

L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances



nouvelles **A**pproches de **R**econnaissance
des **S**ols et de **C**onception des **O**uvrages
géotechniques avec le **P**ressiomètre



Journée de restitution

Vision internationale

Marcos Arroyo (*Universitat Politècnica de Catalunya, UPC; Barcelone, Espagne*)

1. INTRODUCTION

1. Statistique
2. Temoignages

2. EXPERIENCES PERSONALES

1. Valencia: fondation profonde
2. Barcelone: excavation
3. Mexique: résidus

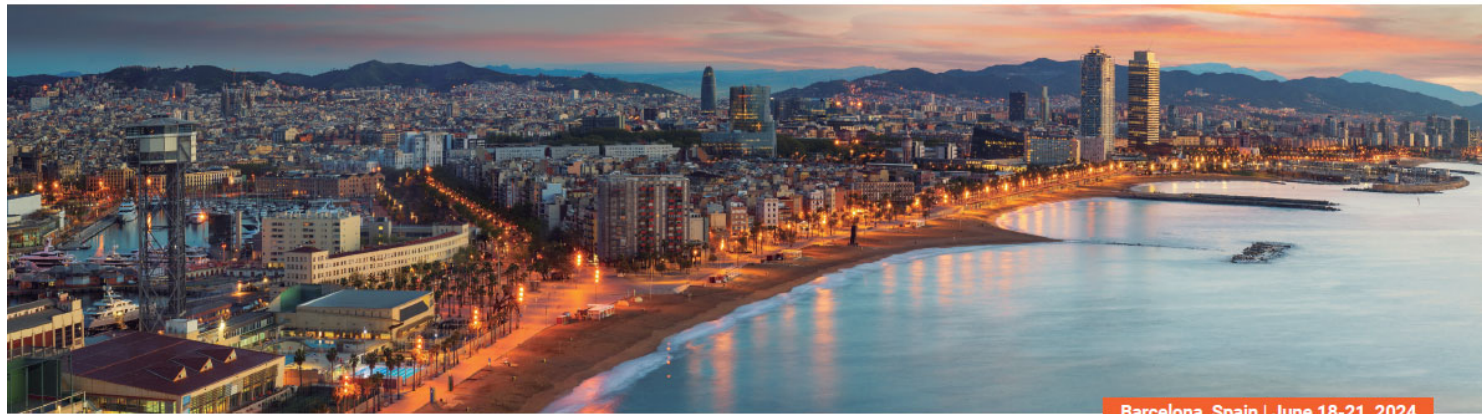


TC102 In-Situ Testing

[Home](#) / [Committees](#) / [Technical Committees](#) / [TC102 In-Situ Testing](#)



Ground Property Characterization from In-Situ Tests



Barcelona, Spain | June 18-21, 2024



Conference secretariat:

isc2024@cimne.upc.edu

Campus Nord UPC, Building C1 - Office C4

Gran Capità, S/N (08034), Barcelona, Spain

Tel. +34 93 405 4694

Barcelona, Spain | June 18-21, 2024

How to register and submit contributions:

Authors are invited to submit individual contributions on any of the conference topics. Submissions and conference registration should be performed electronically via the conference web.

Key dates:

- End date abstract submission: 30/09/2023
- Abstract acceptance: 31/10/2023
- Paper submission: 31/01/2024
- Revised paper submission: 15/04/2024


isc7.cimne.com

**7th International Conference on
Geotechnical and
Geophysical Site
Characterization**

*“Ground models, from big data
to engineering judgement”*

Conference	Annee	Contributions	Contributions sur le pressiometre	Pressiometre / total	Dont France	France / PMT	
ISC7	2024	321	19	6%	6	32%	
ISC6	2020	288	26	9%	16	62%	
ISC5	2016	245	22	9%	6	27%	
ISC4	2012	229	17	7%	4	24%	ISP6
ISC3	2008	207	30	14%	5	17%	
ISC2	2004	230	14	6%	0	0%	ISP5
ISC1	1998	206	33	16%	5	15%	

Australia

- Le test pressiométrique (PMT) n'est pas couramment utilisé en Australie, bien qu'il soit de plus en plus utilisé.
 - Il existe peu de pressiomètres dans le pays, (20 à 25), répartis à peu près 50:50 en unités tri-cellules et mono-cellules pré-perfores, avec très peu d'unités auto-perforantes.
 - La plupart d'entre eux appartiennent à grands cabinets de conseil, sans ressources dédiées pour les exploiter et les entretenir au sein de l'organisation.
 - Cependant, cela a changé au cours des deux dernières années, car des sous-traitants spécialisés dans les tests ont commencé à exploiter et à commercialiser le PMT, ajoutant de la crédibilité aux résultats des tests.
- 
- La grande majorité des tests dont nous avons connaissance ont été réalisés à des fins de conception de fondations/pieux, avec un petit nombre à des fins de murs de soutènement et d'amélioration du sol.
 - Dans l'ensemble, le PMT n'est pas bien compris par l'ingénieur moyen en Australie. ...la capacité du test n'est pas entièrement comprise et la façon d'interpréter les résultats du test n'est pas ajournée

Canada

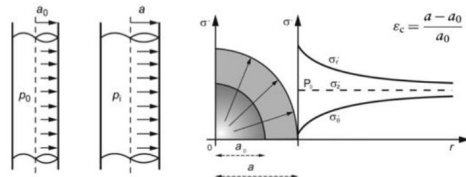
- En général, il n'est utilisé que lorsque l'analyse des déformations est nécessaire...[avec] le comportement élastique non linéaire comme entrée dans, par exemple, le modèle HS
- Pour la résistance, pas de qualité suffisante dans les sables, pour les argiles, non drainée, oui
- J'ai conseillé à certaines entreprises de commencer à l'envisager pour l'analyse de la liquéfaction, mais .. la plupart sont bloquées sur leurs idées
- La plupart des applications concernent des excavations profondes, tunnels et des barrages.
- Les sociétés minières l'ont utilisé peu, dans une certaine mesure pour mieux comprendre les mouvements induit par des opérations à ciel ouvert.
- Trop de gens tentent d'appliquer des solutions complexes sous forme fermée à un outil censé être simple....

- “pressiomètre” pour des perforations dirigées du « fracking » a 2-5 km de profondeur
- Resolution 1 micron
- 100 MPa
- Temperatures de 200 C

USA

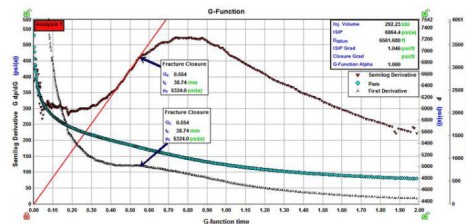
Intelligent Packer

- Instrumented packer that measures the rock's response to applied force and displacement



Mini-Frac

- Low volume, high pressure fluid injection
- 14,500 psi differential



Brazil

- Le Brésil possède de vastes depots de sols résiduels, atteignant souvent des épaisseurs de plusieurs dizaines de mètres dans les régions tropicales. En général, les sols résiduels sont ...un environnement idéal pour les tests pressiométriques. Cependant, le pressiomètre n'est pas un test courant au Brésil.
- Bien que quelques entreprises proposent le pressiomètre Menard à des fins commerciales, le marché reste limité et les avantages de son utilisation sont peu connus.
- L'Université de São Paulo, USP, possède un autoforeur acquis il y a environ 20 ans ; à ma connaissance, il n'est pas actuellement opérationnel.
- Les contraintes comprennent la perception que le processus est long et coûteux, ainsi qu'un manque général de compréhension de la théorie de l'expansion des cavités.



- J'ai exploré les opportunités dans l'industrie minière et je pense que je suis l'un des rares consultants à préconiser l'utilisation de tests pressiométriques dans les études de site. Je considère le secteur minier comme une voie prometteuse pour établir un marché pour les tests de pressiométrie au Brésil.
- La situation que je viens de décrire n'est pas propre au Brésil. J'ai observé des conditions similaires dans d'autres pays d'Amérique du Sud.

Latinoamerique

- « ... même, si on voudrait utiliser l'essai, il manque souvent des exécutants fiables, sauf dans les pays de culture française, dans la Jamaïque et au Mexique » (directeur technique régional, compagnie spécialiste des fondations)
- Colombie, Peru, Argentine: très peu utilisée, manque des contracteurs fiables
- Chili:
 - Usage assez fréquent dans le secteur minier, pas fréquent pour le civil
 - Normative spécifique (essai Menard) depuis 2019.
- Bolivie:
 - deux operateurs, équipes tri et mono-cellulaire,
 - utilisation fréquente dans les ouvrages hydrauliques et d'irrigation. Utilisation en hausse pour des fondations.
 - Normative spécifique en rédaction

Chine

- Pressiometres “Menard” de manufacture locale en use depuis 40 années
- Application très répandue dans les fondations et ouvrages souterraines



Chine

- Normalisation
 - des applications
 - Code pour les investigations géotechniques (2001; 2009)
 - Investigations géotechniques pour des édifices à grande hauteur (JGJ-72-2004)
 - Code des fondations profondes pour édification (JGJ94-2008)
 - Investigations géotechniques pour des ouvrages de métro (GB50307-2012)
 - du essai (2019)



1. INTRODUCTION

1. Statistique
2. Temoignages

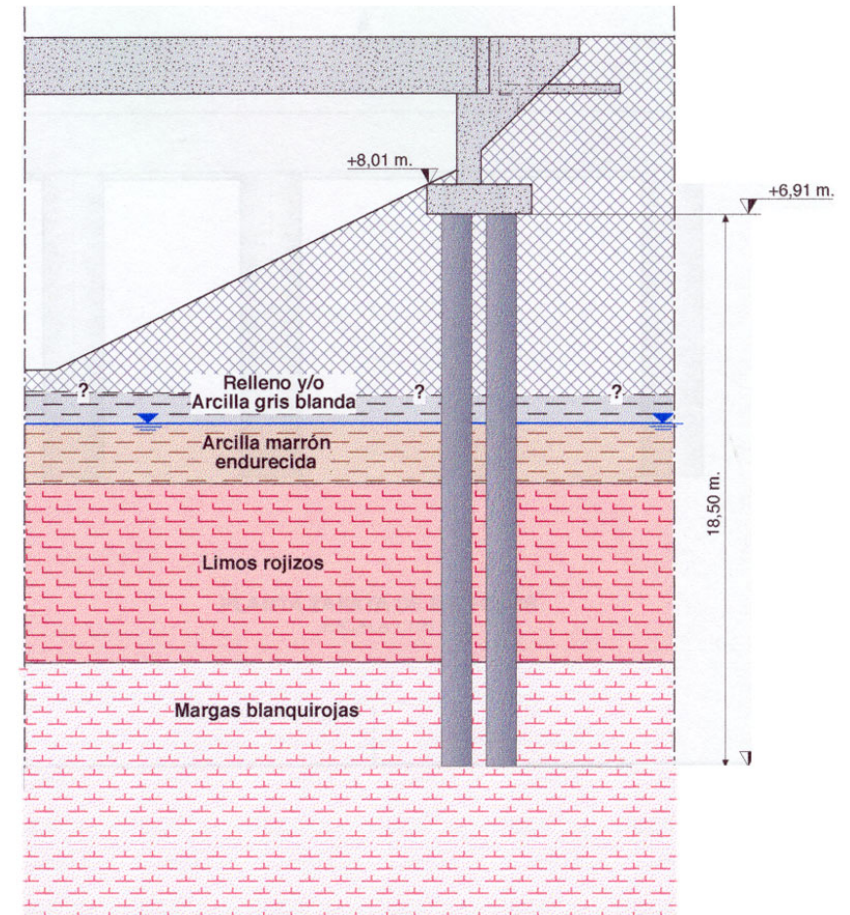
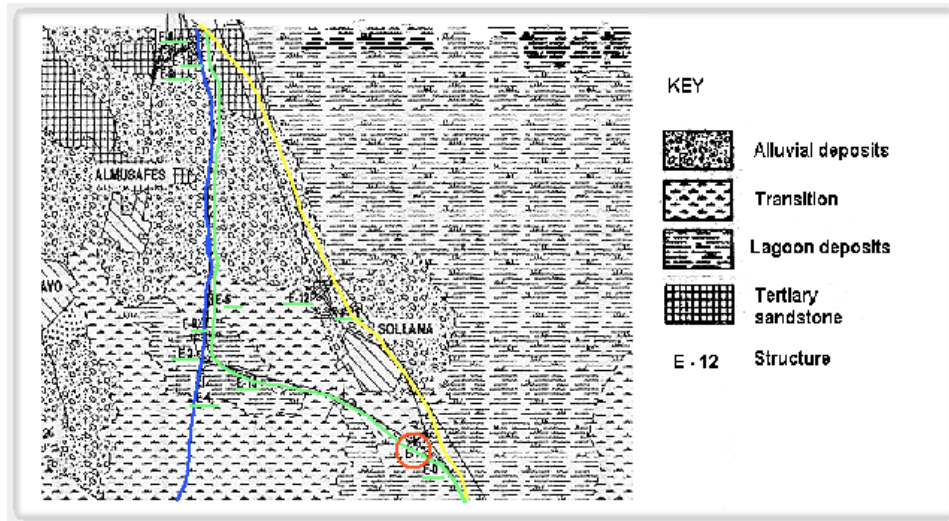
2. EXPERIENCES PERSONALES

