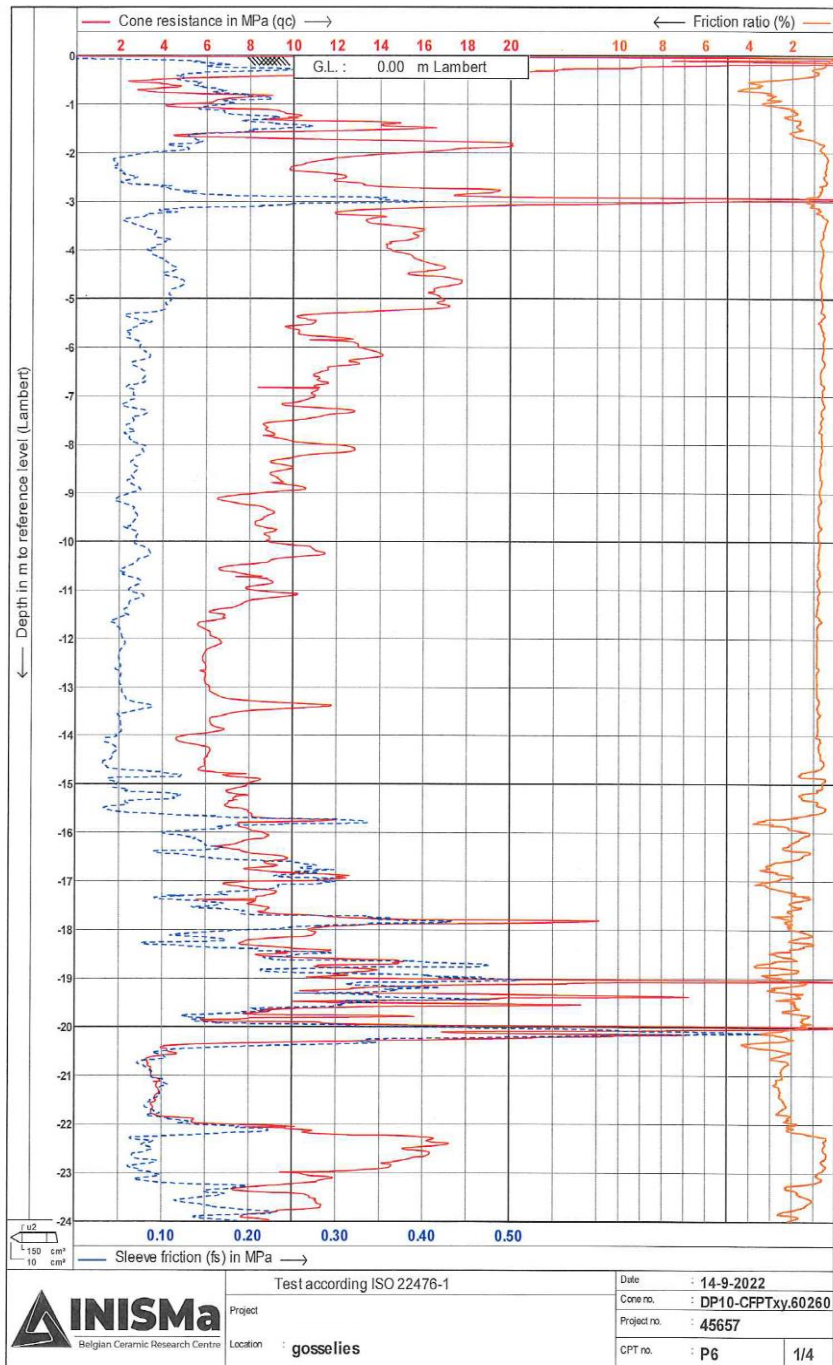
Légende: c Chocs pendant l'enfoncement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

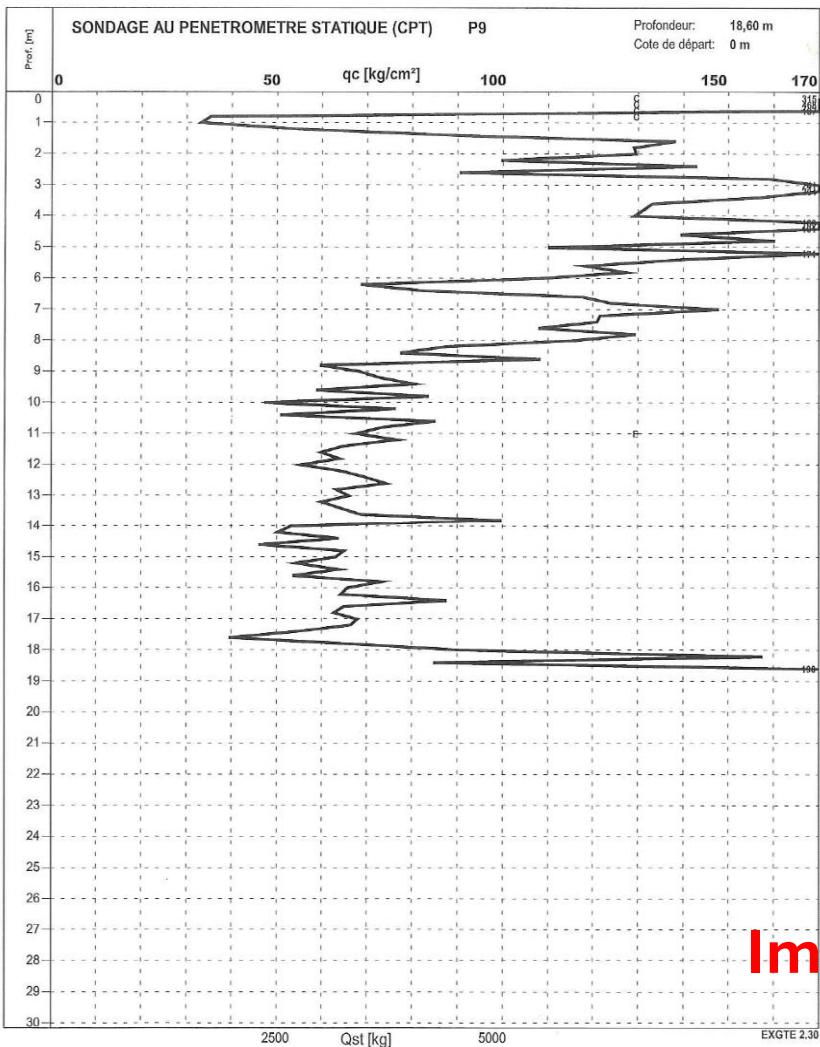
Matériel utilisé: Capacité de l'appareil hydraulique [T] 20
Section de la pointe [cm²] et type 10 M1
Section des tubes allongés [cm²] 10

