

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

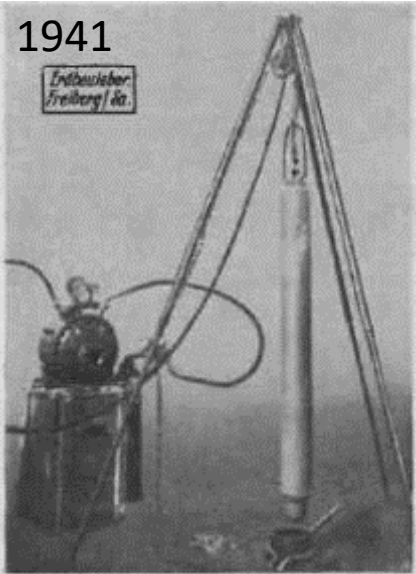


Synthèse du chapitre 3

Développement des procédures d'essais et d'interprétation

1. Introduction
2. Historique rapide (sous l'angle des innovations)
3. Les nouveaux besoins
4. Les différents protocoles
5. Discussions
6. Avancement des recommandations
7. Points divers

1941



1956



- 1934 Premiers appareillages d'essais d'expansion par Kögler,
- 1955 Ménard propose une nouvelle version le "pressiomètre TM"
- 1975 nouvelle génération de contrôleur pression volume et de sonde dite G
- 1978 Mort de Louis Ménard
- 1984 Apagéo et 1986 Geomatech sont créés
- 1986 premiers systèmes d'acquisitions dans le CPV
- 1992 enregistrement obligatoire et logiciels de dépouillement
- 2009 développement d'une nouvelle génération de pressiomètre contrôlé par ordinateur