1. Valencia: fondation profonde
2. Barcelone: excavation
3. Mexique: résidus

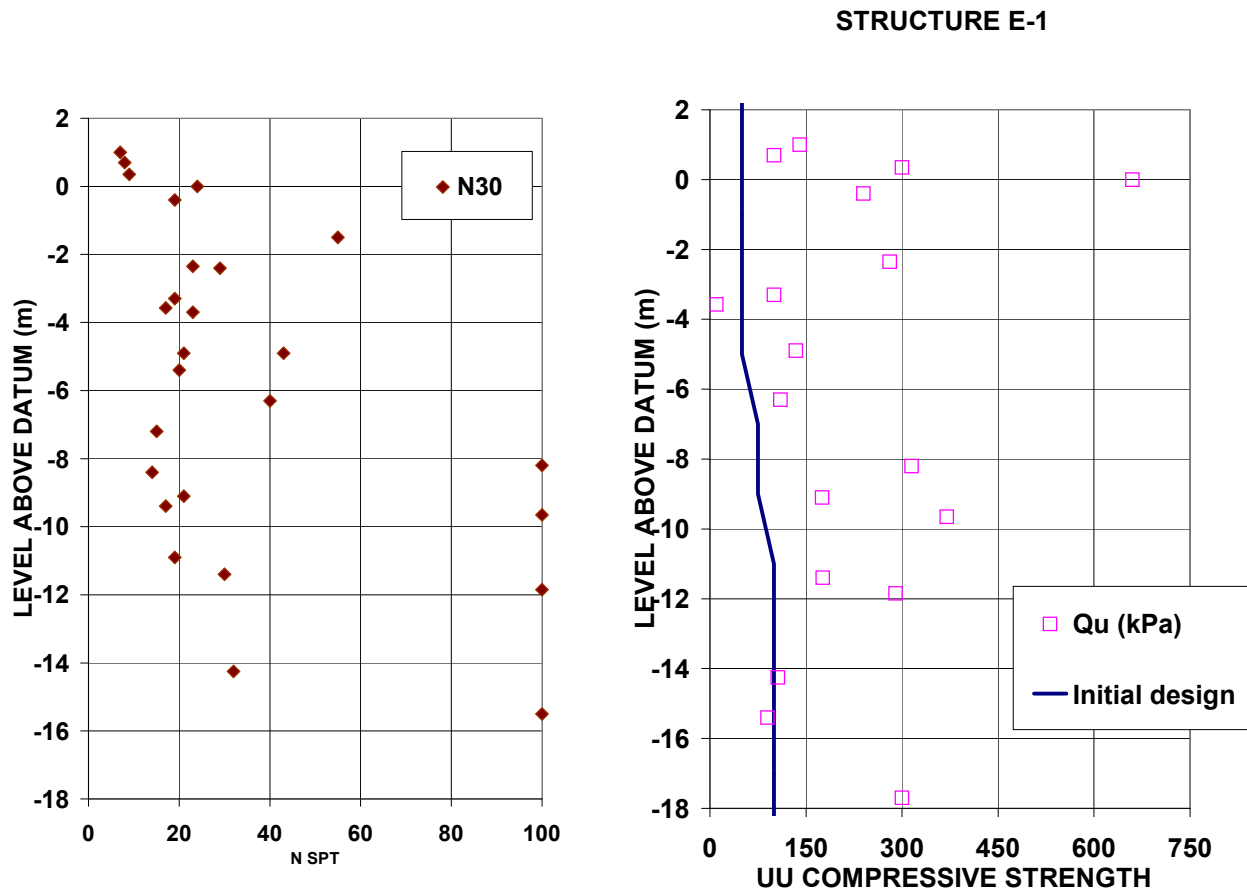
Experience 1: Valencia, L'Albufera, 1992



Une autoroute, un pont, une culée

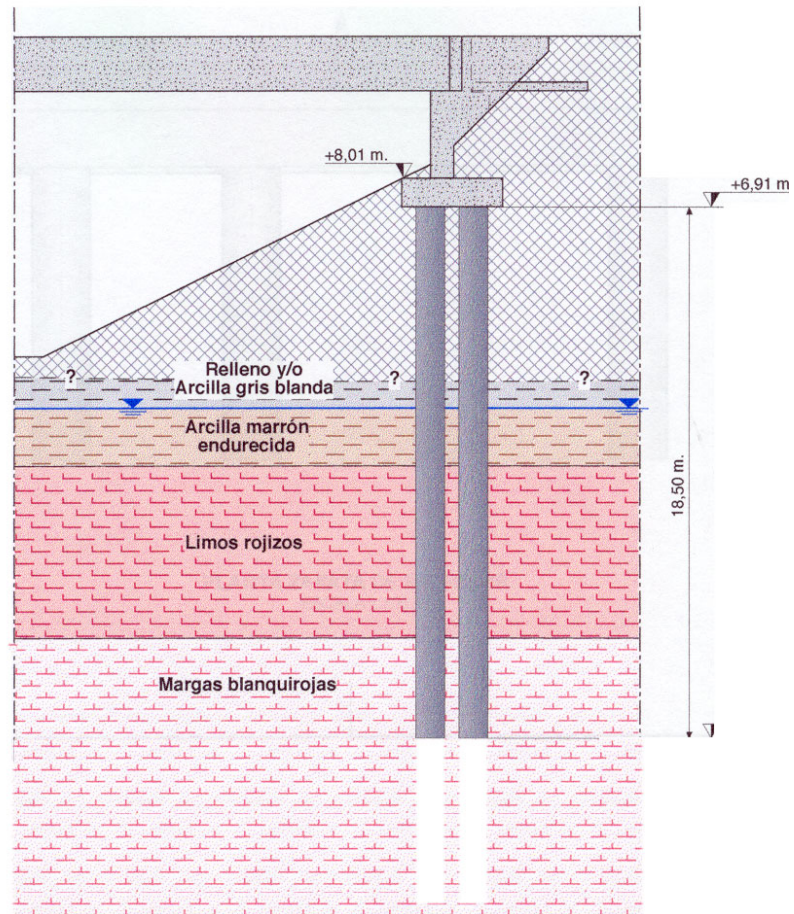


Conception initial des pieux



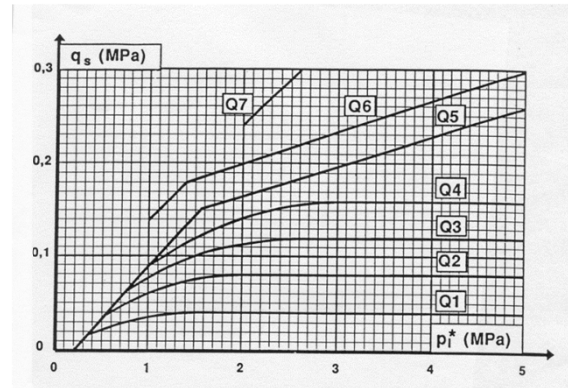
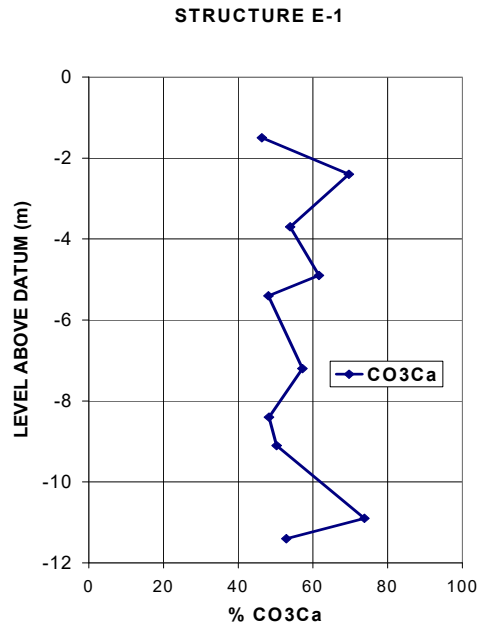
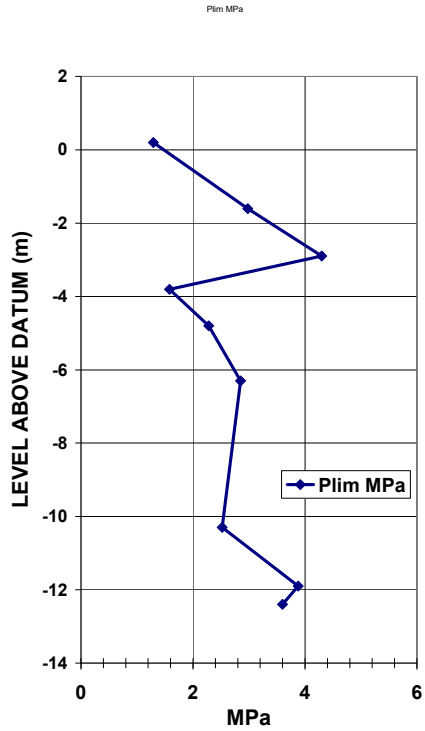
- Dépôts marécageux + nappe élevée + défense contre crues -> pieux
- Profile avec des graves et niveaux résistants erratiques -> foré tubé, flottante
- Frottement latérale: méthode $\alpha + SPT$ (Dècourt 1989)

Errare humanum est (1)

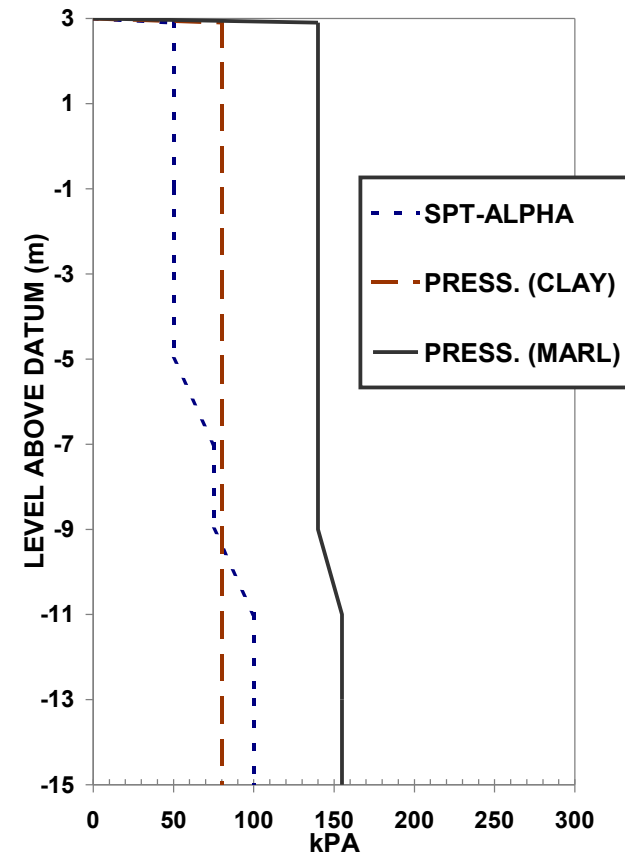


$$F_s < 1.5$$

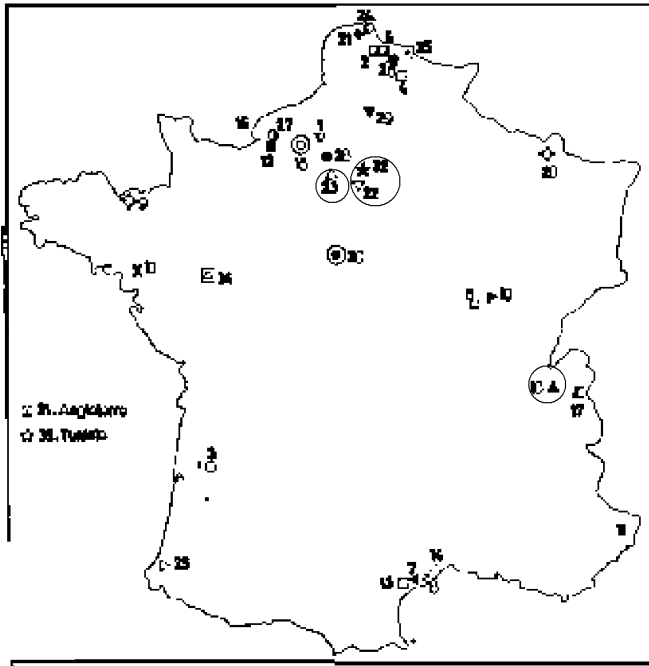
Pressiomètre au secours



SETRA-LCPC 1985



Mais...



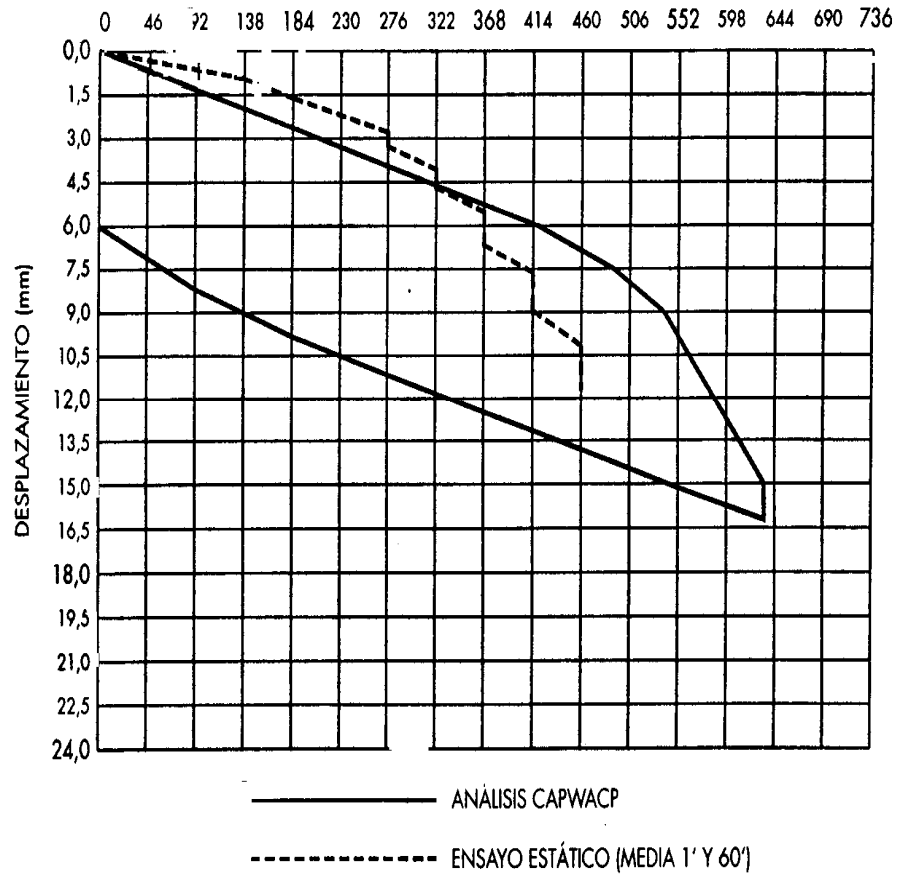
Bustamante and Gianceselli (1981)