Observations dans le trou	Profondeur en fin d'essai [m]	Profondeur en fin de chantier [m]
Niveau d'eau	-	-
Eboulement	-	-



 INISMa Belgian Ceramic Research Centre	Test according ISO 22476-1	Date : 14-9-2022
	Project :	Cone no. : DP10-CFPTxy.60260
Location : Gosselies	Project no. : 45657	CPT no. : P3
		1/2





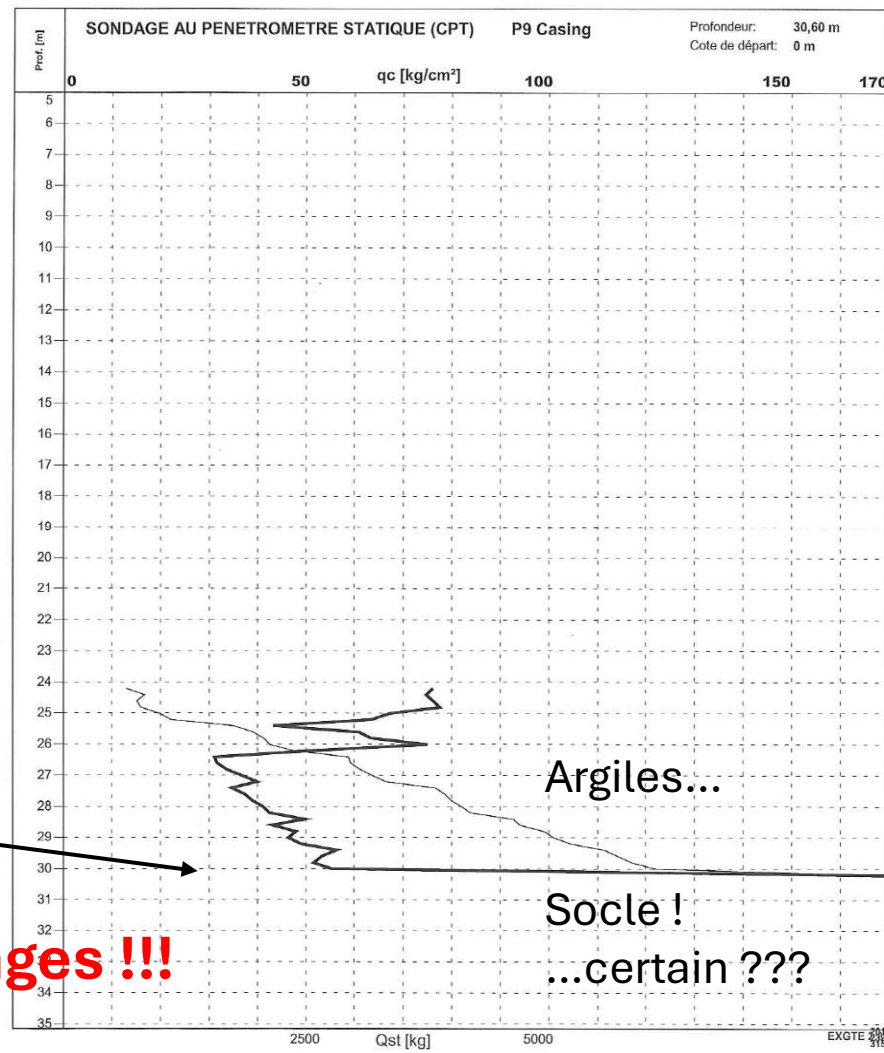
Légende: c Chocs pendant l'enfoncement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

Matériel utilisé: Capacité de l'appareil hydraulique [T] 20
Section de la pointe [cm²] et type 10 M1
Section des tubes allongés [cm²] 10

Observations dans le trou	Profondeur en fin d'essai [m]	Profondeur en fin de chantier [m]
Niveau d'eau	7,00	-
Eboulement	7,10	-

Importance des forages !!!