et au Japan, Oyo propose le LLT-M et en Amérique du Nord Rocktest le Texam

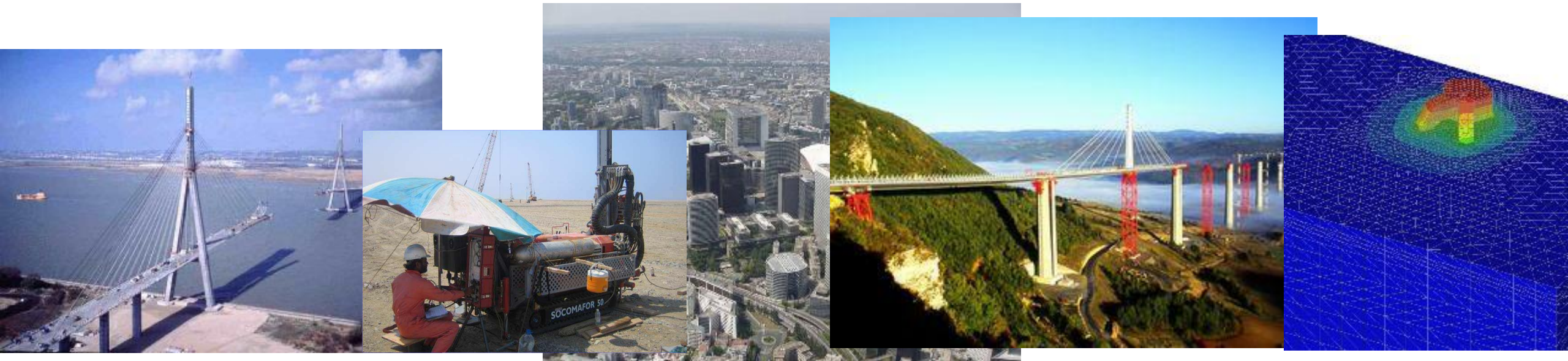


3 grands objectifs

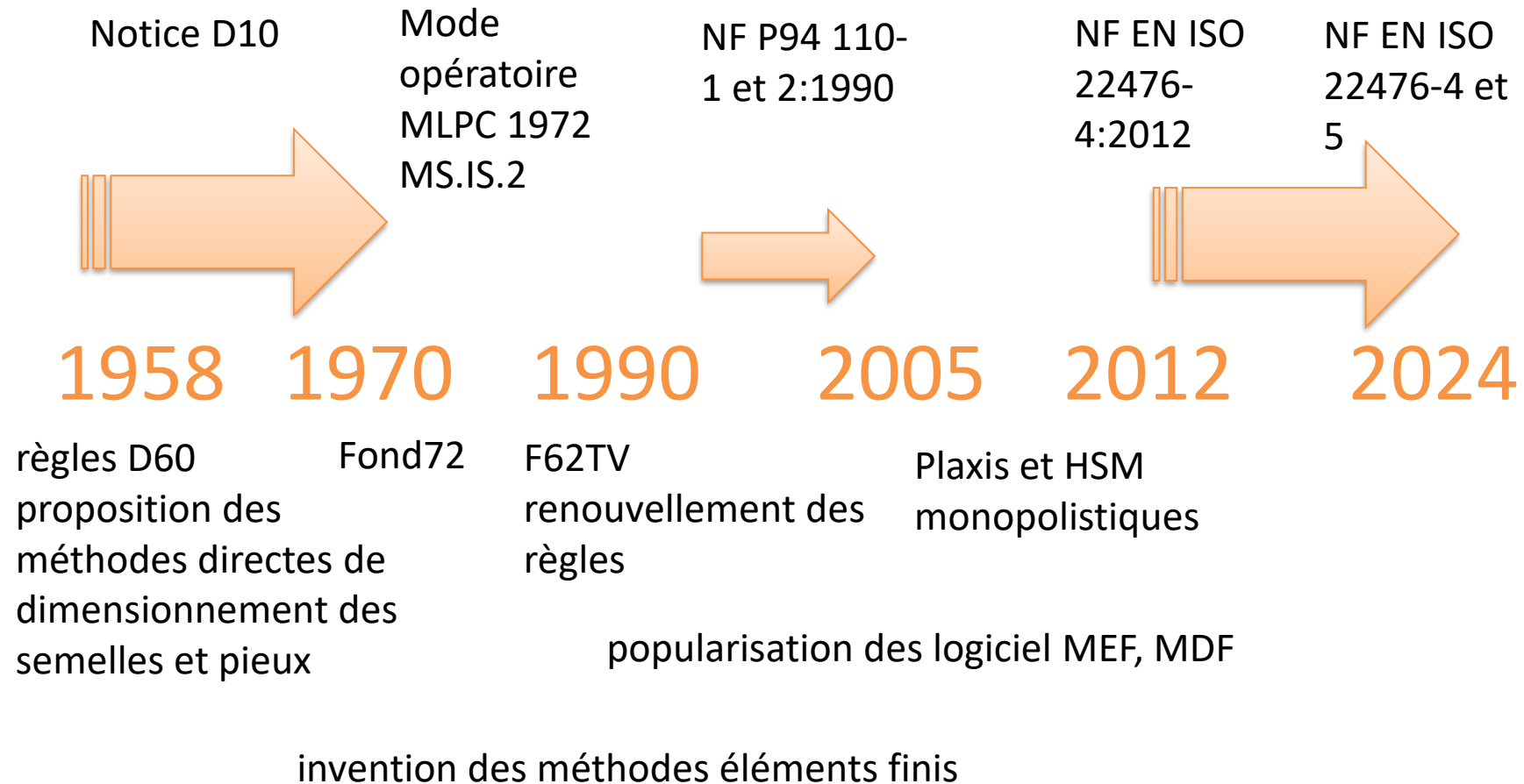
Pérenniser la pratique française

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'étranger

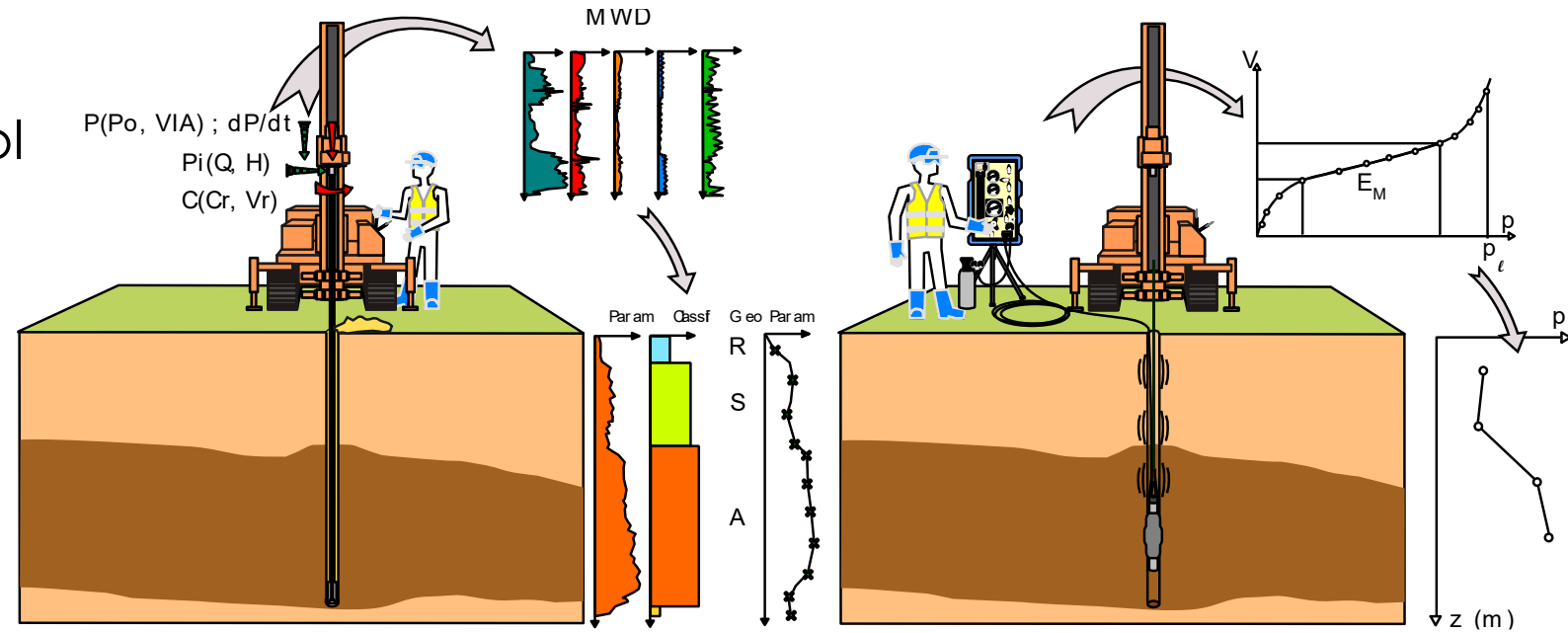


des périodes intenses et des périodes de latences

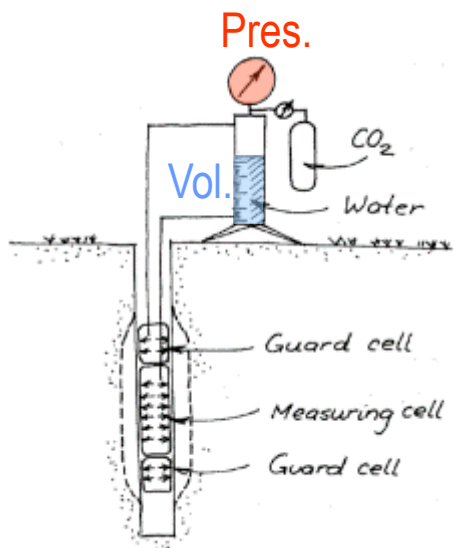


- ▶ Un forage
 - ▶ Un matériel
 - ▶ Un protocole
 - ▶ Une interprétation des courbes
 - ▶ Des méthodes directes
- et la mesure de la rigidité du sol

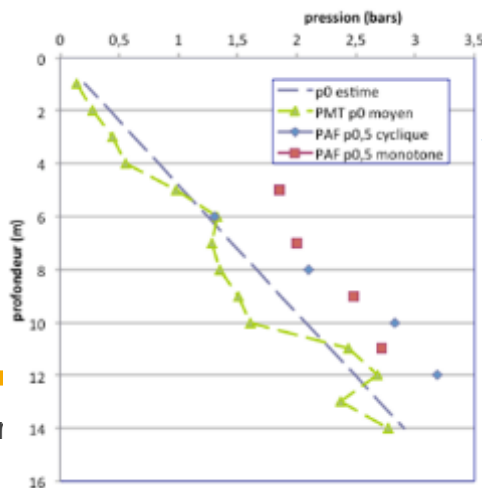
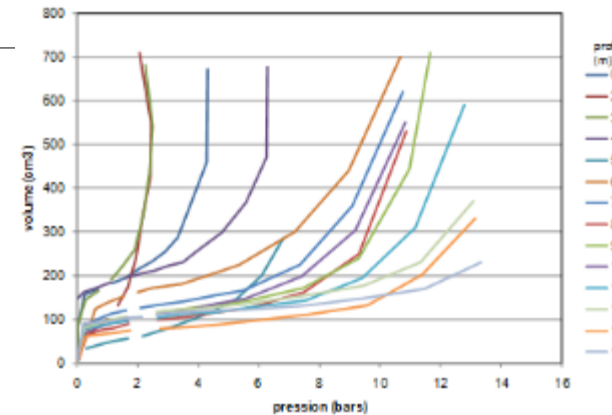
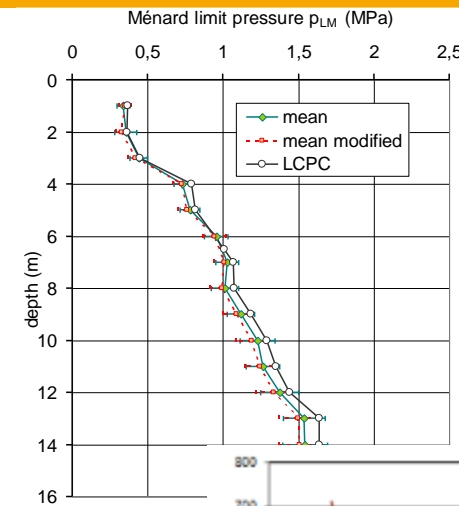
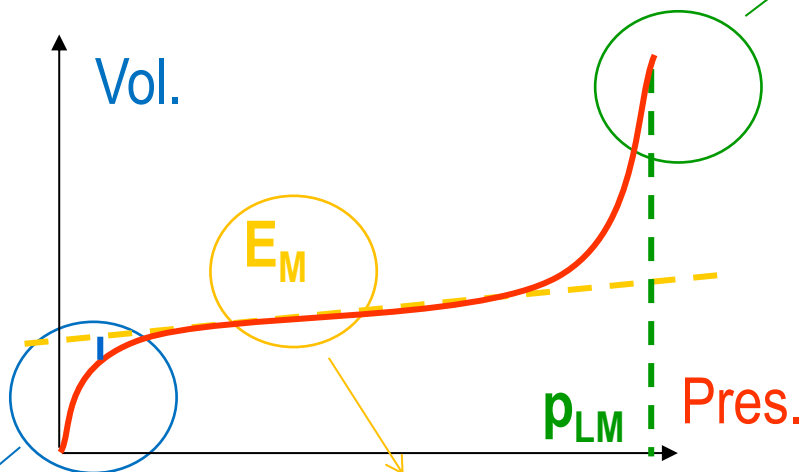
- un outil de forage
- une sonde (Ø60, 74, etc.)
- un contrôleur pression-volume
- un programme de chargement



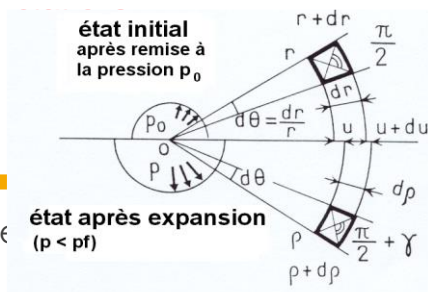
► Les paramètres dérivés



Menard limit pressure
 Menard E_M or shear G modulus
 Horizontal stress at rest



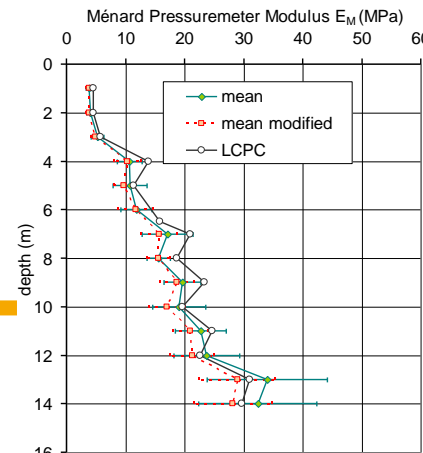
$$E_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left[V_s + \left(\frac{V_2 + V_1}{2} \right) \right] \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)}$$



$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} = -\frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)\sigma'_\theta - \nu\sigma'_r]$$

$$u(r) = \frac{1+\nu}{E} (p - p_0) \frac{r_o^2}{r}$$

$$u(r_o) = \frac{1+\nu}{E} (p - p_0) r_o$$



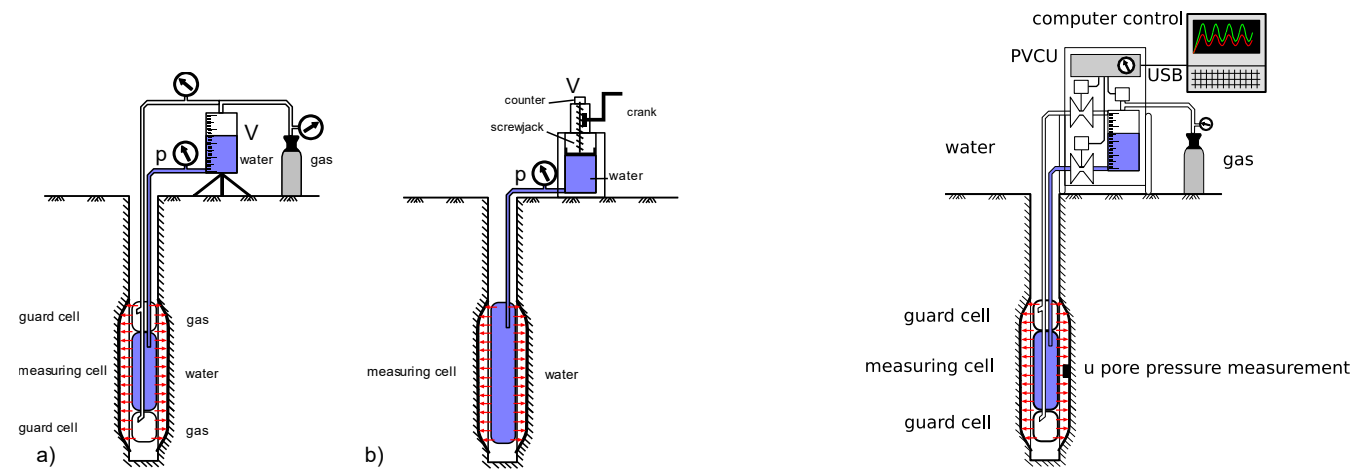
► Les travaux d'ARSCOP et leurs retombées

- essais croisés (Cran, Messanges, Plancoet, etc.)
- développement de matériels (automatisation, capteurs, etc.)
- les avancées au niveau des normes ISO (nouveaux protocoles permis, etc.)