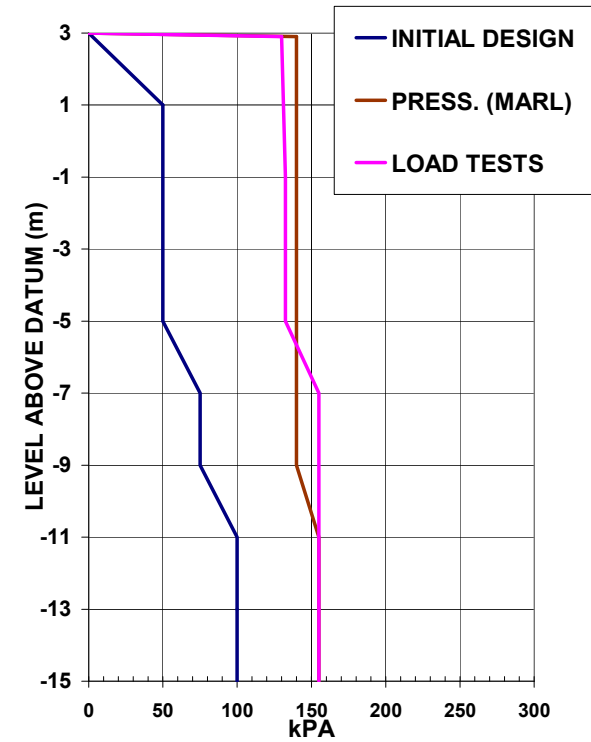
- Les marnes et calcaires de la base des données originale étaient bien plus anciennes que celles de Valencia
- Et puis, le pressio c'est bien un truc français, n'est ce pas?
- Essai sur pieux nécessaire

Voire et croire

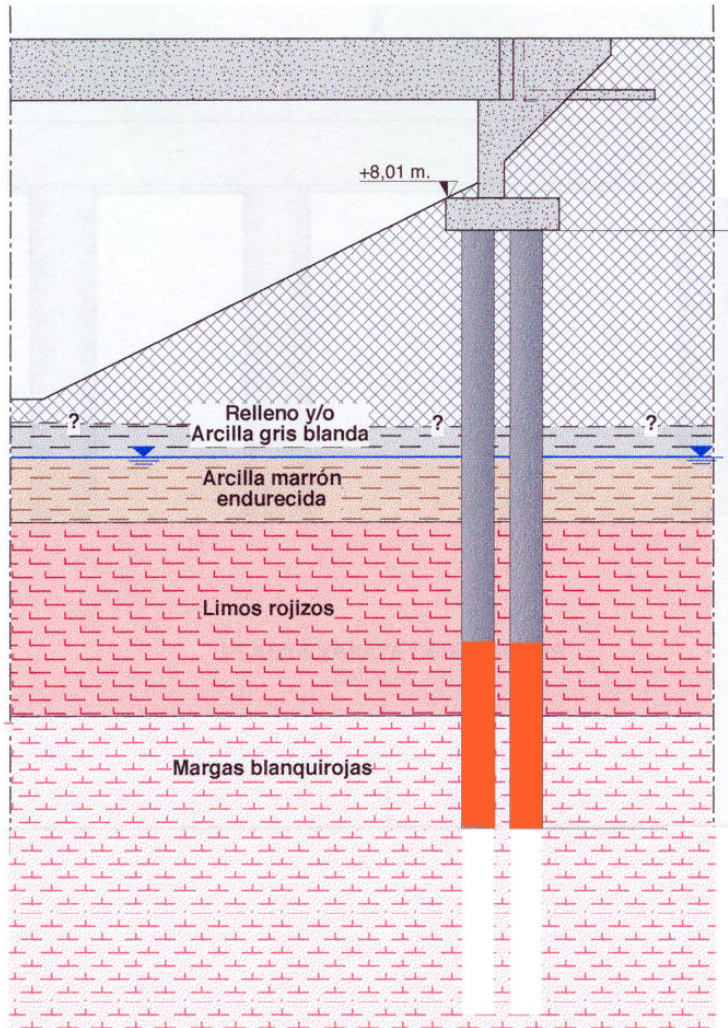
PRUEBA DE CARGA EN SOLLANA
CARGA (Tn)



SIDE RESISTANCE ESTIMATES



Errare humanum est (2)

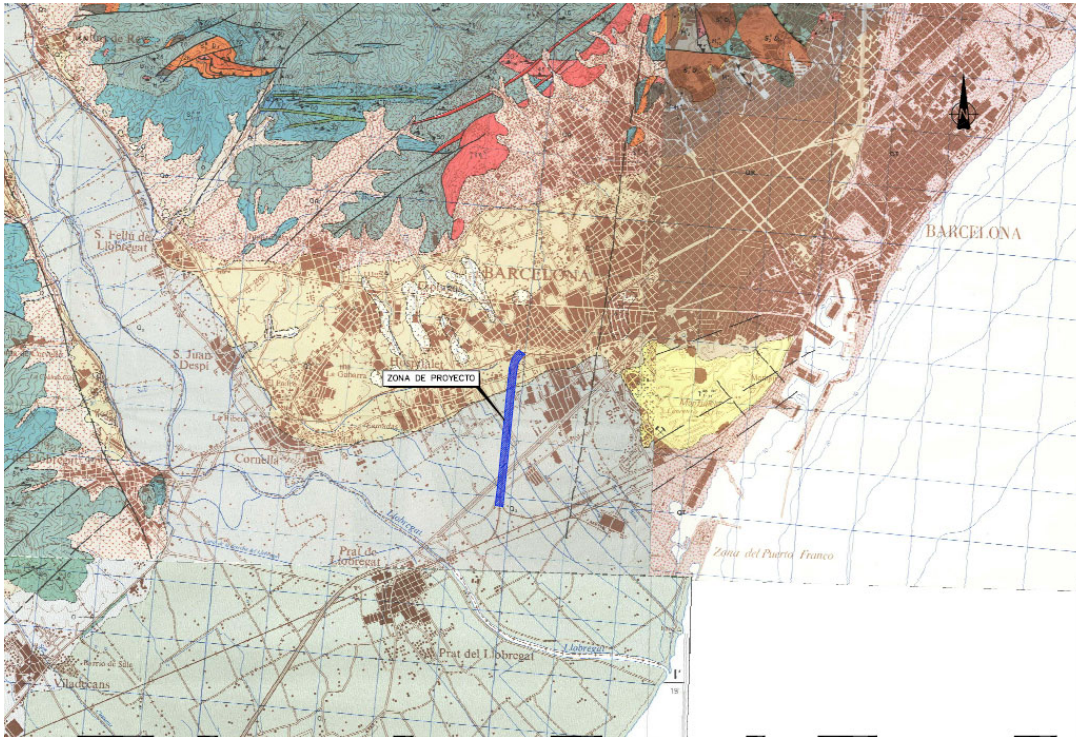


- Les pieux n'étaient pas du tout courtes, au contraire...
- On aurait du fer du pressiomètre avant

Commentaires

- La conception pressiométrique des fondations à été reconnue par la normative espagnole dans les années 90/00, et maintenant on a déjà le Eurocode
- L'avantage unique de la base de données systématique a l'appuie du méthode pressiométrique n'est plus là, maintenant il 'y a aussi des méthodes CPT avec un support empirique très développée
- Mais le PMT peut toujours aller la ou le CPTu n'arrive pas (indures, alternances grossiers, etc...)

Experience 2: Barcelone, excavation, 2007

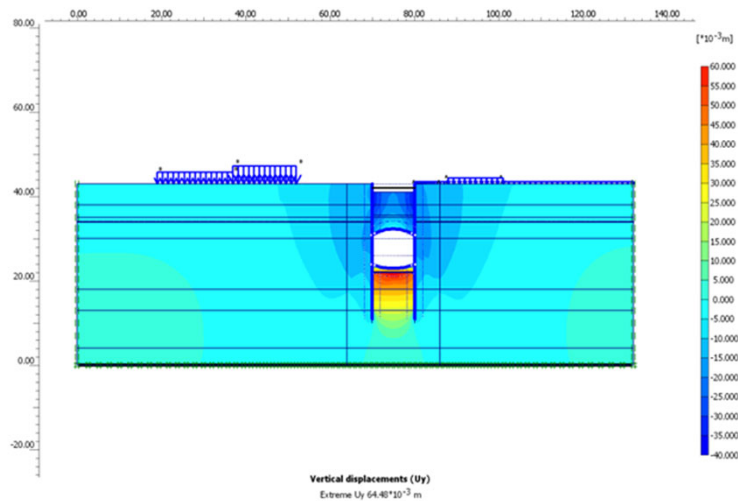


- Ligne de haute vitesse Madrid-Barcelonne
- Approche en zone urbaine a la Gare de Sants
- Transition des terrains deltaïques aux alluviales et Miocènes du centre-ville

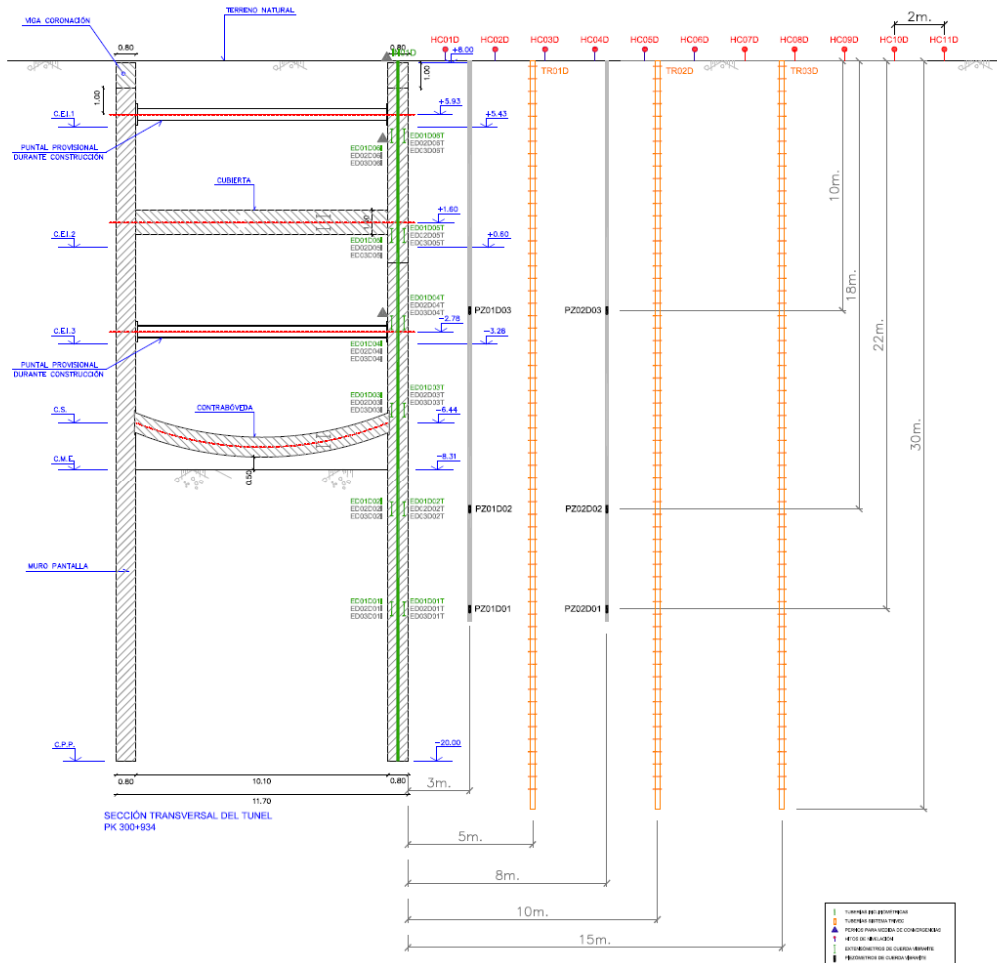
Excavations profonde a Bellvitge



- Problème d'affectations a tiers (voisins, trains de banlieue, ...)
- Les prédictions des mouvements doivent être basées sur
 - Des procédures numériques robustes
 - Descriptions constitutives correctes
 - Des paramètres et valeurs initiales fiables
- Quelle est le programme d'investigation du terrain le plus performante?



Secciones d'étude



- Rampe d'accès au tunnel
- Excavation de 18 m de profondeur
- Instrumentation
 - Piézomètres
 - Inclinomètres / extensomètres
 - Jalons de surface
- Information géotechnique abondant (SPT, CPTu, Lab –TX, OED; **PMT**; **SBPM**, SDMT, CH....)

Des concepteurs imaginaires

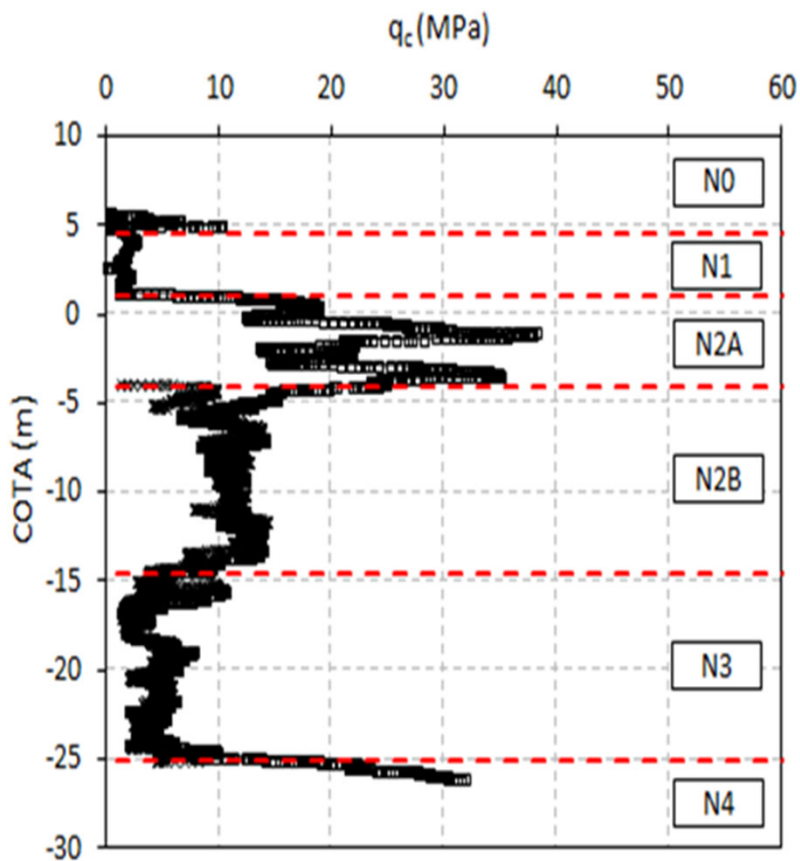


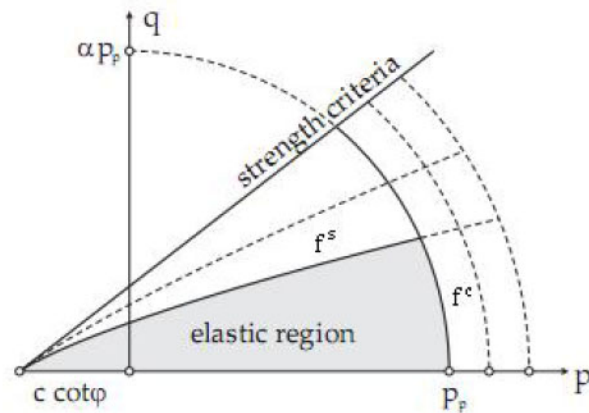
Table 2. Constraints acting upon the designers.