30 m



Légende: c Chocs pendant l'enfoncement
E Extraction partielle des tubes de sondage
TRF Sondage poursuivi avec Tube Réducteur de Frottement

Matériel utilisé: Capacité de l'appareil hydraulique [T] 20
Section de la pointe [cm²] et type 10 M1
Section des tubes allongés [cm²] 10

Observations dans le trou	Profondeur en fin d'essai [m]	Profondeur en fin de chantier [m]
Niveau d'eau	-	-
Eboulement	-	-

Prof. (m)	Equip. piézo.	Ech.	Coupe lithologique	Nat.	Lithologie	Humidité	Consistance	Couleur
1.00				R	Remblais sablo-limono-argileux peu plastiques.	Très humide	Faible	Brun gris orange
3.00				TN	Sables + - indurés contenant quelques concrétions sableuses, peu plastiques.	Imprégné d'eau	Très faible	Brun orangé
5.00				TN	Sables non plastiques.	Imprégné d'eau	Faible	Brun orangé
17				TN	Sables non plastiques.	Imprégné d'eau	"Boulant"	Beige verdâtre
19				TN	Sables indurés contenant des gros cailloux, non plastiques.	Imprégné d'eau	Faible	Beige verdâtre
20				TN	Complexes argilo-sableux/sablo-argileux, peu plastiques.	Imprégné d'eau	Faible	Gris

30 m

Prof. (m)	Equip. piézo.	Ech.	Coupe lithologique	Nat.	Lithologie	Humidité	Consistance	Couleur
28.70				TN	Complexes argilo-sableux/sablo-argileux, peu plastiques.	Imprégné d'eau	Faible	Gris
34.7				TN	Socles rocheux schisteux, fracturé vers 30,40 à 30,50m et 33,70 à 34,70m	Imprégné d'eau	Compact	Gris

Importance des forages

30 m

Prof. (m)	Equip. piézo.	Ech.	Coupe lithologique	Nat.	Lithologie	Humidité	Consistance	Couleur
21.00				TN	Sables, non plastiques.	Imprégné d'eau	Quasiment "boulant"	Verdâtre
30.00				TN	Argiles sableuses plastiques avec passes de sables légèrement argileuses très humides et peu plastiques.	Normale	Ferme	Gris - bleu
33				TN	Charbon parfois schisteux	Peu humide	Friable	Noir
35.6				TN	Schistes, compactes, comprenant de minces (< 1cm) couches de charbon (dans les joints de stratification)	Peu humide	Friable	Noir

Pourtant, forages très proches ($\approx 15-20m$) !
(couches très redressées à cet endroit)

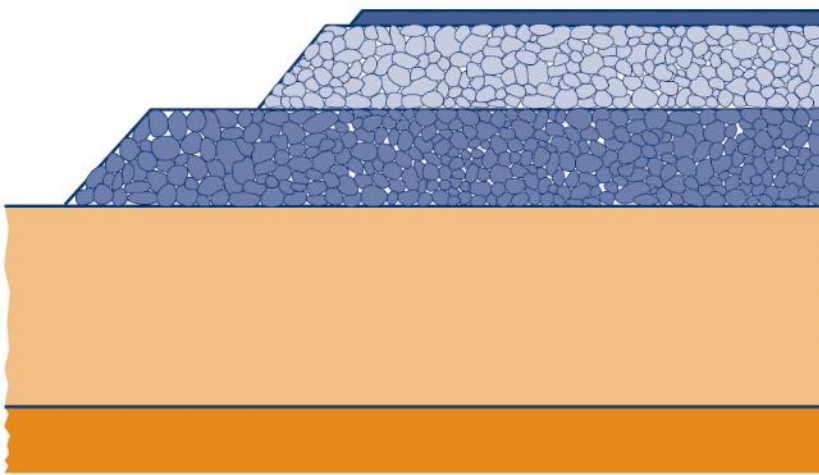
Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre

-

Etudes de formulation

Amélioration des sols

- Pour les travaux de terrassement, principalement dans le cadre de projet de voirie, **la portance en fond de coffre des sols (ou des « remblais ») présents peut être insuffisante.**
- **L'amélioration du fond de coffre peut avoir deux objectifs**
 - permettre la circulation des engins de chantier,
 - obtenir la portance exigée par l'étude de dimensionnement du coffre



- Revêtement
- Fondation
- Sous-fondation
- Fond de coffre
- (Remblai)
- Sol naturel

Amélioration des sols

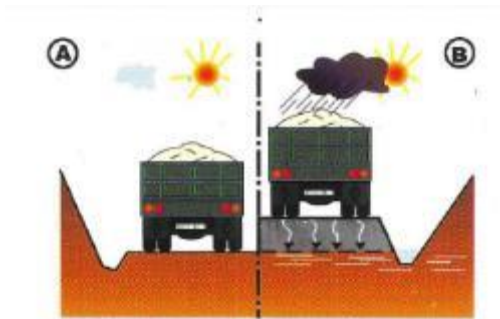
- Principalement, **les techniques d'amélioration** du fond de coffre sont
 - un re-compactage adapté,
 - le drainage du sol,
 - le placement de géogrilles,
 - le remplacement du sol impropre,
 - l'amélioration au moyen d'un liant hydraulique,