► Appareillage

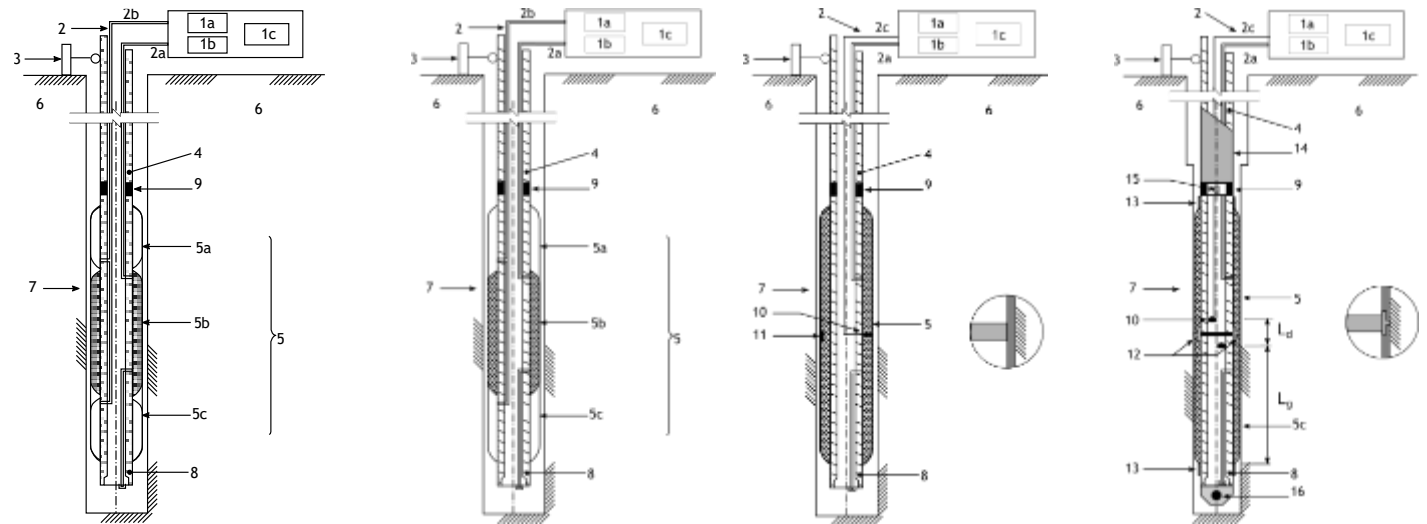
- contrôleur pression volume

c.f. présentation de
D.Brechot-L. Daré

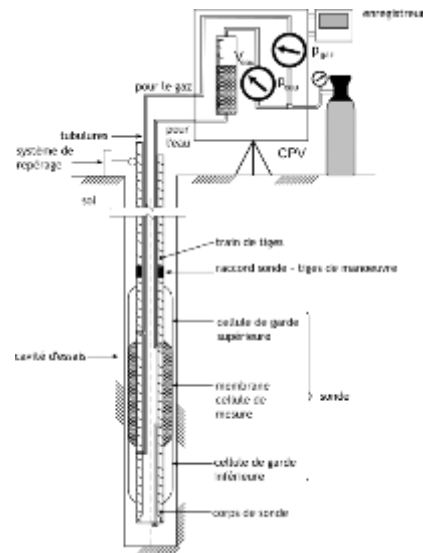


- sonde

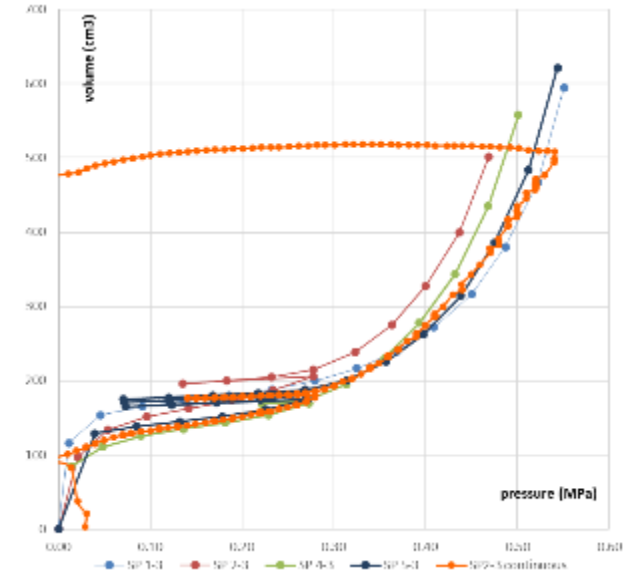
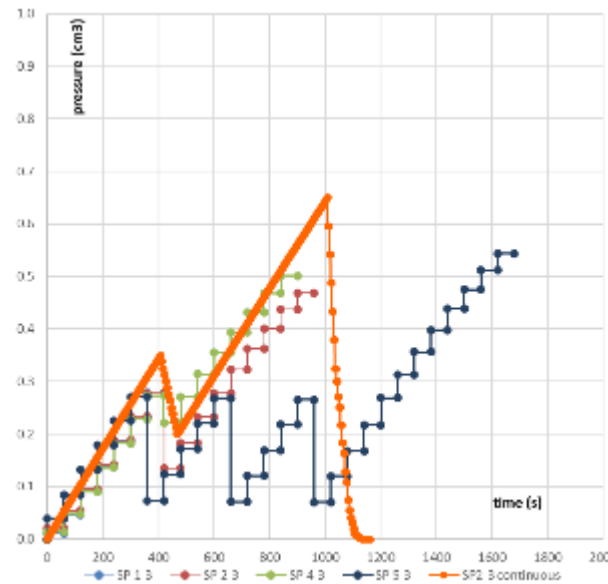
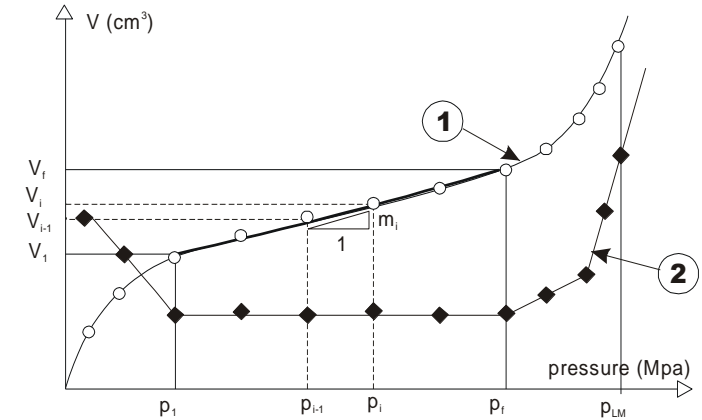
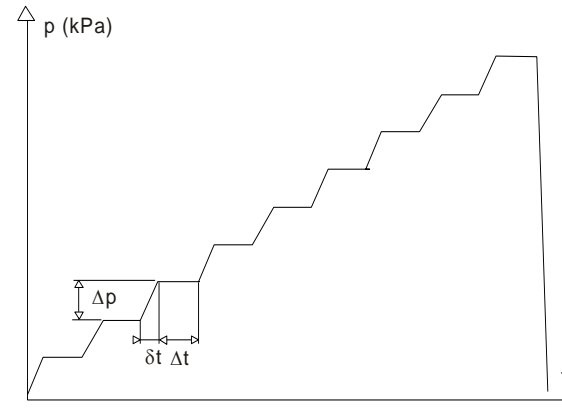
- gaine souple
- gaine souple avec protection
- tri ou monocellulaire