Designer ID	Budget	Time	Tradition
Designer 1	+	+	++
Designer 2	+	++	++
Designer 3	+	++	+
Designer 4	++	++	+

Table 3. Soil characterization strategies.

Designer ID	Common tests	Tests
Designer 1		Triaxial (CU and CD), Oedometer, Direct shear (CU and CD) and RCS
Designer 2	CPTu, SPT	Pre-bored PMT
Designer 3		SBPM and cross-hole test
Designer 4		DMT, SDMT and cross-hole test

Ce que tous les concepteurs partageaient



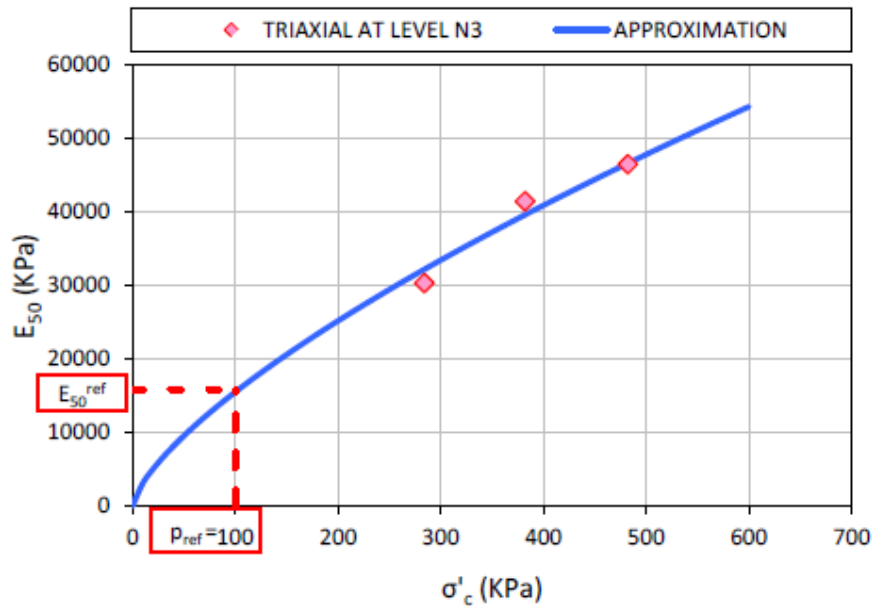
$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma_1 + c \cot \varphi}{p_{ref} + c \cot \varphi} \right)^m$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \varphi}{p_{ref} + c \cot \varphi} \right)^m$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \varphi}{p_{ref} + c \cot \varphi} \right)^m$$

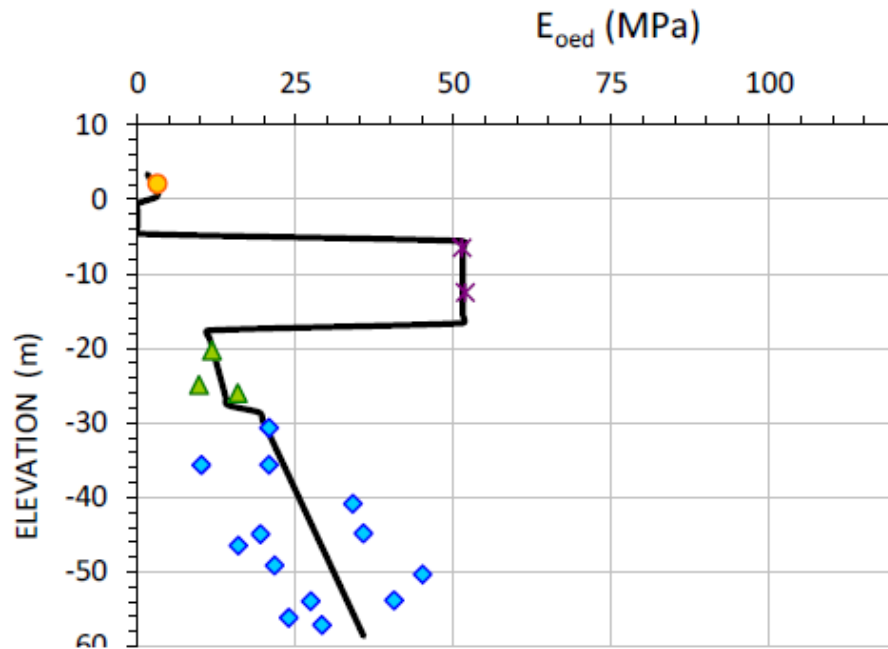
- Stratigraphie
- Logiciel (Plaxis2D)
- Description constitutive (Hardening soil model)
- Une (bonne) connaissance de la mécanique des sols

Concepteur 1: "Lab"



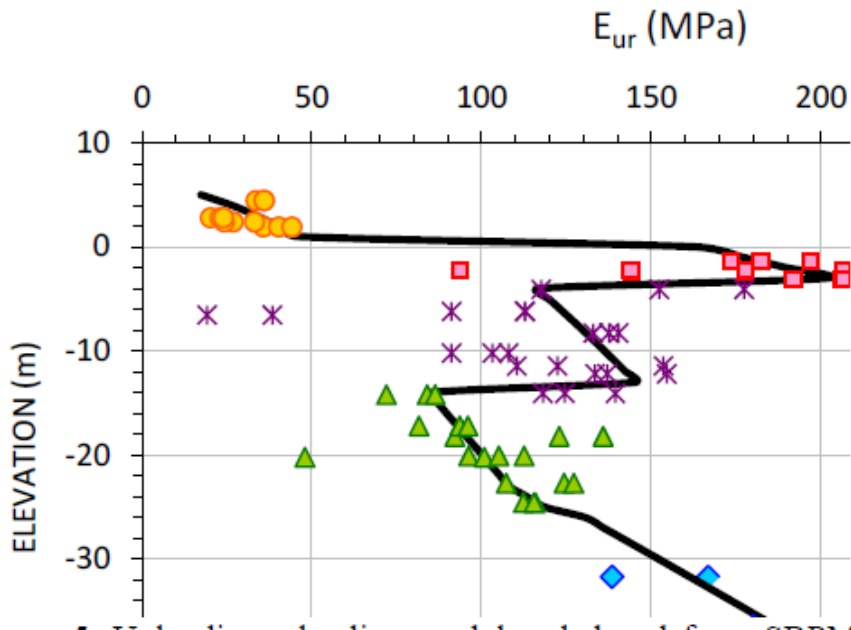
- K_0 de Jaky
- Triaxial pour E_{50}^{ref} et m
- OEdomètre pour E_{oed}^{ref}
- Proportion conventionnelle
(Vermeer, 2001) pour E_{ur}^{ref}

Concepteur 2: "PMT"



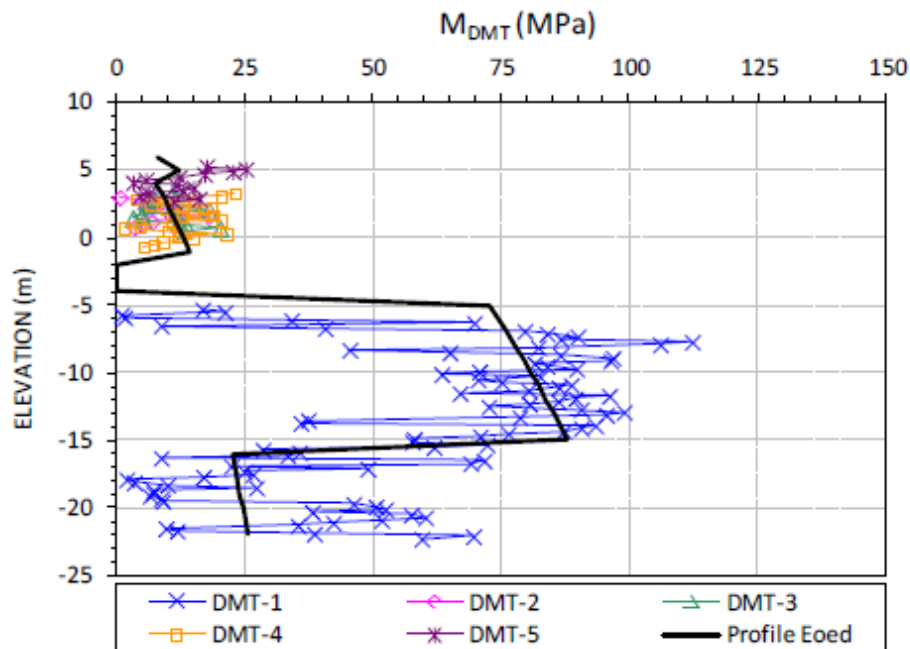
- K_0 assume (0.5 sil n'y a pas du carbonate; 1 autrement)
- **PMT** pour E_{oed}^{ref} (relations de Menard; Combarieu, 2006) et m
- Proportion conventionnelle (Vermeer, 2001) pour E_{50}^{ref} et E_{ur}^{ref}

Concepteur 3: "SBPM"



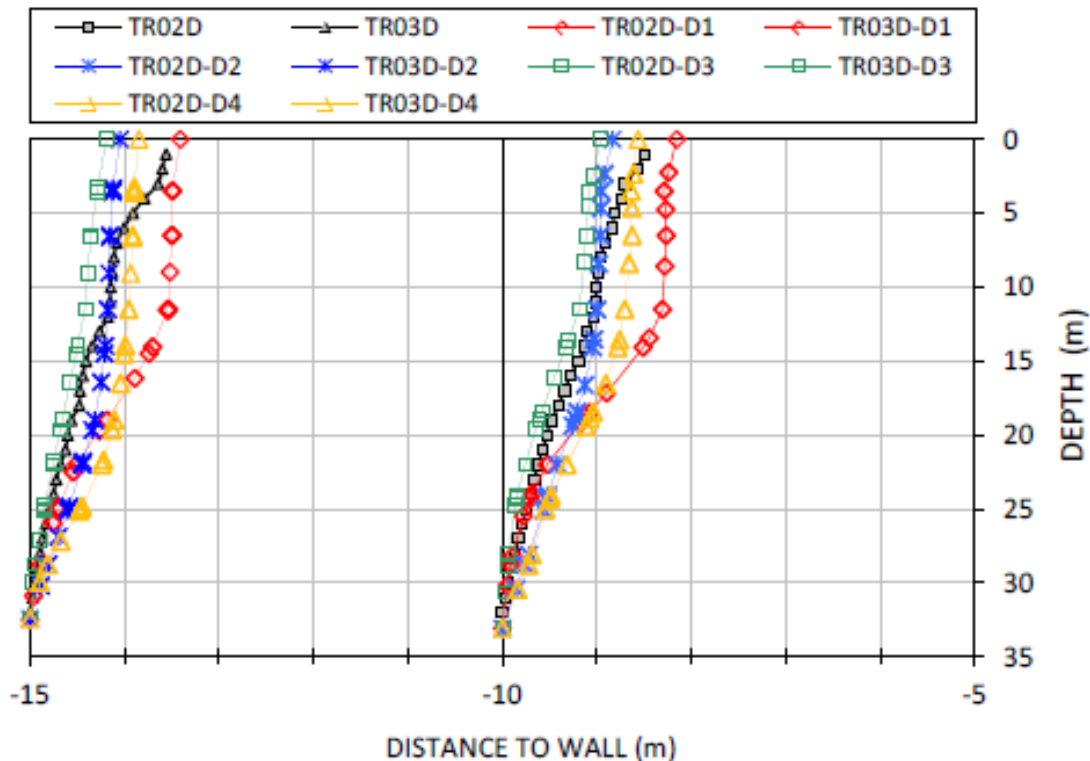
- K_0 pression de décollement SBPM
- **SBPM (+CH)** pour E_{ur}^{ref} et m
- Proportion conventionnelle (Vermeer, 2001) pour E_{50}^{ref} et E_{ur}^{ref}

Concepteur 4: "SDMT"