Géogrilles : voir les spécifications du fabricant



Liant hydraulique



Drainage



→ Remplacement

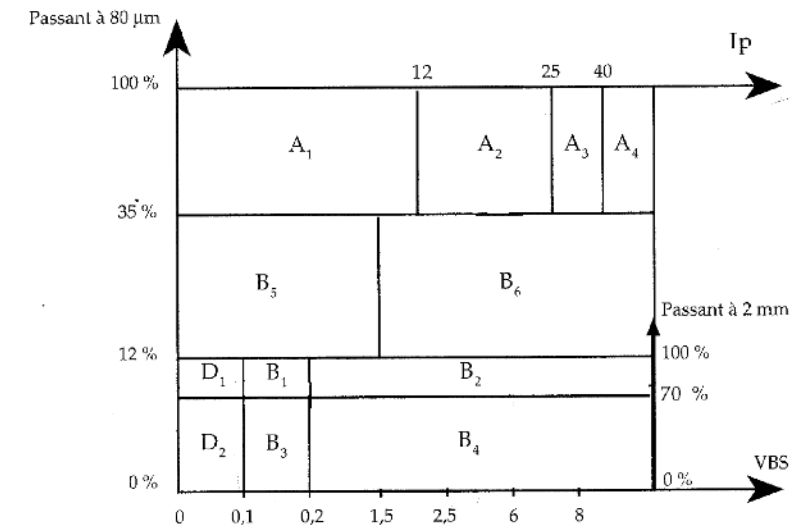
Amélioration des sols

- Le choix des différentes techniques est lié à **la nature du sol, à son humidité ainsi qu'aux conditions climatiques lors du chantier**
- Un document de référence : le Guide des Travaux Routiers (du SETRA, France)



La base = une classification fine des sols sur base d'essais géotechnique de laboratoire

- Granulométrie simplifiée,
- Essai au bleu,
- Essai Proctor,
- Essai IPI



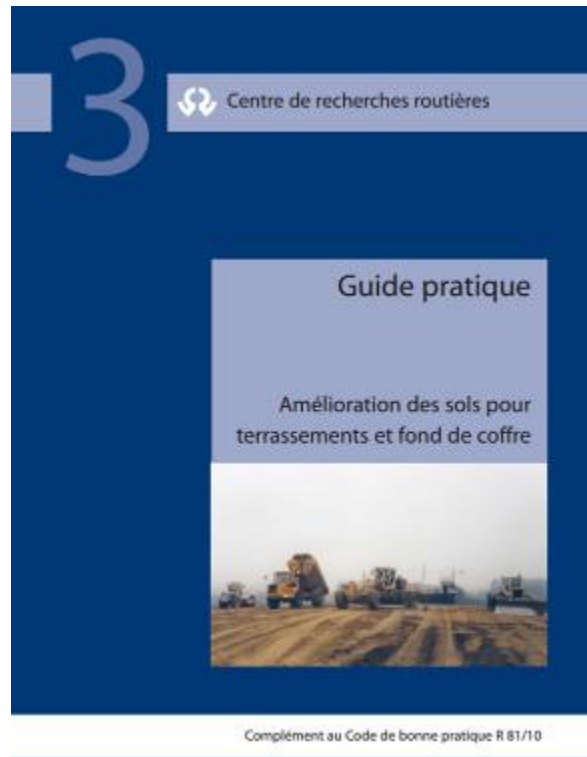
Amélioration des sols

- Le Guide des Travaux Routiers (du SETRA, France) : tableaux synoptiques
- **Exemple** : sol fin peu plastique (Classe A1)

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme
<i>Si humide</i> A_{1h}	La grande sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique de les traiter avec des liants hydrauliques associés éventuellement à de la chaux. La maîtrise de l'état hydrique de ces sols traités est souvent délicate en raison de la variation brutale de leur comportement (portance) pour de faibles écarts de teneur en eau. Ces sols se traitent généralement en place.	+ pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).
		= OU -	pas de pluie T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté
<i>Si moyennement</i> A_{1m}		+ pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).
		= OU -	pas de pluie W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté
<i>Si sec</i> A_{1s}		+ pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).
		= OU -	pas de pluie W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté

Amélioration des sols

- **Cas de l'amélioration des sols au liant hydraulique**
- Privilégié en général : généralement plus économique (et écologique) que le remplacement de sol et plus efficace que le placement de géogrilles



Un guide de référence = Guide Pratique du CRR,
basé sur des essais géotechniques de laboratoire,
guidant l'étude de formulation
(nouvelle version attendue prochainement)

Amélioration des sols

- L'étude de formulation – Caractérisation fine du sol

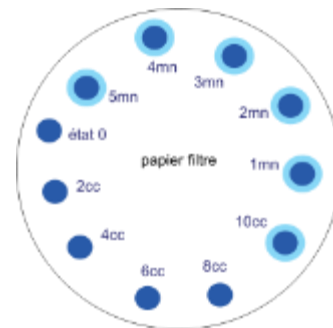
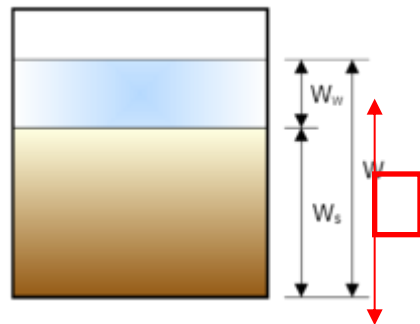
1) L'analyse des échantillons de sol *représentatifs* par quelques essais géotechniques simples de laboratoire

- Granulométrie simplifiée (Dmax, passant à 2 mm, passant à 63 microns)
- Teneur en eau naturelle
- Valeur de bleu de méthylène, mesure de l'argilosité / plasticité
- Teneur en matières organiques (MO)