- Mode opératoire
 - protocole Ménard

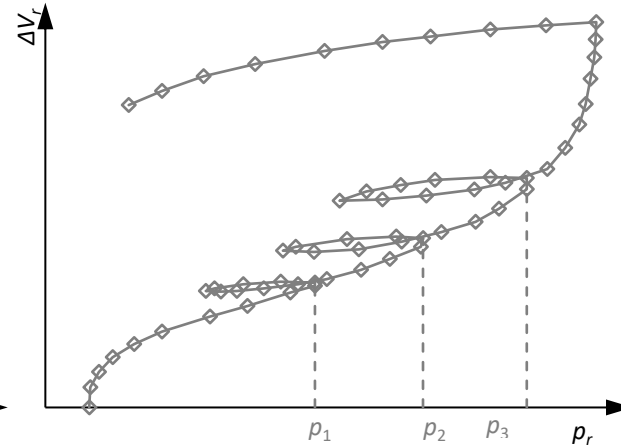
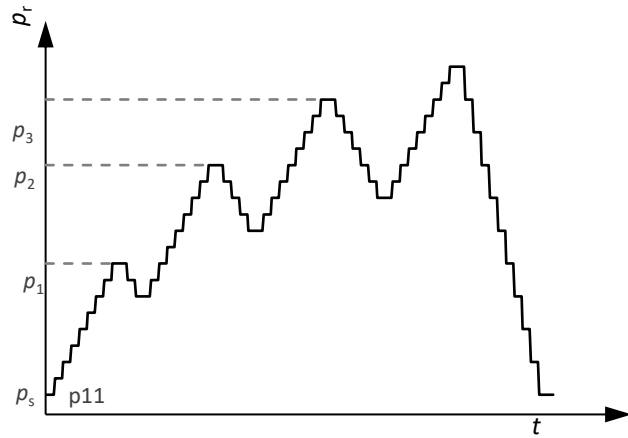


protocole robuste et éprouvé



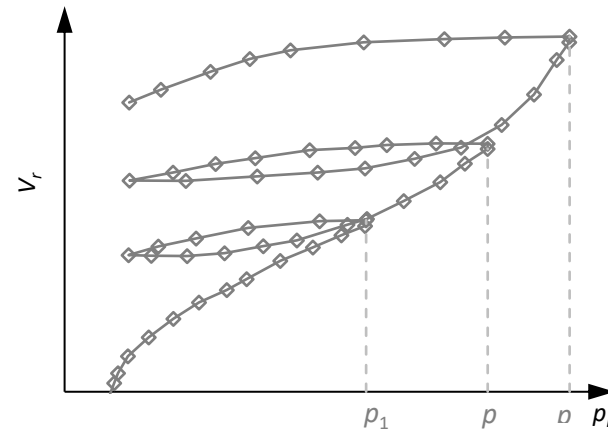
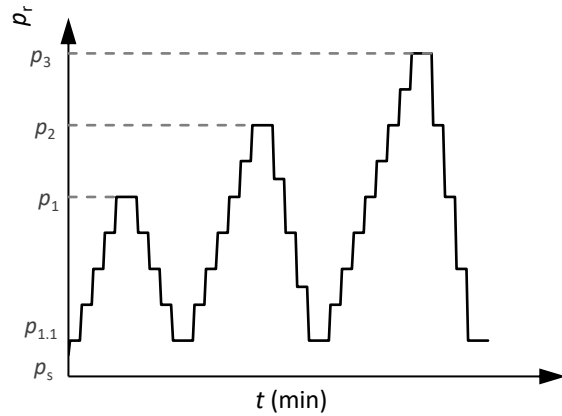
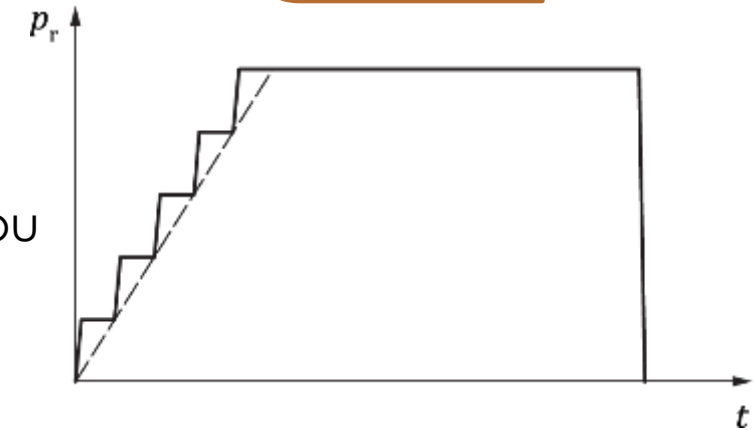
► Protocoles ouverts