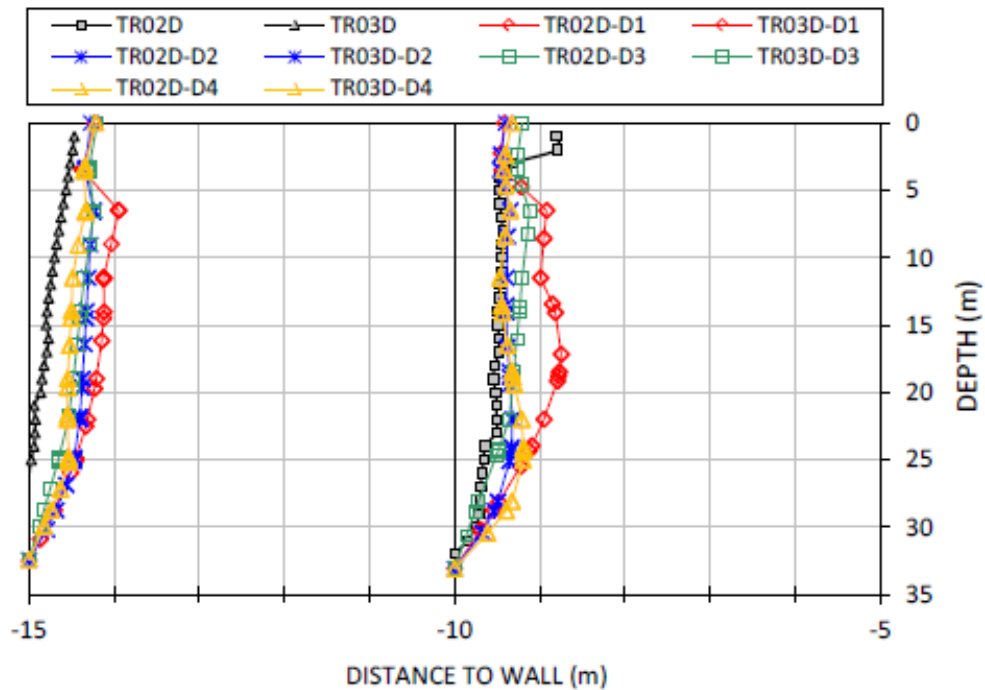
- K_0 des corrélations DMT
- **DMT** pour E_{oed}^{ref} et m
- Proportion conventionnelle (Vermeer, 2001) pour E_{50}^{ref} et E_{ur}^{ref}

Mouvements verticaux



- Les instrument plus proches a l'excavation ont été endommagés
- Mouvements magnifiée pour un facteur de 200; le tassement en surface est inférieur a 8 mm
- Concepteurs 2 (PMT) et 3 (SBPM) se portent mieux; concepteur 1 (Lab) pire

Mouvements horizontaux



- Mouvements magnifiée pour un facteur de 200; les déplacements sont inférieures à 6 mm
- Concepteurs 2 (PMT) et 4 (DMT) se portent mieux; concepteur 1 (Lab) pire

Commentaires

- Le pressiomètre, même Ménard, est très utile pour les problèmes en déformations
- Il 'est rare qu'on aie besoin des programmes de chargement plus complexes (pas pour calibrer les modèles couramment employés, e.g. HS ou HSS)
- L'autoforeur peut être remplacé avantageusement par des combinaisons PMT + géophysique
- ...mais aussi par des combinaisons DMT + géophysique

EXPERIENCE 3: DEPÓSITO SUR, MEXICO, 2022

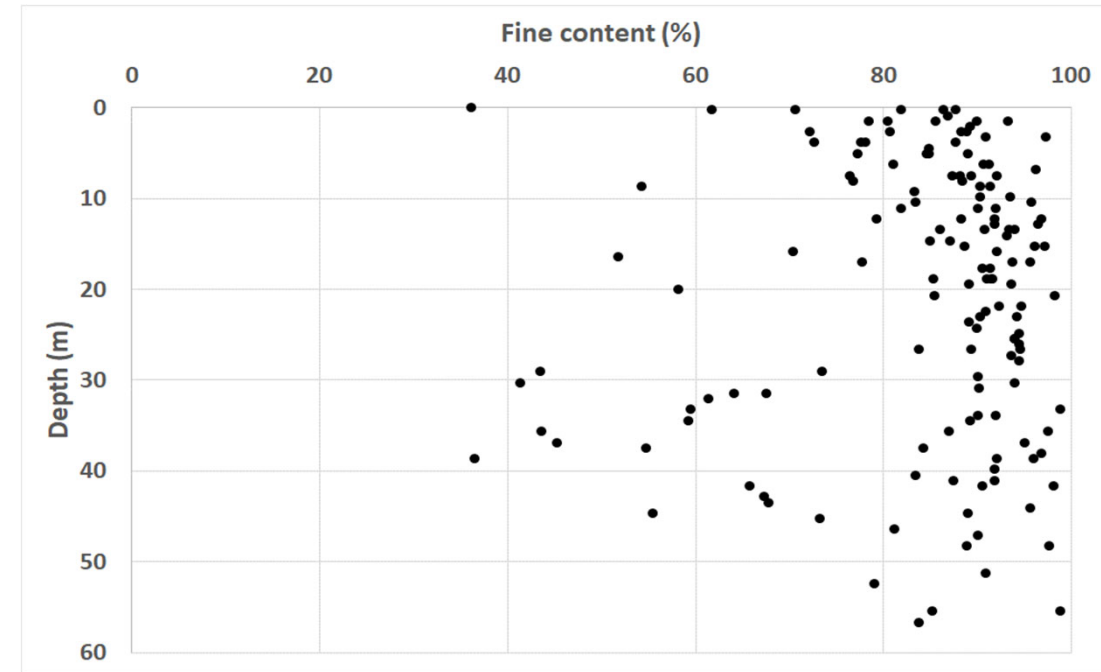
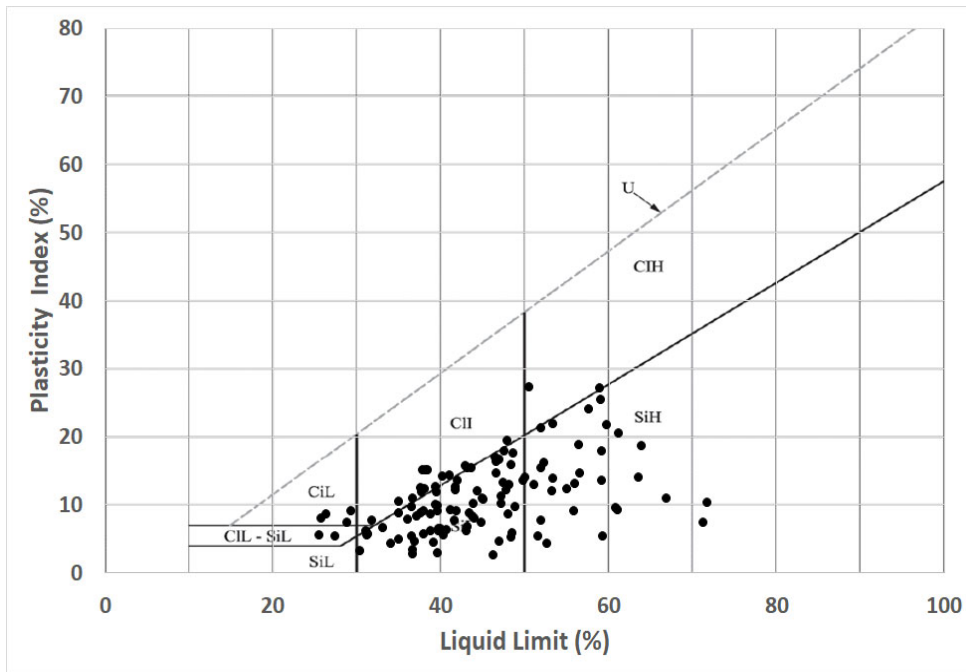


Deposito Sur

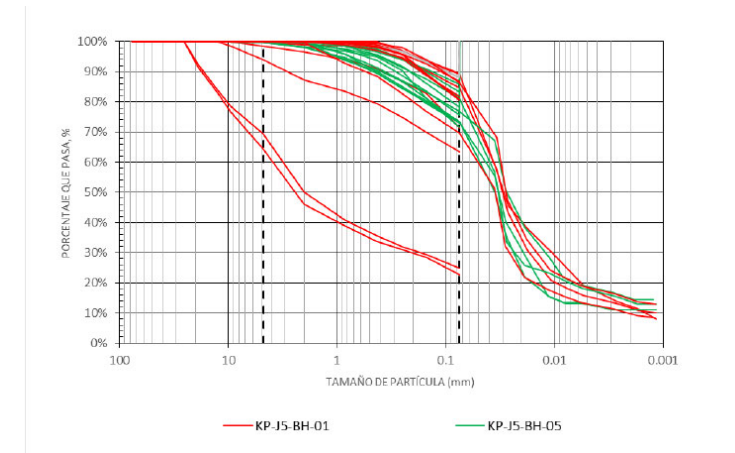


- Centre-nord du Mexique (très seche)
- Résidus métallurgiques (Pb-Zn)
- Pour le moment on a rempli les vallees laterales; mais on remplira tout
- Une très grand campagne de caracterization géotechnique (CPTu; Boreholes; PMT; lab; geophysics...)

“JAROSA”



- Limons argileux et sableux de moyenne plasticité
- Mais... qu'est ce que c'est cette « Jarosa »?



Jarosites

Table 1. Minerals of the alunite supergroup.

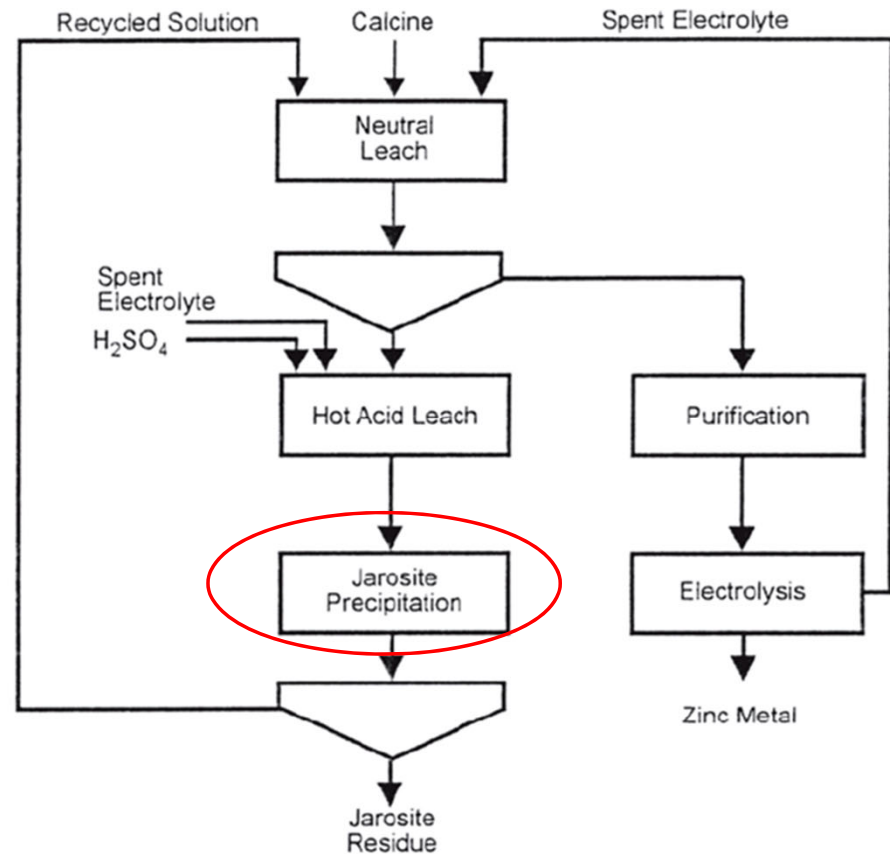
Alunite Family ($Al^{3+} > Fe^{3+}$)		Jarosite Family ($Fe^{3+} > Al^{3+}$)	
Alunite Group		<i>Jarosite Subgroup</i>	
<i>Alunite Subgroup</i>			
alunite	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	jarosite	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
natroalunite	$NaAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	natrojarosite	$NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
ammonioalunite	$(NH_4)Al_3(SO_4)_2(OH)_6$	ammoniojarosite	$(NH_4)Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$
schlossmacherite	$(H_3O,Ca)Al_3(SO_4)_2(OH)_6$	hydronium jarosite	$(H_3O)Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$
—		argentojarosite	$AgFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
—		dorallcharite	$TlFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
osarizawaite	$Pb(Al,Cu)_3(SO_4)_2(OH,H_2O)_6$	beaverite	$Pb(Fe,Cu)_3(SO_4)_2(OH)_6$
—		plumbojarosite	$PbFe_6(SO_4)_4(OH)_2$
minamiite	$(Na,Ca)_2Al_6(SO_4)_4(OH)_{12}$	—	
huangite	$CaAl_6(SO_4)_4(OH)_{12}$	—	
walthierite	$BaAl_6(SO_4)_4(OH)_{12}$	—	

Dutrizac, 2000

- Sulfates hydratées du Fer (+ des autres métaux...)
- Ils sont présents dans la nature (soit acides, ...), mais instables

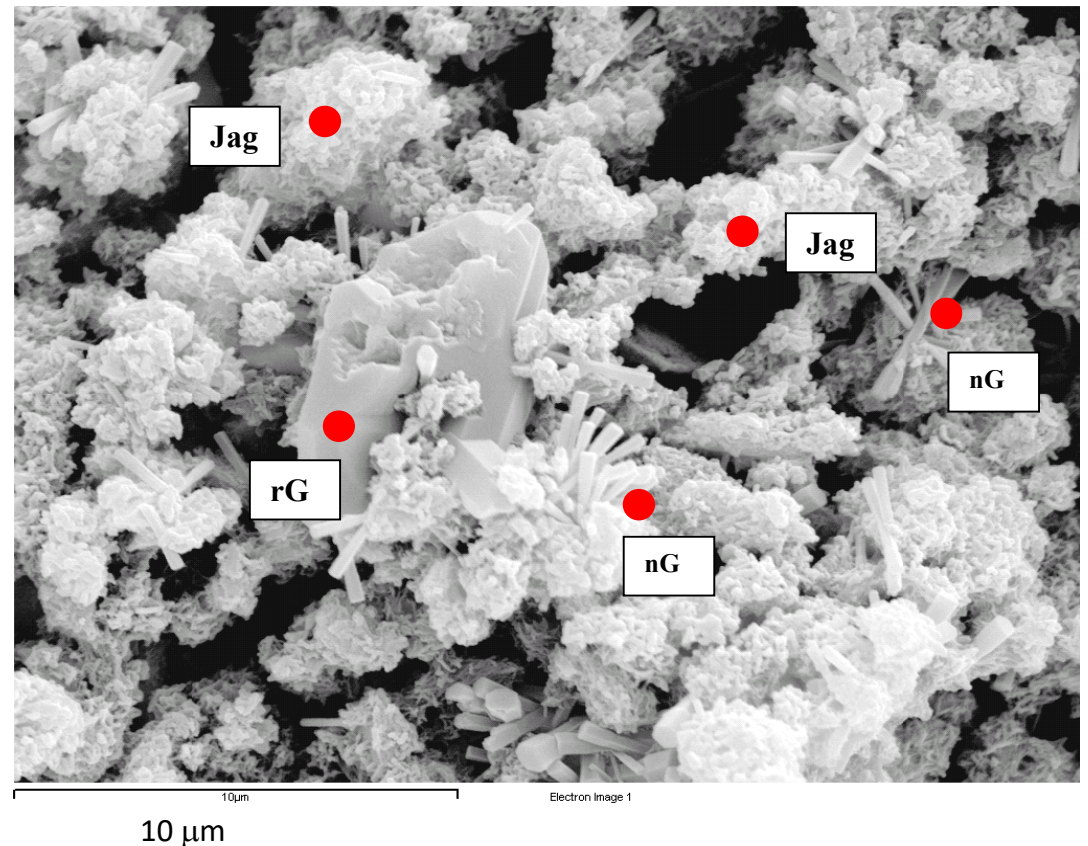
Jarosite dans la production électrolytique du Zinc