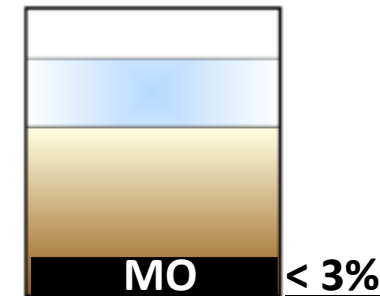
→ Classification des échantillons et de leur aptitude au traitement



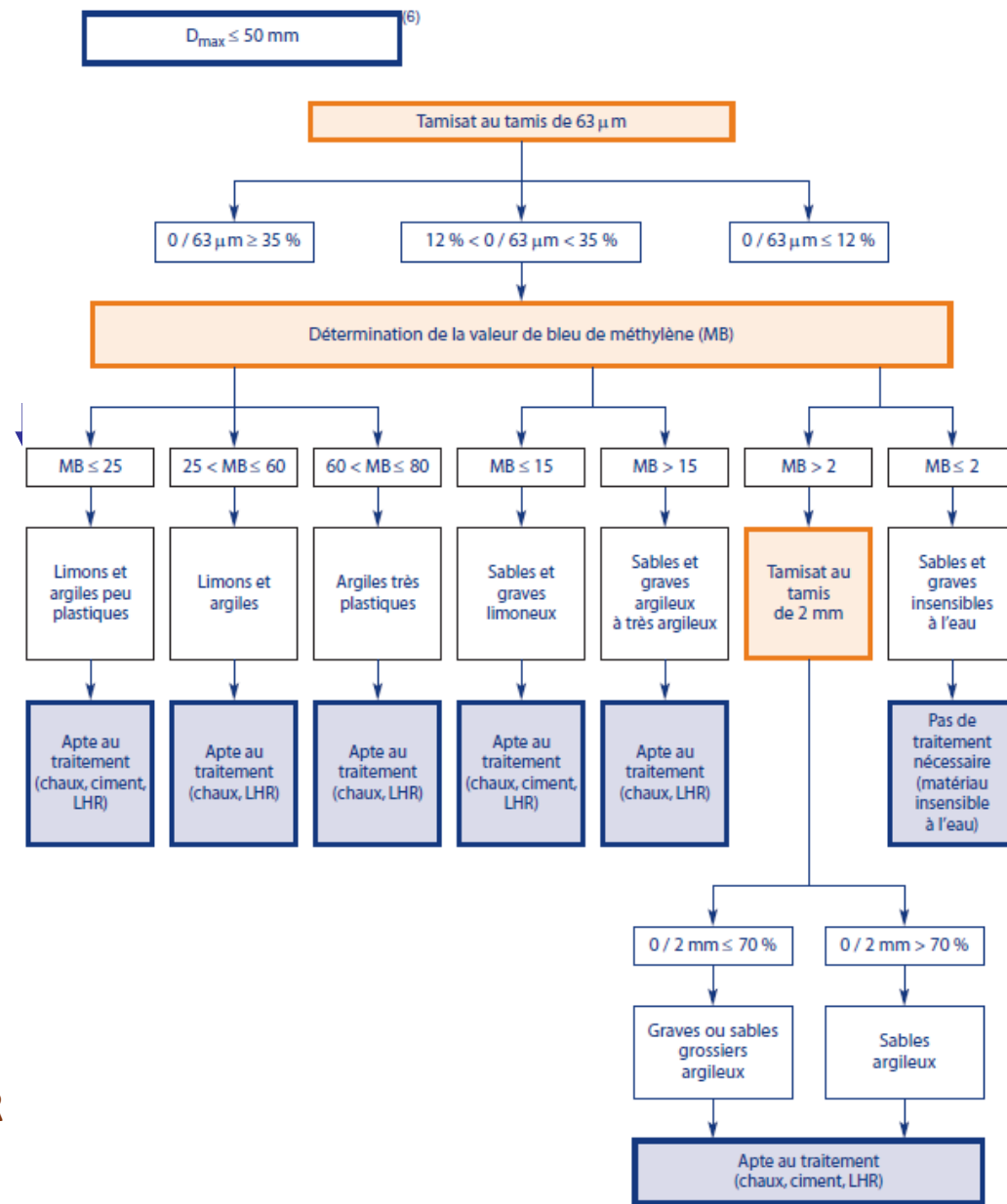
Argiles, Limons, sables,...



Valeur de bleu



Amélioration des sols



Chaux, Ciment, ou liant LHR

Amélioration des sols

- **L'étude de formulation**

- 2) L'étude de formulation complète

- Etude longue (+/- 5 semaines)
 - Quantité de liant pour une série de teneurs en eau susceptible d'être rencontrées sur chantier et pour une série de critères croissant à atteindre

- 2bis) L'étude de formulation simplifiée

- Dans le cas de « petit » chantier (< 2500 m³) ou de chantier en cours
 - Etude rapide (+/- 1 semaine)
 - Quantité de liant à la teneur en eau « naturelle » des échantillons

Amélioration des sols

- L'étude de formulation complète
 - Sur les échantillons au naturel (non traités)
 - Courbe Proctor Normal en 5 points
 - Indice de portance IPI en chaque point