- avec boucles

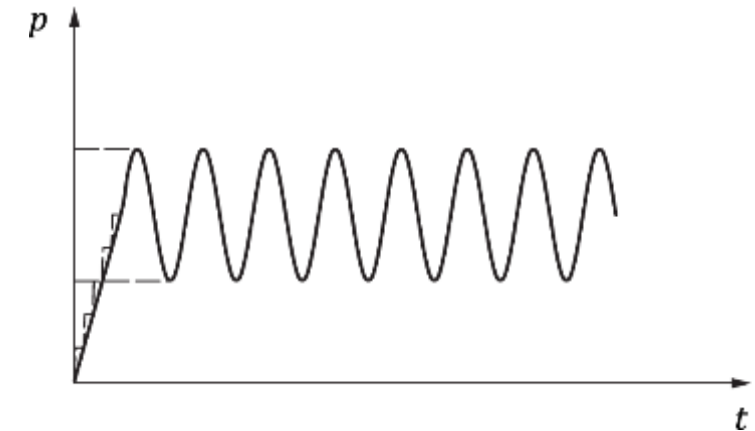


voir aussi présentation de A. Lopes

avec palier de volume ou pression constante

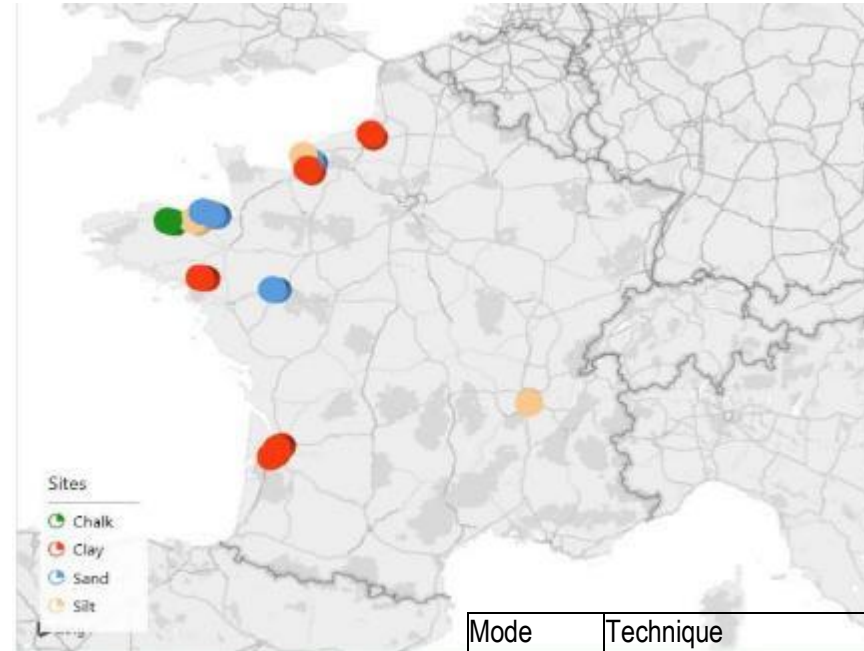


avec cycles



- ▶ Démarche partagées,
 - quelques difficultés

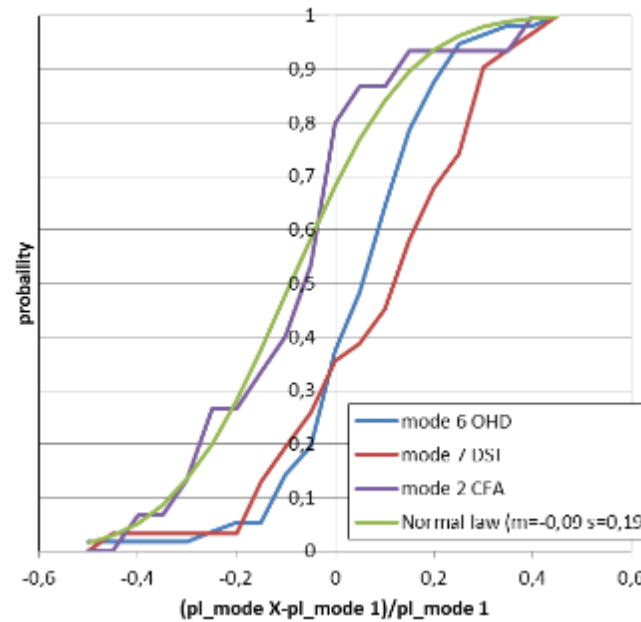
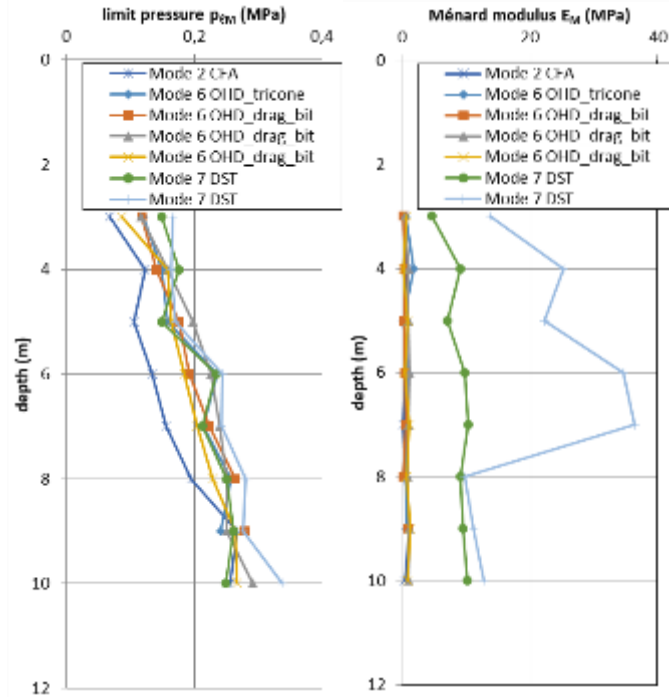
		Ground classification												
		fine soils			silts		sand			gravel			rock	
		1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2
open hole	hand auger	-	+		-	+	-	+						
	hand auger mud	+	+		+	+	+	+						
	continuous flight auger	-	0	+	-	+	-	+	+	0	0	+		
	drag bit	-	0	+	0	0	0	+	+	0	0	+	+	+
	sampler	-	-	+	-	-	-						+	+
	rotary percussion	-	-	0	-	0	-	0	+	0	0	+	+	+
	hammered thick tube	-	-	0	-	0	-	0	+	0			+	
	vibro driven sampler	-	-	0	-	0	-	0	+	0			+	
full disp.	driven slotted tube	-	-	-	0	-	-	0	0	0	0	0		
	vibro driven slotted tube	-	-	-	0	-	-	0	0	0	0	0	+	
tubing	self-boring probe	+	+		+	0	+							
	slotted tube with inside drilling tool	-	-	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	
- not recommended		1 soft			1 below		1 loose below			1				
+ recommended		2 medium			Water		Water Table			weathere				
o Permitted		3 stiff			Table		2 medium			d				
					2 dry		3 dense			2 sound				



Mode	Technique	Acronym	Diam
Mode 1	Hand Auger, meter by meter	HA	60
Mode 2	Continuous flight auger, meter by meter	CFA	63
Mode 3	Continuous flight auger, in a single pass	CFA_u	63
Mode 4	Rotary percussion, meter by meter	ROTOP	
Mode 5	Desagregating tool, in a single pass	OHD_u	63,5
Mode 6	Desagregating tool meter by meter	OHD	63,5
Mode 7	Driven slotted tube	DST	63
Mode 8	vibro-driven slotted tube	VDT	63
Mode 9	Hammered thick tube	OS-TKWH	63
Mode 10	Core drilling	CD	

► Etude de l'influence du mode de forage

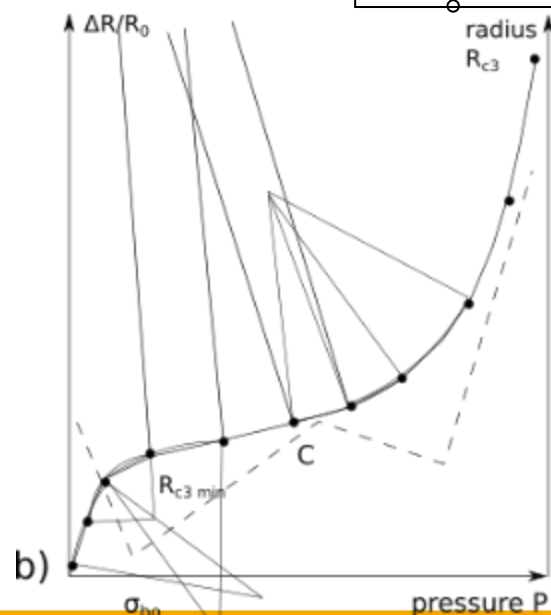
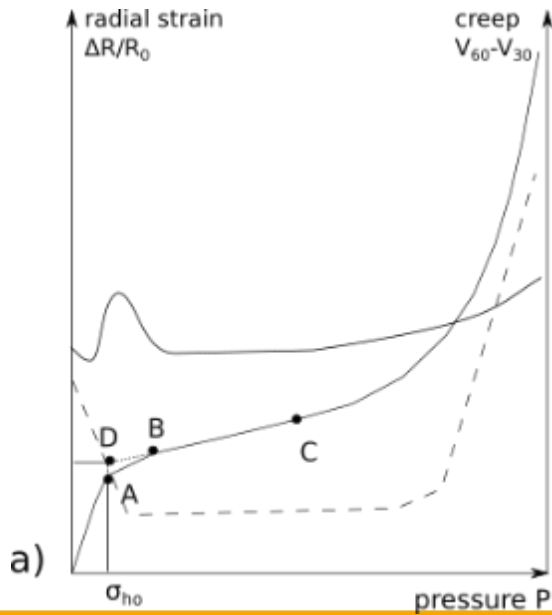
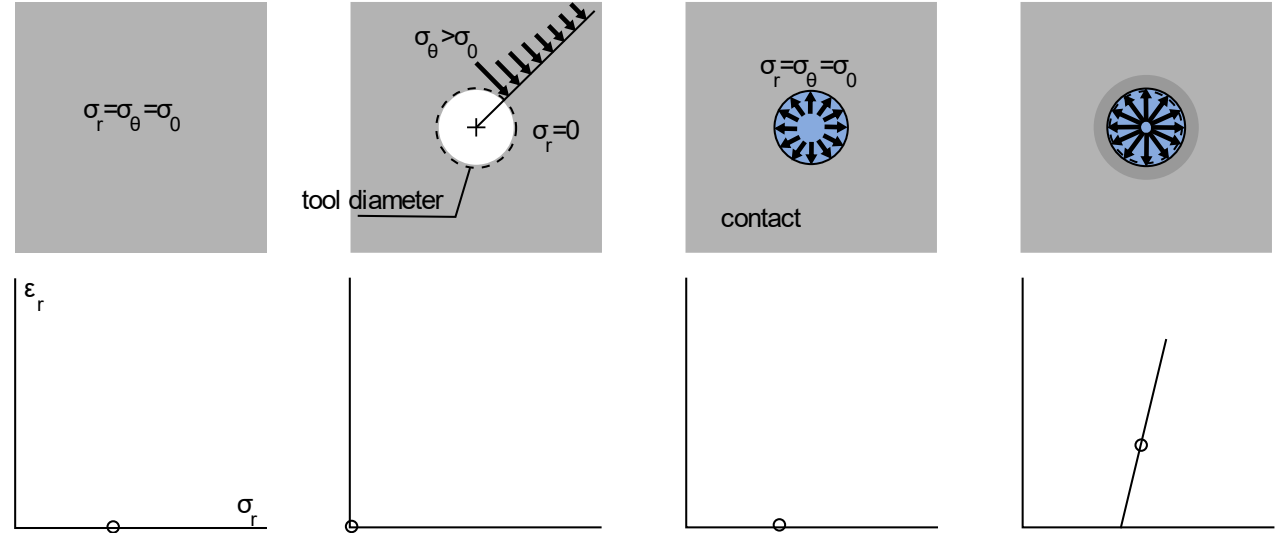
- sur la pression limite
- sur le module



soil displacement		without										with
		rotary				Rotary-perc.		Driven tube		VD	DST	
		OHD (M)	HA (M)	CFA	CD	RP (M)	ST DT (M)	OS				
Boring technique → Soil and rock type ISO 14688-1&2 and ISO 14689								T	T _k			
fine	clay	soft	++	+++	+	+		+	+++	-		
		firm	+++	+++	++	++		++	++	+		
		stiff	+++	+	+++	+++	-/+	++	+	+	-	
coarse	sand	above WT	+++	+++	++	+	-/+	++	++	-	+	-
		below WT	+++	++	-	+		++	-	-	-	+
very coarse	cobble, cobble with gravels, boulder		++	-	-	+	-/+	+++		+	+	+++
			++			++	++ / +++	++		-	-	++
intermediate	cohesive and non-cohesive non homogeneous soils: tills, alluvial deposits, man-made, (un) treated fills		++	-/+	+	++	+/>+++	++		+	+	+
hard soil -soft rocks	chalk weathered rock, weak rock		+++	+/-	+	++	++	+++		+	-	
rock	sound rock		++		-	+++	+++	+		-	-	