- Précipite les impuretés du fer
- Un procédé présent dans 80% de la production mondiale du Zinc
 - A faveur:
 - on récupère bien plus du Zn
 - En contre:
 - résidu volumineux (50-80% production Zn);
 - instable (lixiviée riche en métaux pesantes)



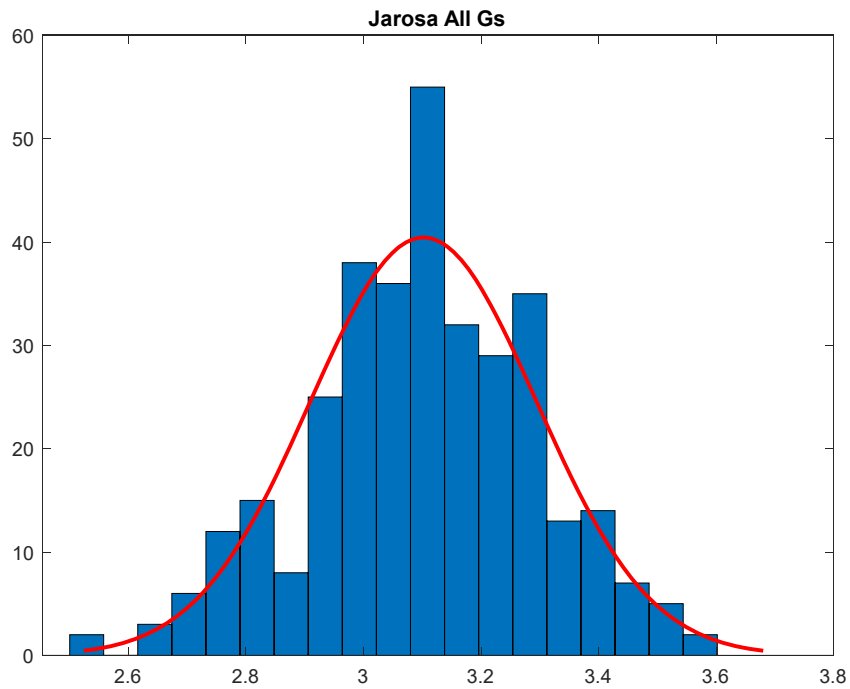
Jarosa: du jarosite stabilisée

- **Jarosa** = jarosite ammoniacale stabilisée avec du chaux
- La recette
 - 17% w/w “Estabilical 70/30”
 - Estabilical 70/30
 - 70% CaCO_3
 - 30% $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Chaux et jarosite réagissent pour former les produits de stabilisation



Arroyo et al. 2006; JAROFIX = PORTLAND + SODIUM JAROSITE

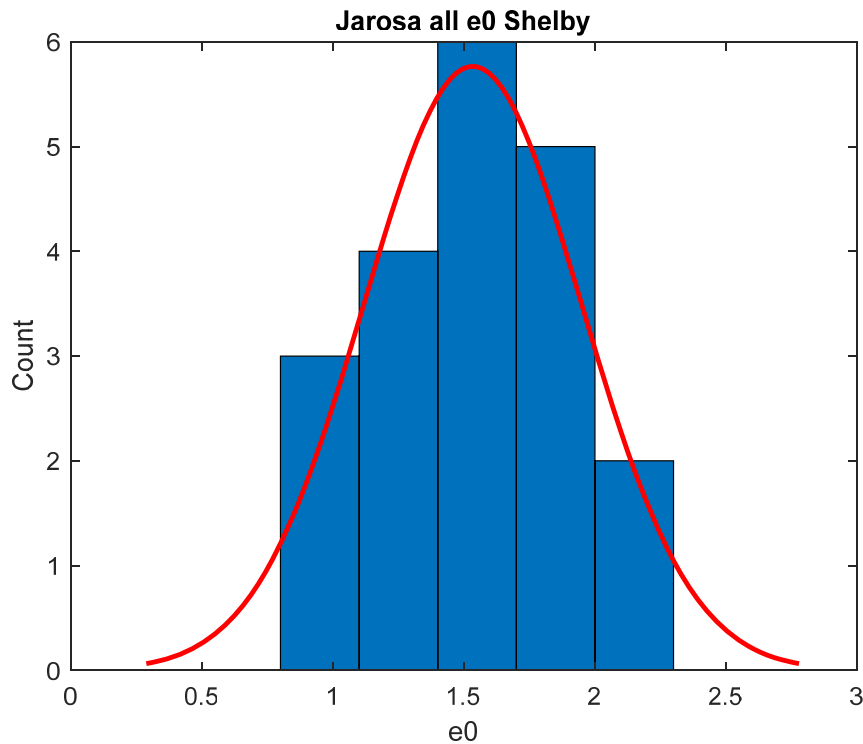
Jarosa: poids spécifique



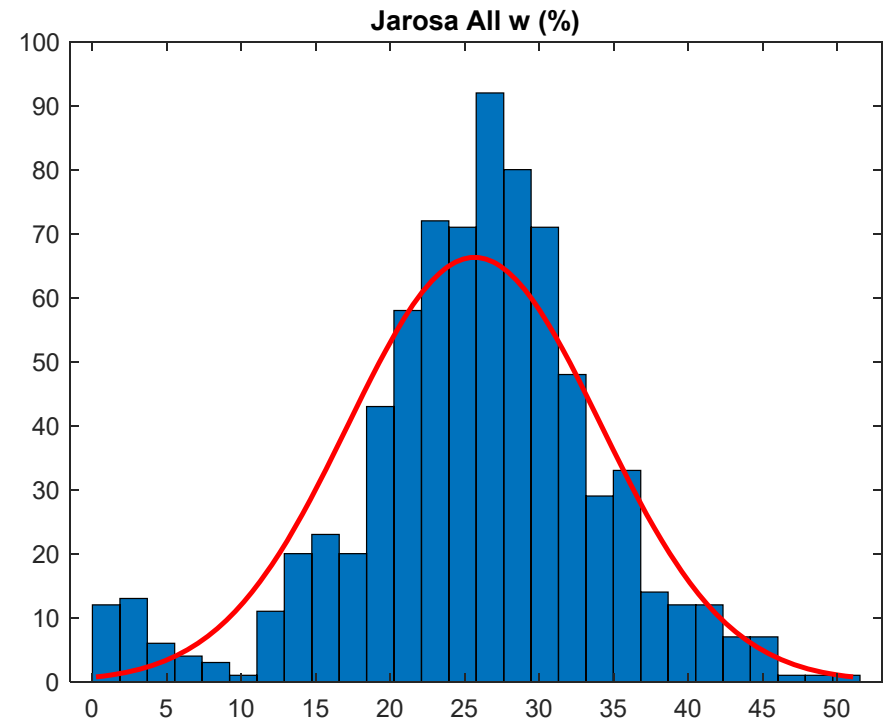
- Precipite du fer

average	3.10
stdv	0.19
max	3.60
min	2.53
cv	0.06
count	337

Jarosa: index de vides et teneur en eau



- Tres poreuse
- Shelby, block



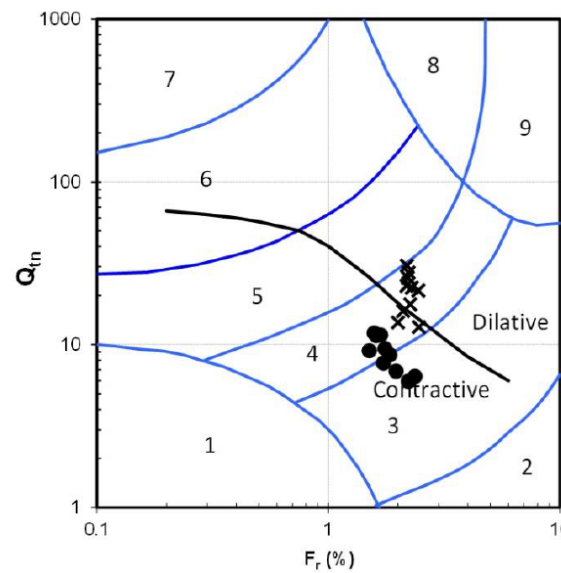
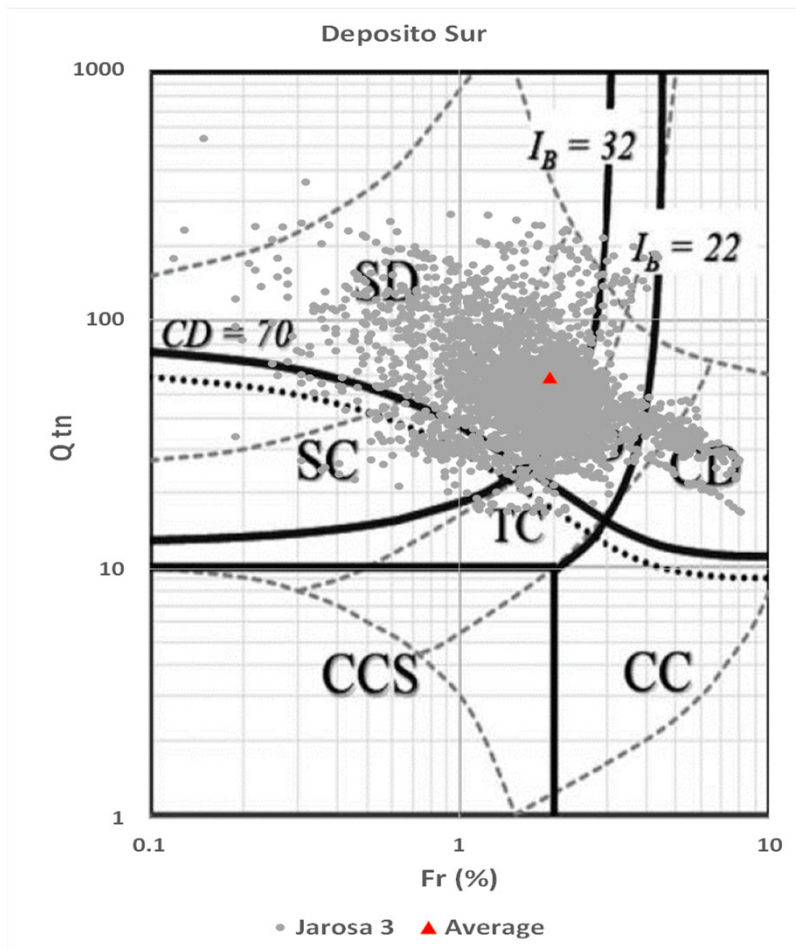
- Filtré en plante jusqu'au 50% w_n
- Dessiccation ultérieure a cause de l'hydratation du chaux

Jarosa: niveau de saturation

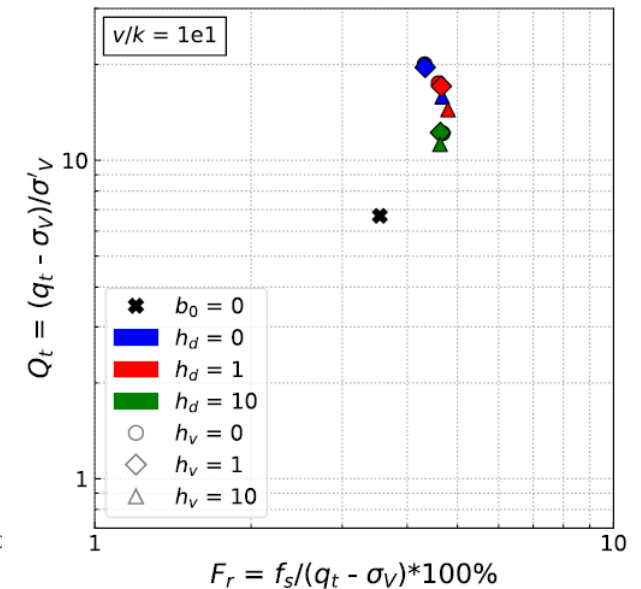


- Estimation centrale $S_r \approx 55\%$
- Range 80% - 40%

Jarosa: les deboires du CPTu



Reid & Russell, 2018
Unsaturated/saturated gold tailings

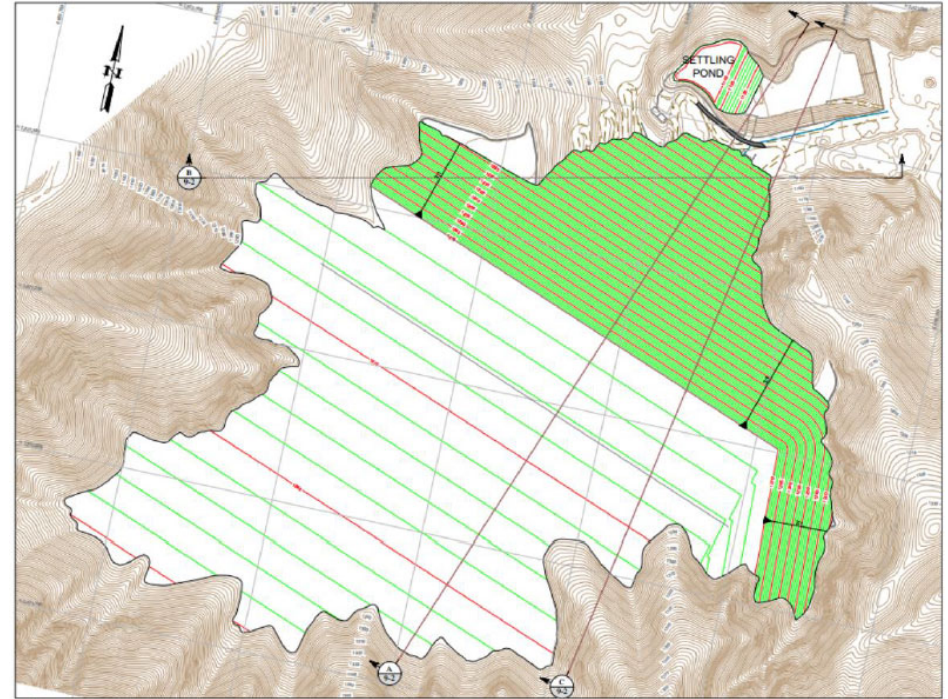


Hauser & Schweiger 2022
Bonded CASM, drained

- Le CPTu dise: la jarosa est un matériel sableux et dilatante
- Est cela vraie?