Essai Proctor = compactage à différentes teneurs en eau



→ Mesures des différentes masses volumiques atteintes

Essai IPI = enfoncement d'un piston dans le sol compacté



→ Mesure de la force d'enfoncement du piston

Amélioration des sols

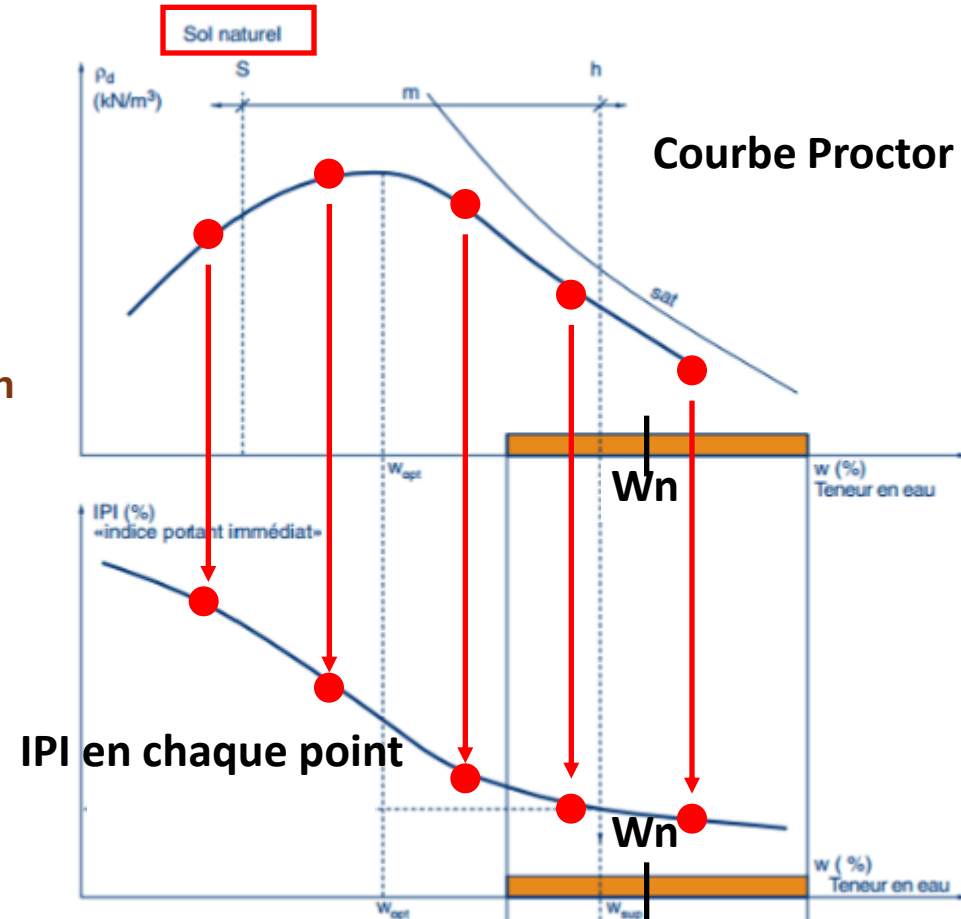
- L'étude de formulation complète

- Résultats

- Courbe « Proctor »
- IPI en chaque point

- La plage de teneurs en eau probables lors du chantier

- aux environs de la teneur en eau naturelle (W_n)



Amélioration des sols

- L'étude de formulation complète
 - Pour 3 dosages de liant (1%, 2% et 3% du poids sec),
 - Pour 4 teneurs en eau dans la plage attendue
 - Mesure de l'Indice de portance IPI



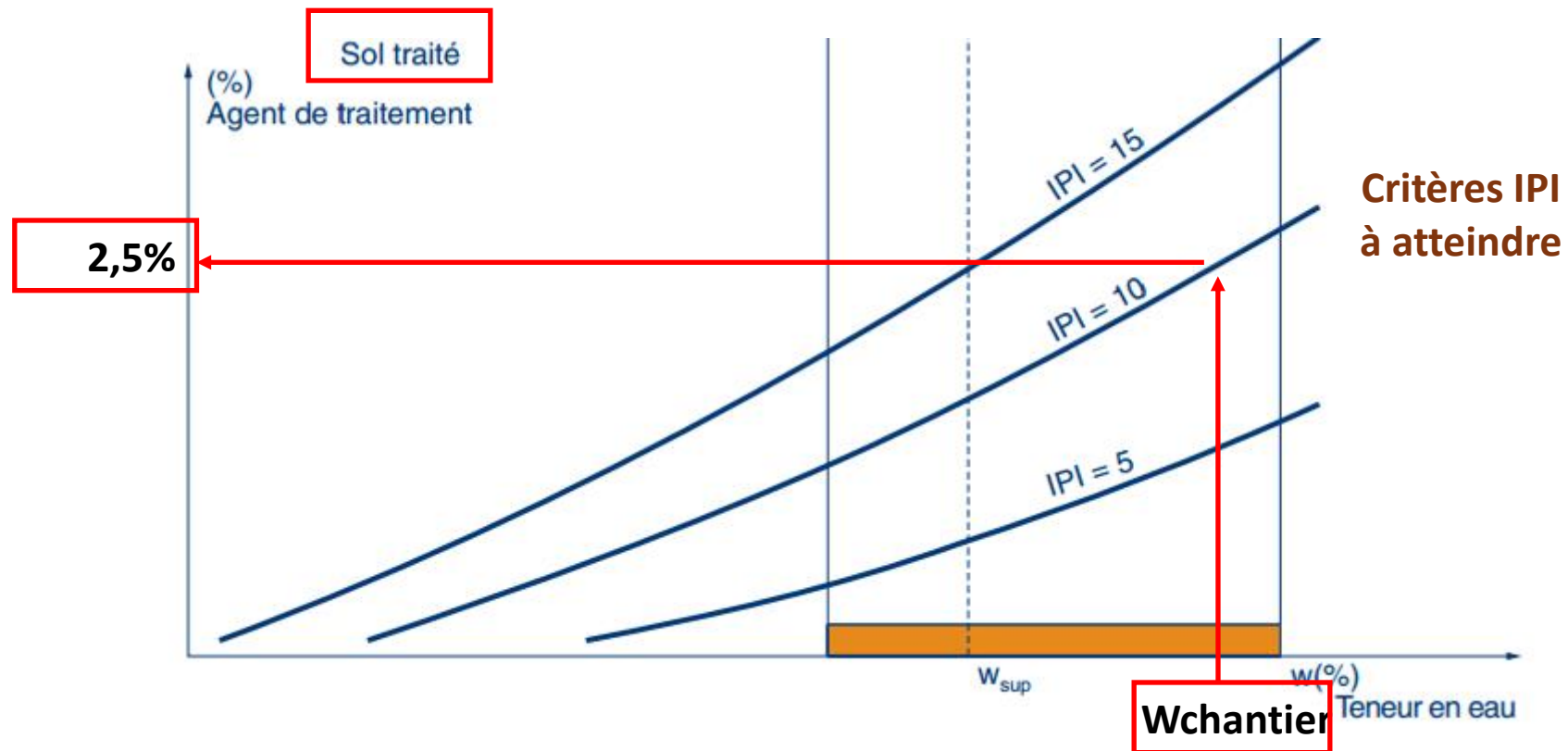
	1%	2%	3%
W1	IPI1	IPI2	IPI3
Wn	IPI4	IPI5	IPI6
W3	IPI7	IPI8	IPI9
W4	IPI10	IPI11	IPI12