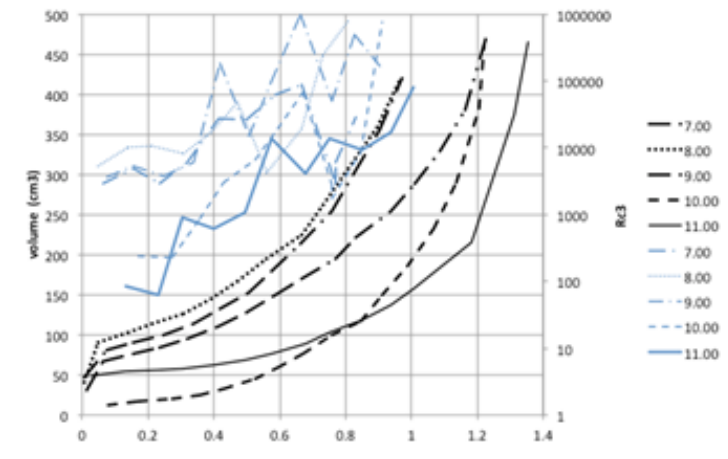
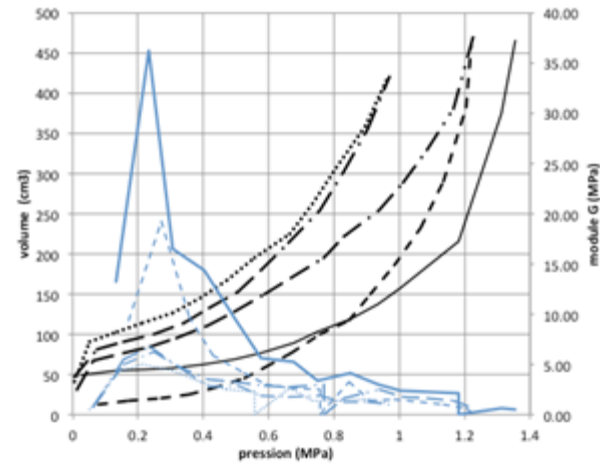
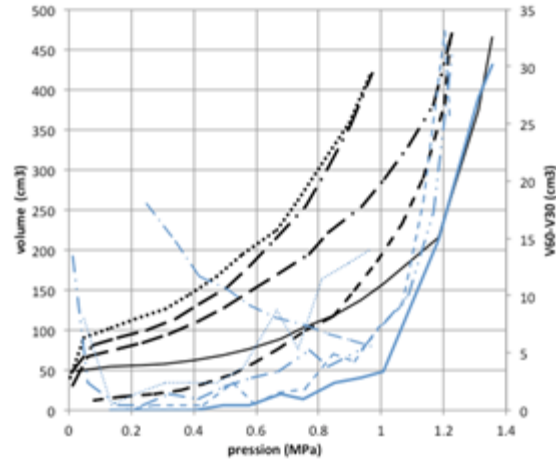
- ▶ Quelques exemples complémentaires de travaux et de retombées de l'Axe 1 d'ARSCOP
 - estimation de K_0
 - évaluation du risque de liquéfaction
 - mesure de t_{100}

- ▶ méthodes basées sur les points caractéristiques de la courbe
 - Gan et Briaud (1990)
 - rayon de courbure minimal
 - Hawkins et al. (1990)
- ▶ ou des protocoles spéciaux
 - Hoopes et Hugues (2014)

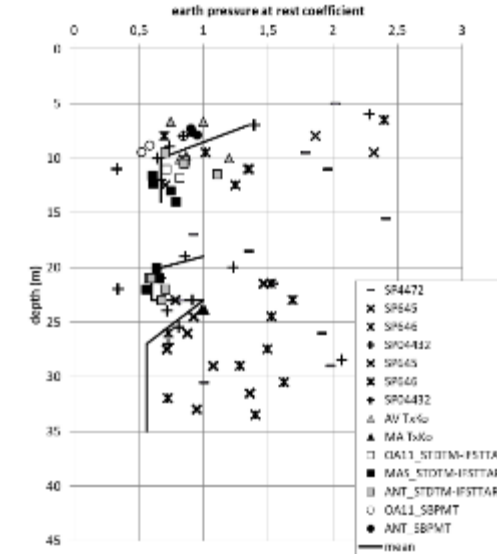
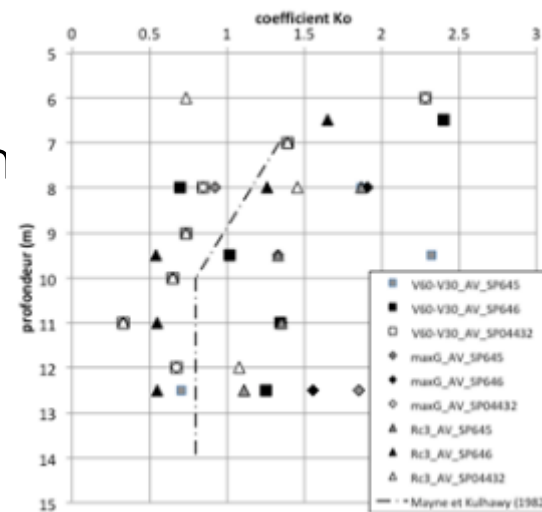


$$R_{c3} = \frac{\sqrt{[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2][(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2][(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2]}}{2[x_1y_2 + x_2y_3 + x_3y_1 + x_1y_3 - x_2y_1 - x_3y_2]}$$

► Quelques résultats



- Bonne qualité de prédiction
- Difficulté sur des essais de production sans précautions particulières



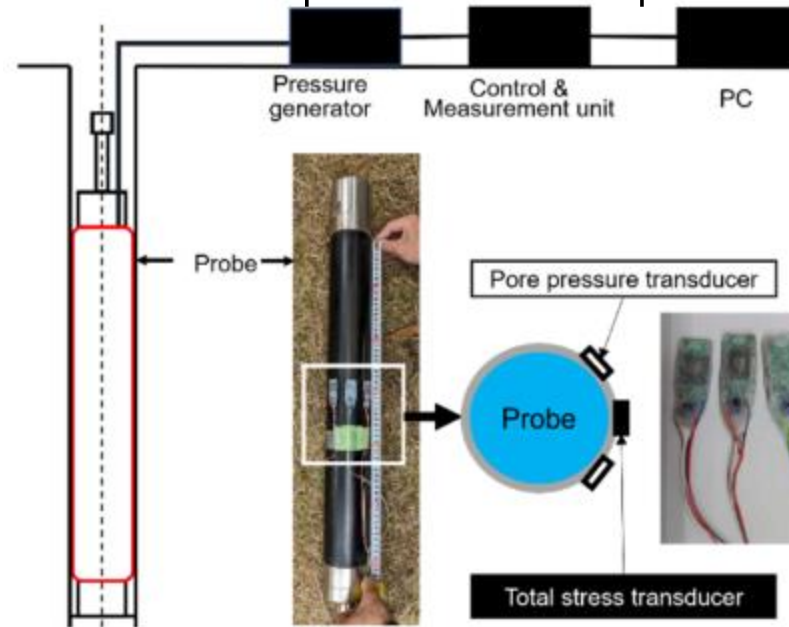
► Recherche constante

- innovation importante de tout temps demandée,
- nombreuses tentatives (LPC, Cambridge, etc.),
- faisabilité augmentée avec les nouveaux capteurs et acquisitions