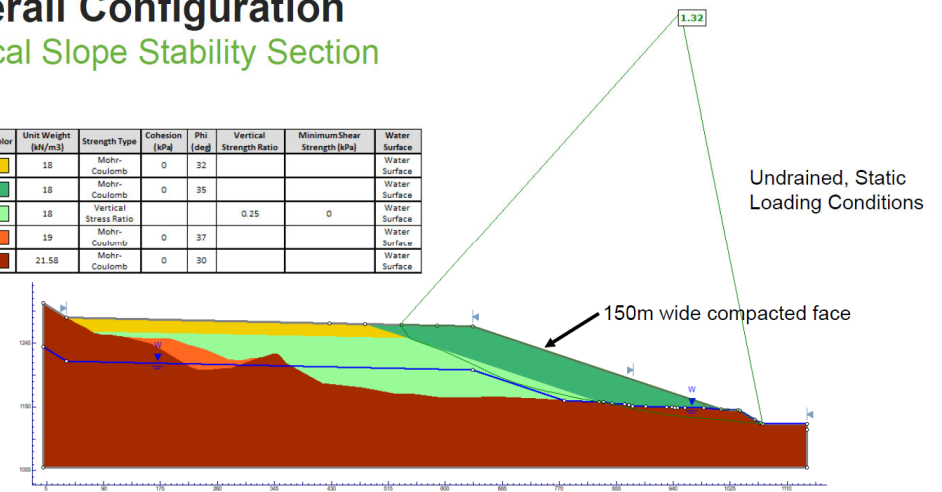
Problématique

- Le dépôt doit monter jusqu'au 200 m d'hauteur (première phase)
- Dans quelle profondeur peut-il devenir saturé?
- Le paramètre clé c'est la pression de préconsolidation apparente
- Peut-on l'évaluer avec du CPT?

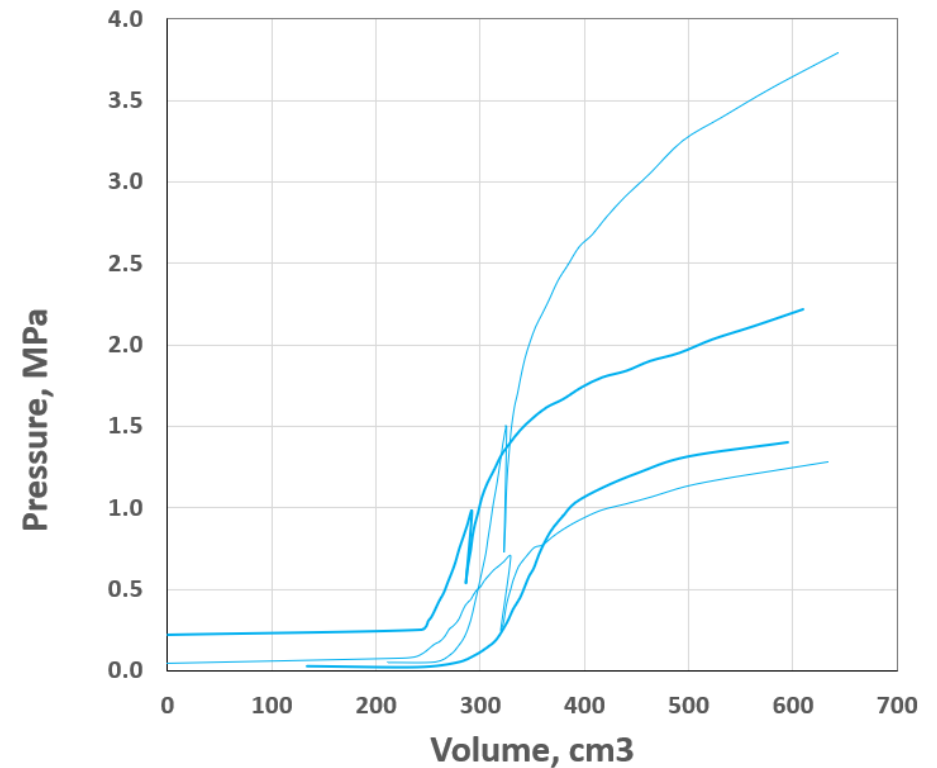
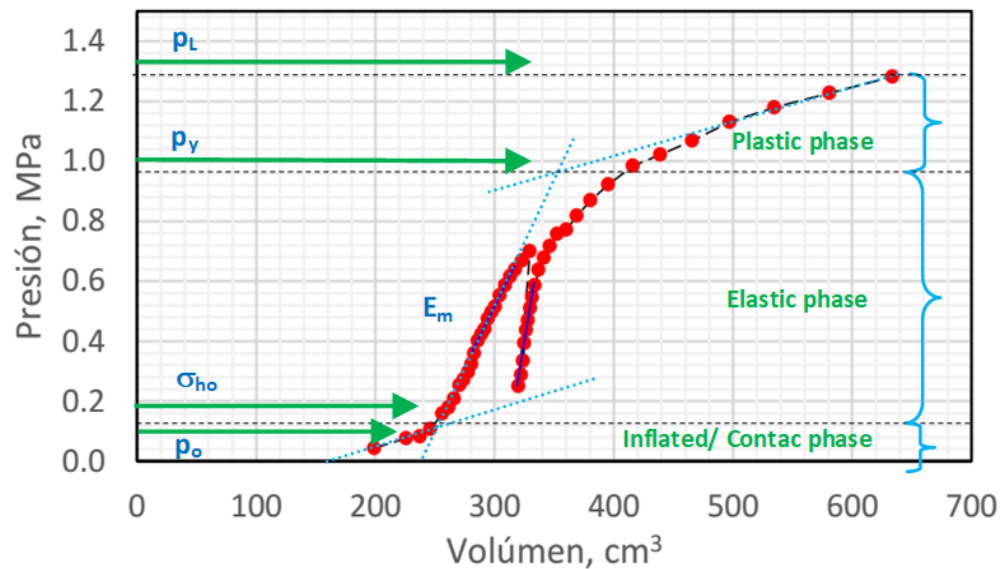


Overall Configuration
Critical Slope Stability Section

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Vertical Strength Ratio	Minimum Shear Strength (kPa)	Water Surface
Red Jarosita - near MC	Yellow	18	Mohr-Coulomb	0	32			Water Surface
Red Jarosita - compacted Face	Green	18	Mohr-Coulomb	0	35			Water Surface
Red Jarosita - 0.25	Light Green	18	Vertical Stress Ratio			0.25	0	Water Surface
Iscoria	Orange	19	Mohr-Coulomb	0	37			Water Surface
Fluvium	Brown	21.58	Mohr-Coulomb	0	30			Water Surface



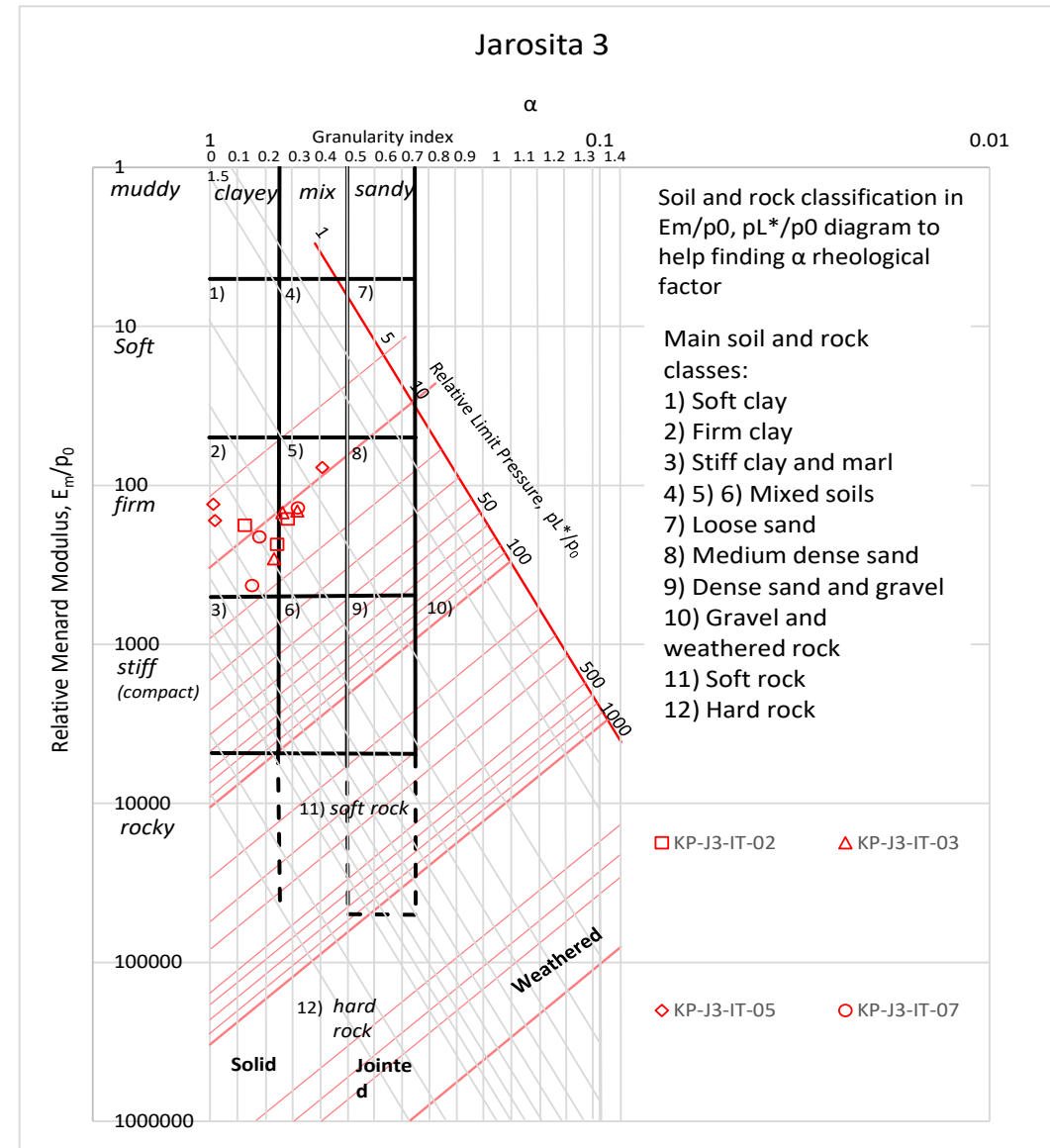
Quelq'un porte sur place un pressiometre



- 45 essais, ASTM + un cycle
- Sondage sèche
- Tarière pour l'installation

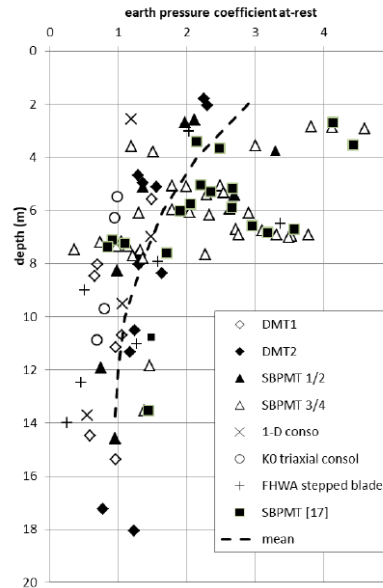
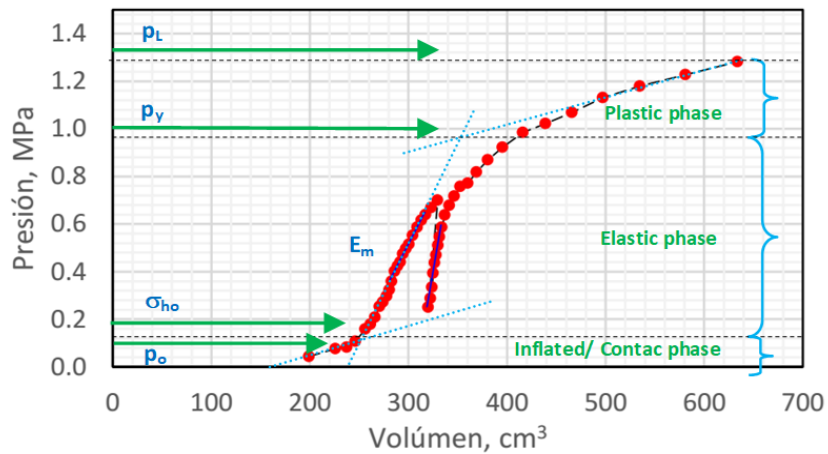
Jarosa: classification au PMT

- Pressiorama (Baud & Gambin)
- Jarosa classifie comme
 - Limon-argileux
 - “Firme” ($q_c \approx 3-6 \text{ Mpa}$; $s_u \approx 100-200 \text{ kPa}$)