- (Pour information, mesure du facteur CBR_{4j} / IPI à la teneur en eau W_n)

Amélioration des sols

- L'étude de formulation complète

- Résultat



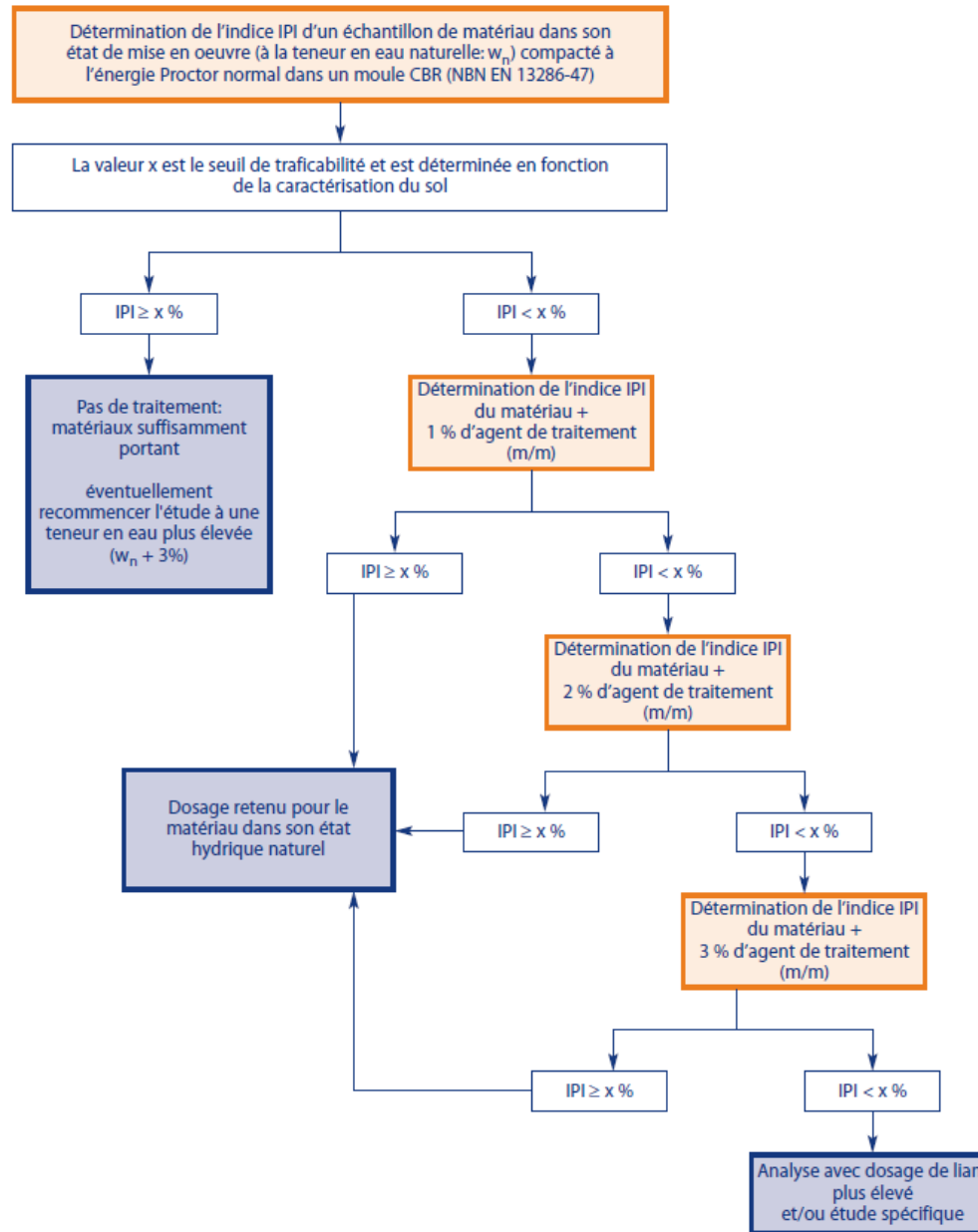
Amélioration des sols

- **L'étude de formulation simplifiée**
 - **Uniquement la série d'essais IPI sur échantillons à teneur en eau naturelle**
 - On suppose que la teneur eau ne variera pas beaucoup
 - Car le chantier est sur le point de commencer
 - Car les sols sont relativement homogènes
 - Car ...