c.f. présentation de M. Peronne



Karagiannopoulos, 2022

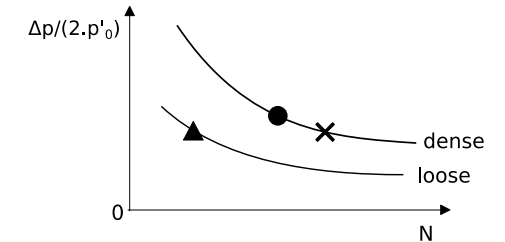
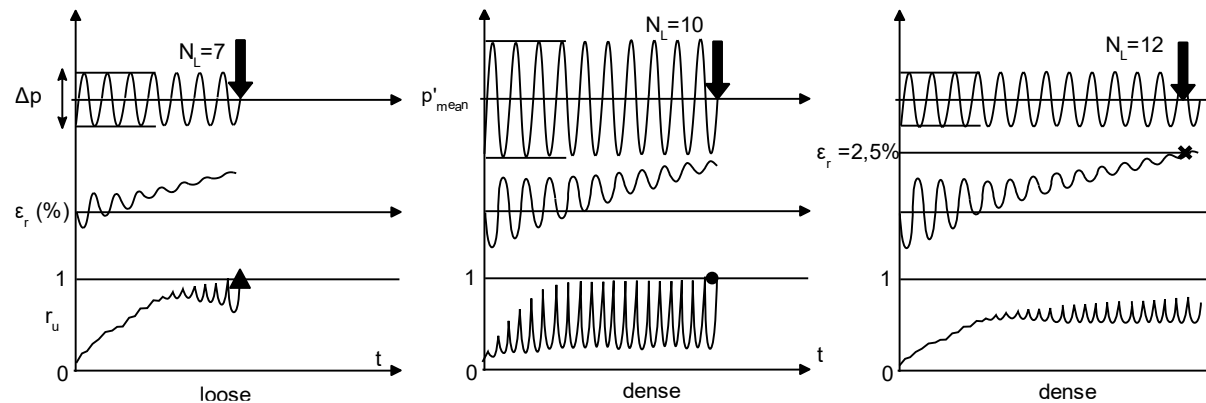
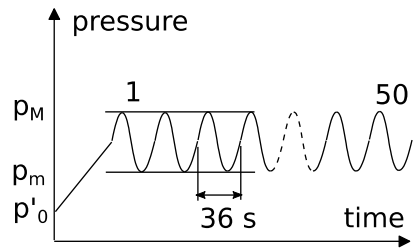
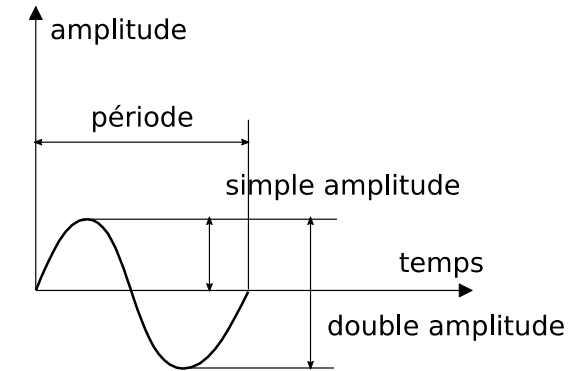
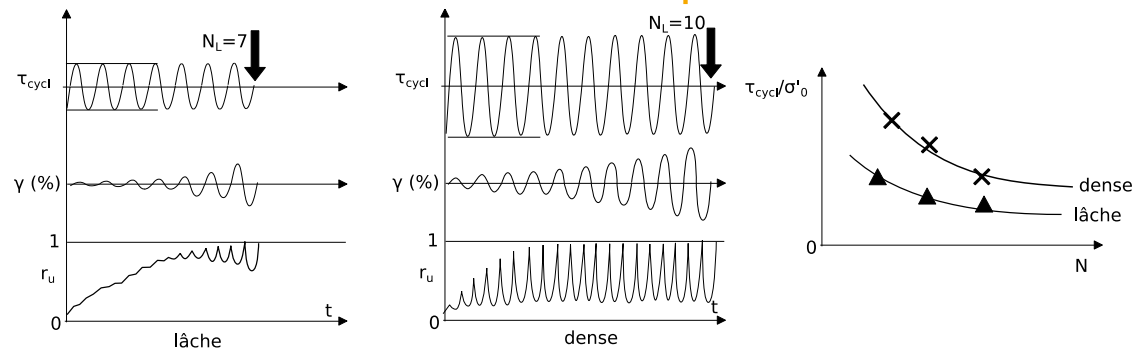
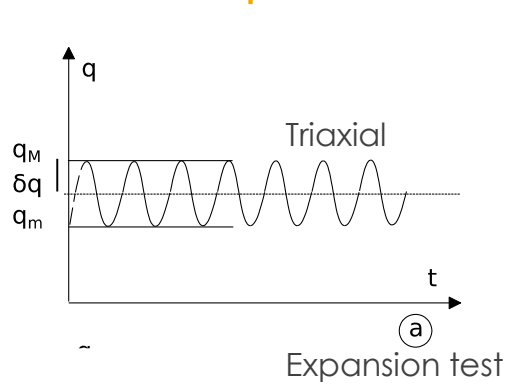


Kazama et al., 2024



Masuda et al., 2006

► Adaptation du protocole du triaxial au pressiomètre

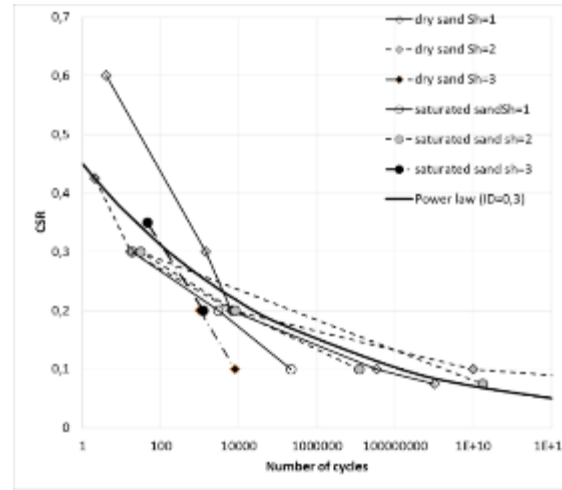
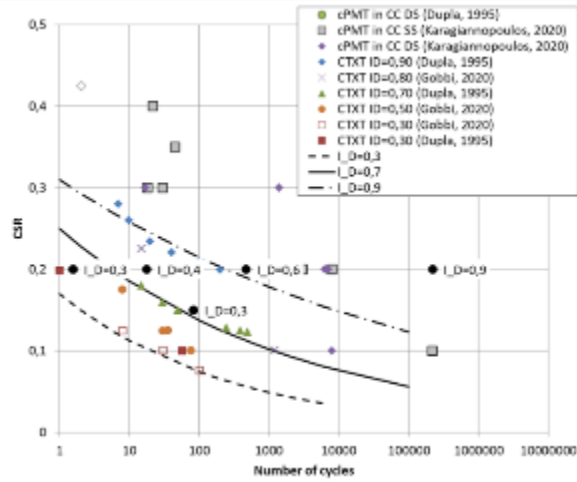


En raison de la similitude avec les essais en laboratoire, c'est-à-dire le chemin de contrainte, la mesure des contrainte-déformation-surpression interstitielle.

Déjà proposé par Masuda ou Briaud ou Jézéquel

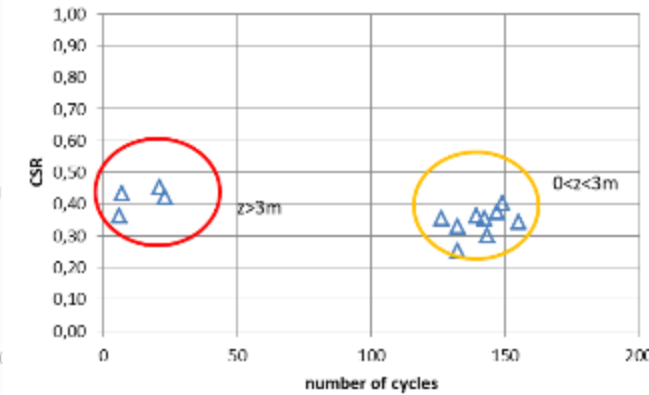
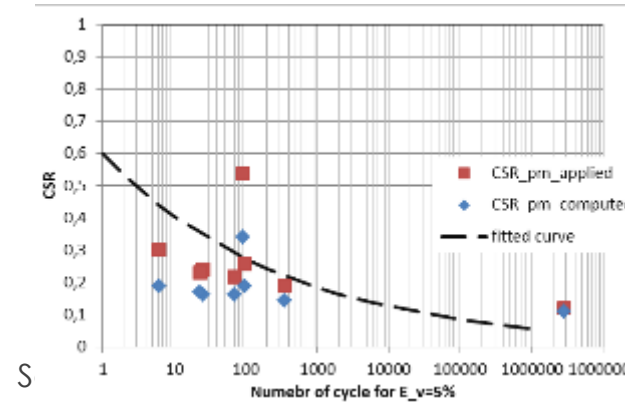
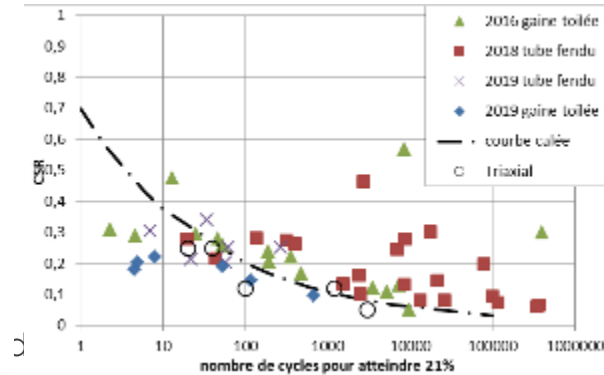
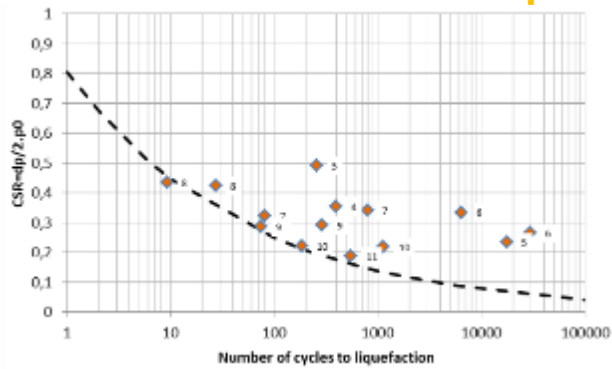
► Rappel sur les résultats avec le pressiomètre