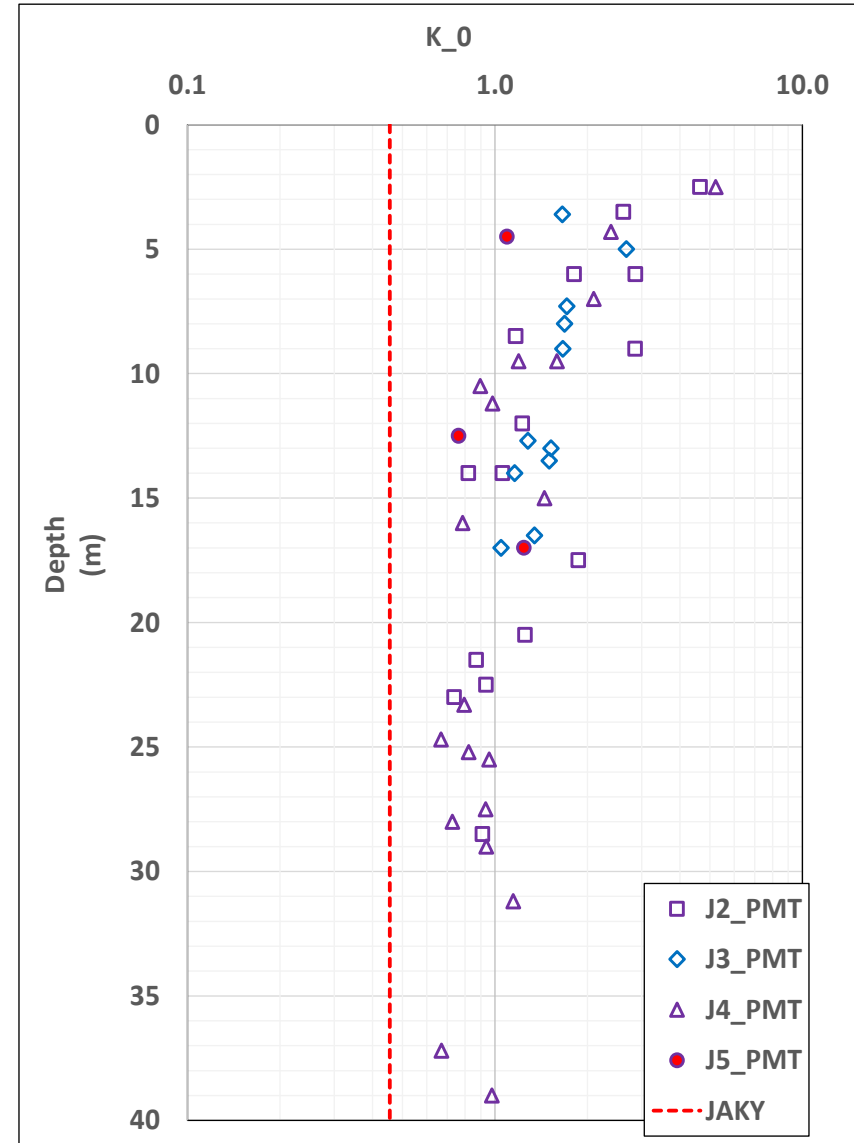


K0

- Tension horizontale du pont d'inflexion (Briaud)
- Profile caractéristique de terrain surconsolidée

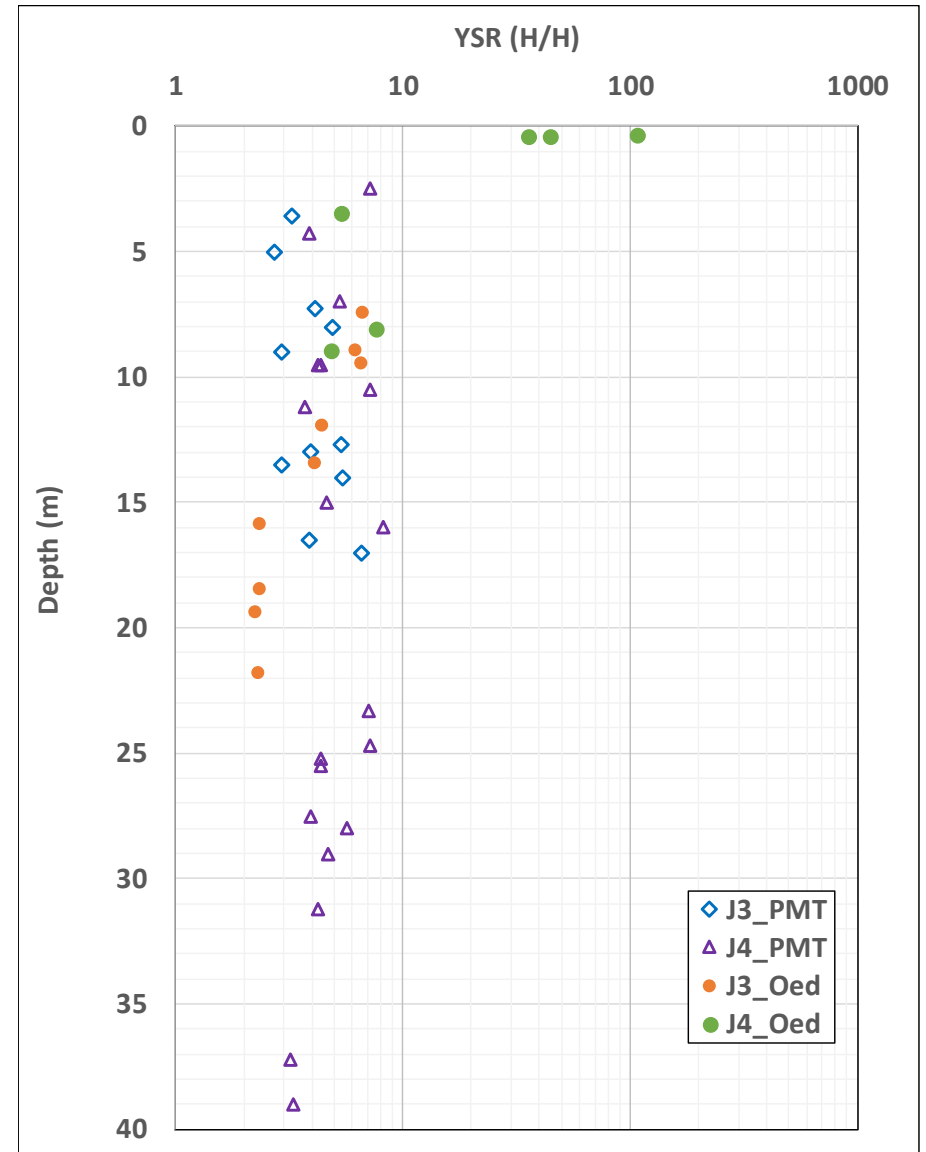
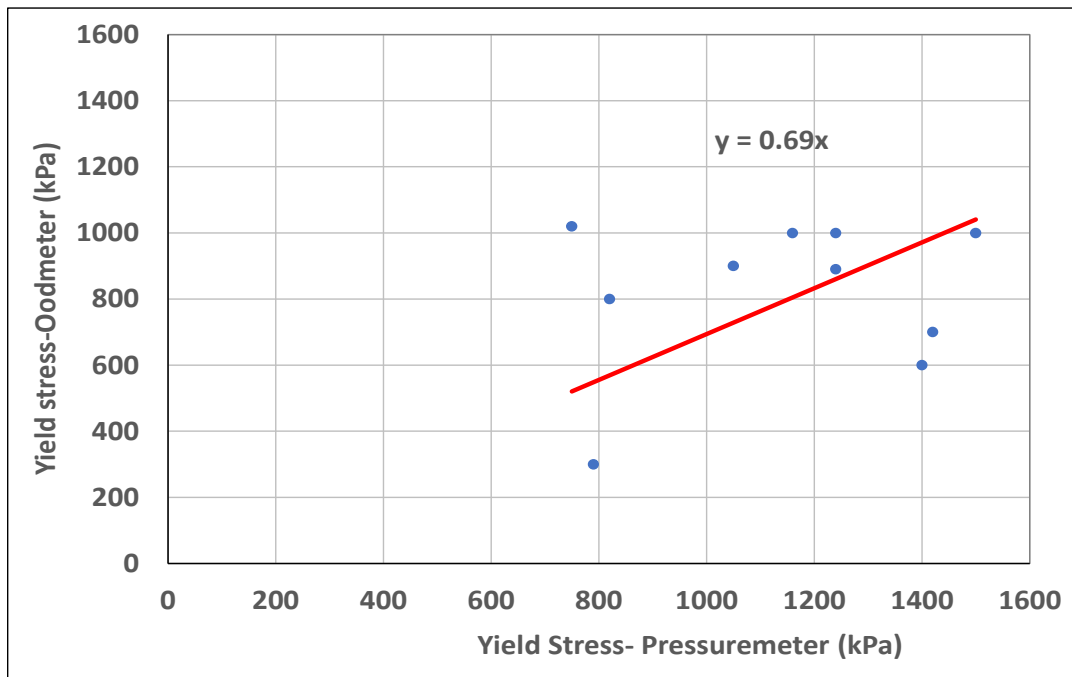


Houston clay (Benoit et al 2022)



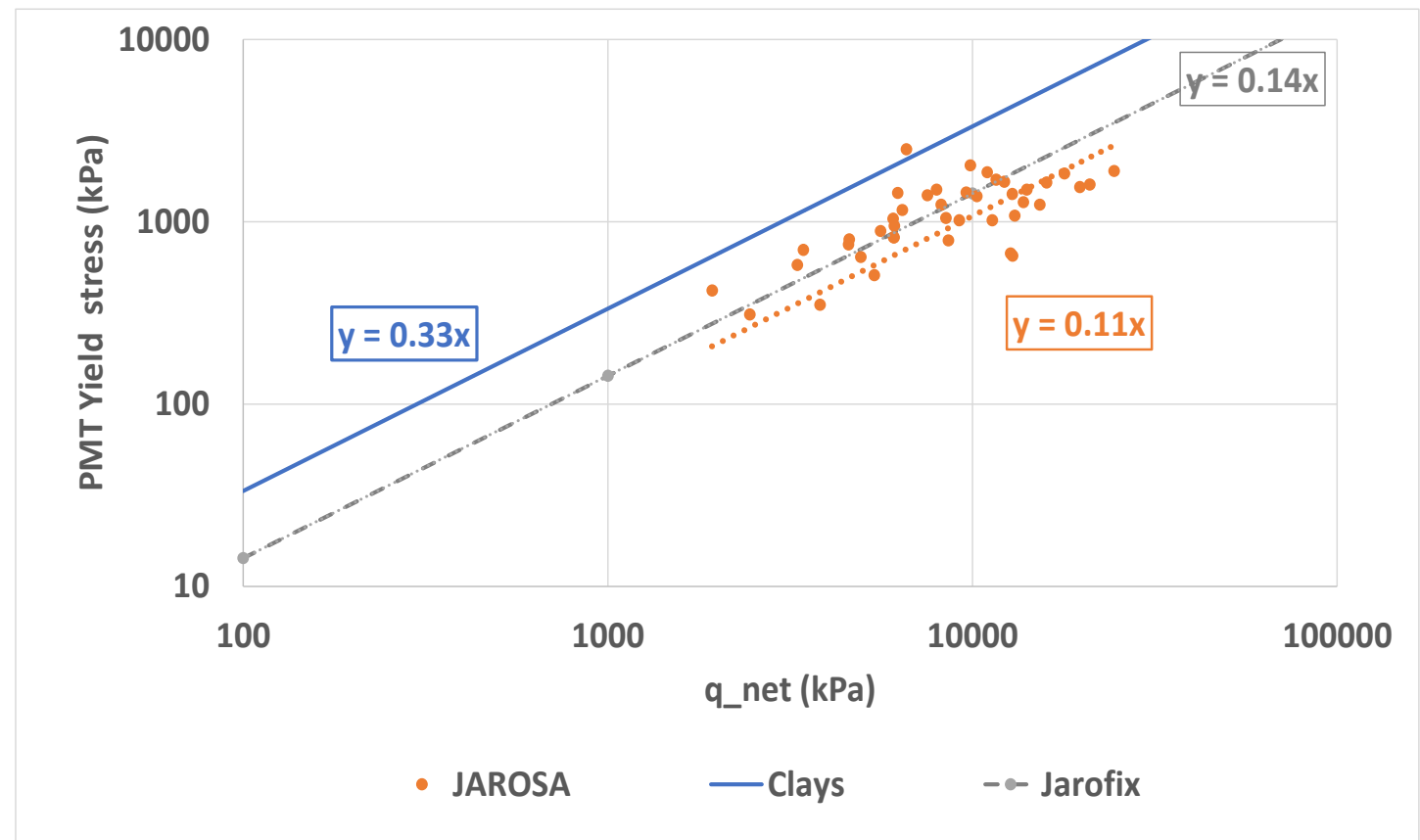
Pression de « preconsolidation »

- Assimile a la pression de fluage
- Semblable a celle du edometre
- Mais, en comparant des sondages parallèles les valeurs saturés du lab sont inferierures de 30%



Recalibration du CPTu (grace au PMT)

$$\sigma'_p = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{\sigma t}}$$



Commentaires

- Le pressiomètre est un tout-terrain, ce qu'est avantageux quand on a en face des matériaux inusuels
- Une bonne exécution de l'essai permet d'aller très loin, même avec des protocoles simples
- Les dépôts de résidus miniers sont en train de devenir plus sèches / compactés: le pressiomètre a un rôle grandissante à jouer dans ces cas

- ▶ Le pressiomètre face des compétiteurs, mais a des atouts très importantes
- ▶ Le pressiomètre a eu toujours deux faces: théorique/déductive et empirique/appliquée. Cela est bien un avantage, mais aussi présente des difficultés de communication
- ▶ La formation des ingénieurs et des operateurs est fondamentale. Il faut la concevoir a l'international
- ▶ ARSCOP semble venu au moment précis

Merci de votre attention

- ▶ Arroyo, M, Martínez, E. Viles, K, Rodríguez, H., Vargas, C.O., & Salgado, D.E. (2022) Characterizing a filtered stabilized metallurgical residue with PMT, Tailings & Mining Waste 2022
- ▶ Sau, N., Arroyo, M y Gens, A. (2012). Site characterization alternatives for numerical models of a deep excavation. Fourth International Conference on Site Characterization, ISC'4. Recife, Brasil, September 2012 1169-1178
- ▶ Arroyo, M (2003) "Proyecto de pilotes excavados en margas: un caso práctico" Ingeniería Civil, 132, 61-68