	1%	2%	3%
W1	IPI1	IPI2	IPI3
Wn	IPI4	IPI5	IPI6
W3	IPI7	IPI8	IPI9
W4	IPI10	IPI11	IPI12

Amélioration des sols



Amélioration des sols

- **Critères IPI à atteindre (au laboratoire)**

5.3.1 Portance immédiate des remblais ou fonds de coffre

On utilise la valeur IPI⁽⁷⁾. L'objectif de l'indice de portance est indiqué dans le tableau 1 ci-dessous⁽⁸⁾.

5.3.2 Portance à terme

Pour garantir le maintien des performances de l'IPI, le facteur $CBR_{4j} \text{ d'immersion} / IPI$ doit être supérieur ou égal à 1.

Tableau 1 – Objectifs du traitement des sols pour la réutilisation des sols trop humides en remblai ou fond de coffre

Catégorie de sol	Valeur d'IPI à atteindre (remblais)	Valeur d'IPI à atteindre (fond de coffre)
Limons et argiles peu plastiques (MB ≤ 25)	10	12
Limons et argiles (25 < MB ≤ 60)	7	10
Argiles très plastiques (MB > 60)	5	8
Sables	15	15
Graves	20	20

Amélioration des sols

- L'étude de formulation, à noter :
 - Les études en laboratoire permettent surtout de déterminer la faisabilité économique d'un traitement, d'avoir une première évaluation du dosage
 - réalisation de **planches d'essai** fortement recommandée au début du chantier pour adapter le dosage prescrit aux conditions de mise en œuvre :
 - Conditions climatiques (pluviosité, température, vent)
 - Matériel de compactage utilisé (type et énergie)
 - Expérience et soin de l'entrepreneur



Paramètre	Méthode d'essai	Domaine de validité des critères (2)	Critère pour Couches de remblai	Critère pour Fond de coffre (mètre supérieur du remblai)
Coefficient de compressibilité	CME.50.01 (Essai à la plaque statique)	0 – 0,5 m	$M_1 \geq 11$ MPa (droite OA)	$M_1 \geq 17$ MPa (droite OB)

Essais de contrôle des plateformes de remblais

Il n'existe pas de guidelines générales...

- ➔ le BE est chargé de proposer les critères à atteindre et la fréquence des essais
- ➔ généralement : **référence = QUALIROUTES - chapitre E**

- 1 essai par 1000 m², avec un minimum de 3 par zone de travail et pour chaque couche

- Plaque Belge

- Sonde de battage type C.R.R.

- Essais « Panda »

- Ou module de Westergaard
(à la demande du BE)



Essai à la plaque « belge » (détermination du module M1)

QUALIROUTES

E.3.3.3.1

Classification des sols (voir chapitre C.2.)					
Sols fins (cat.I.3)	Sols fins graveleux (cat I.2) et sables de Dmax ≤ 8 mm (1)	Autres sols	Sols fins (cat.I.3)	Sols fins graveleux (cat I.2) et sables de Dmax ≤ 8 mm (1)	Autres sols

Paramètre	Méthode d'essai	Domaine de validité des critères (2)	Critère pour Couches de remblai			Critère pour Fond de coffre (mètre supérieur du remblai)		
Coefficient de compressibilité	CME.50.01 (Essai à la plaque statique)	0 – 0,5 m	$M_1 \geq 11 \text{ MPa}$ (droite OA)			$M_1 \geq 17 \text{ MPa}$ (droite OB)		
Taux de compactage	CME 50.07	0 – 0,3 m	$\geq 95 \%$ OPN			$\geq 98 \%$ OPN		
Enfoncement par coup	CME 50.03 (Essai au pénétromètre CRR)	0,3 – 2 m	$X \leq 20$ mm/coup	$X \leq 12$ mm/coup	Pas de critère prédéfini (3)	$X \leq 12$ mm/coup	$X \leq 8$ mm/coup	Pas de critère prédéfini (3)
Résistance à la pénétration dynamique	CME 50.11 (Essai au pénétromètre dynamique à énergie variable (type PANDA))	0,3 – 5 m	$q_d \geq 3,5 \text{ MPa}$	$q_d \geq 8 \text{ MPa}$		$q_d \geq 5,5 \text{ MPa}$	$q_d \geq 12 \text{ MPa}$	

- (1) Dmax est le diamètre maximal du tamis correspondant à 100 % de passant.
- (2) Profondeur sous le niveau du terrain au moment de l'essai
- (3) Critère spécifique à définir dans les documents de marché



Essai « Panda »



lien avec le GTR français possible

Merci pour votre attention !



Département *Géotechnique et Environnement Sols*

[*geotechnique@bcrc.be*](mailto:geotechnique@bcrc.be)