Réalisation d'essais en chambre d'étalonnage



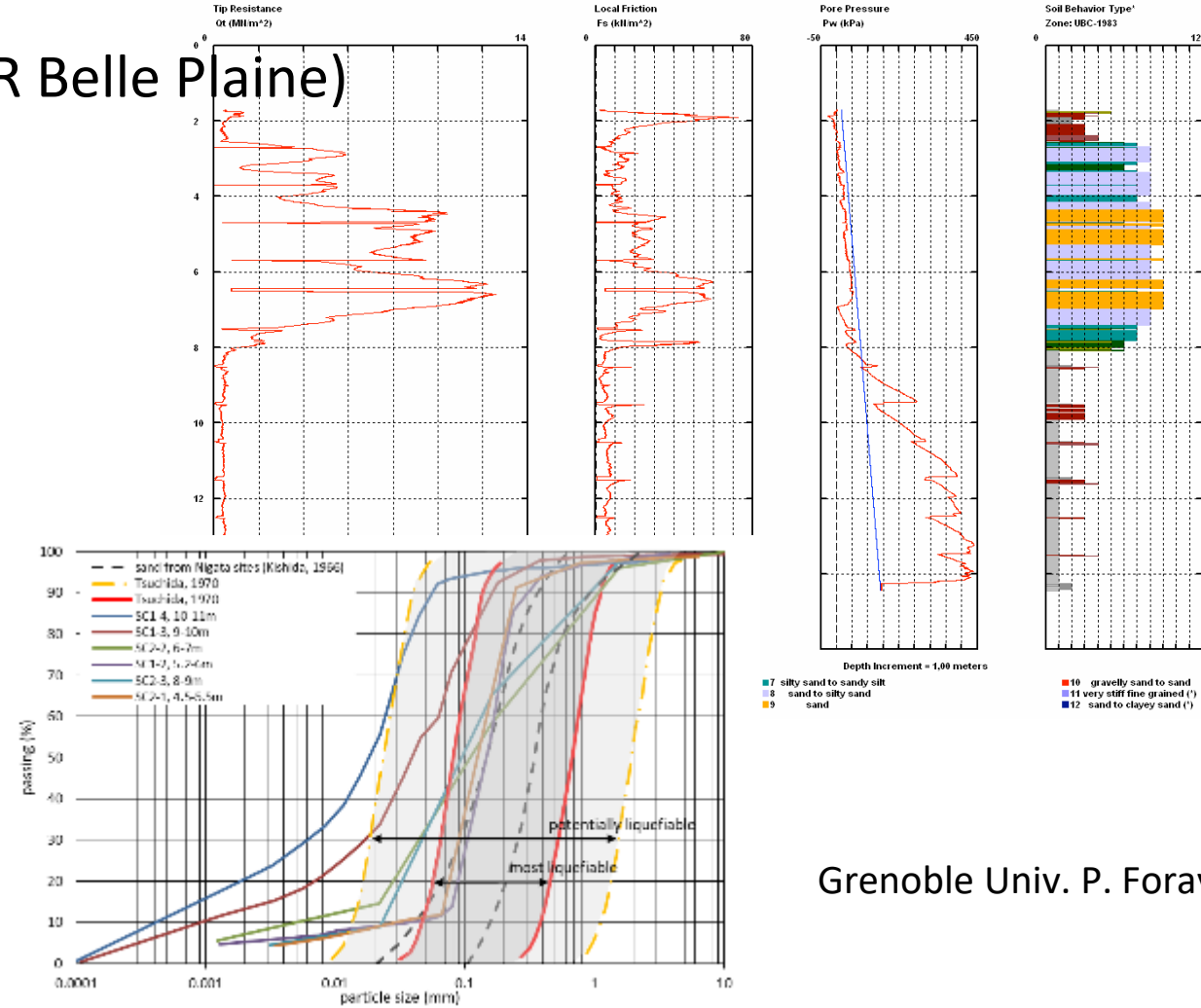
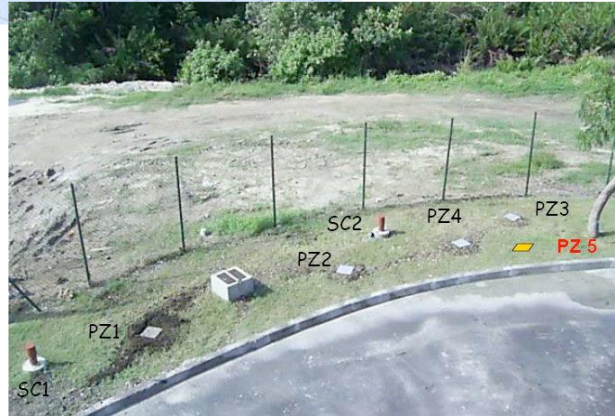
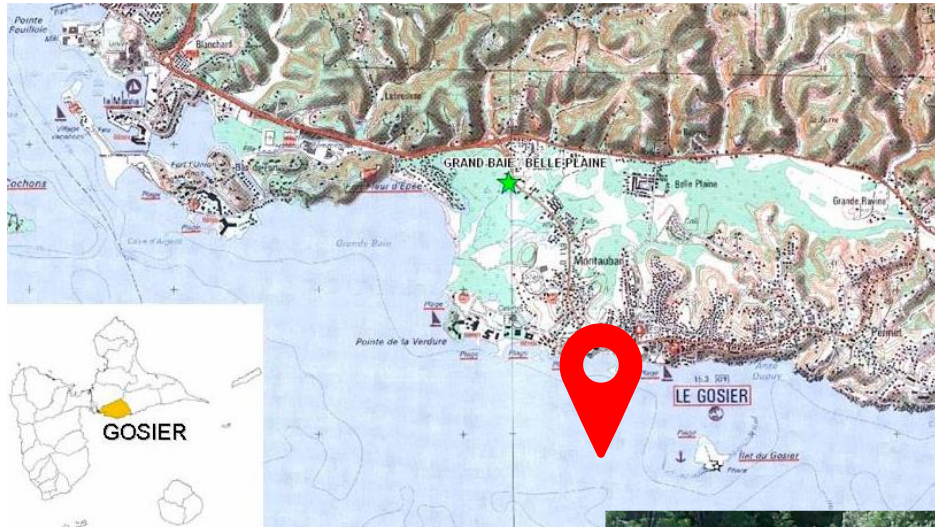
$$CSR_{PMT} = \frac{\delta(\sigma_r)cy}{2 \cdot \sigma_{H,mean}} = \frac{\frac{p_M - p_m}{2}}{2 \cdot \left(\frac{p_M + p_m}{2}\right)} = \frac{p_M - p_m}{2 \cdot (p_M + p_m)}$$

Réalisation d'essais en place

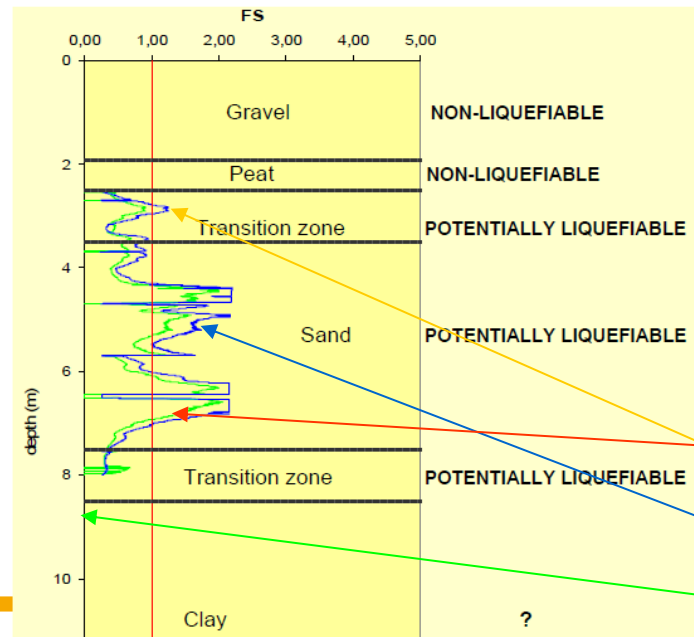
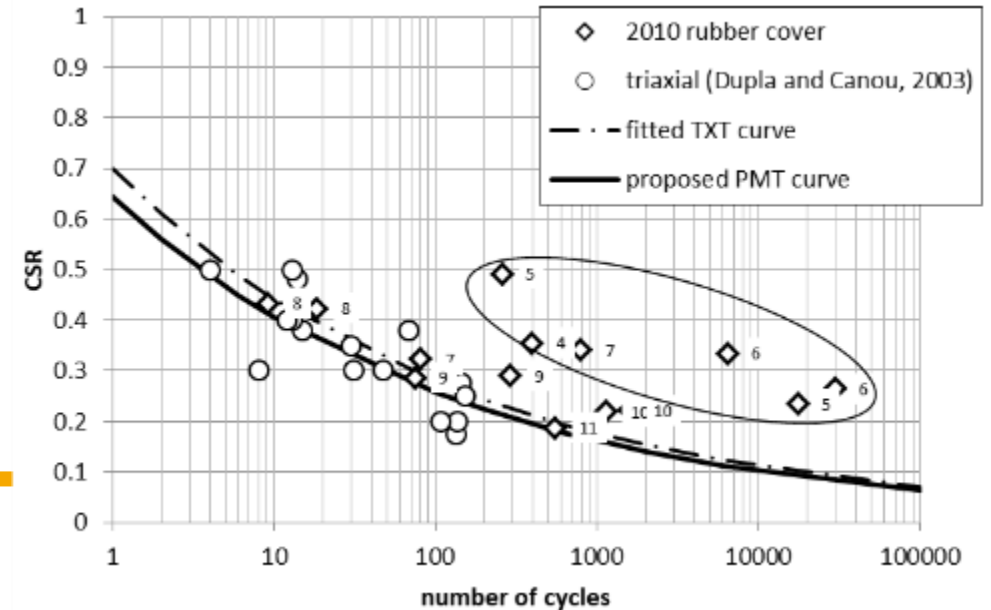
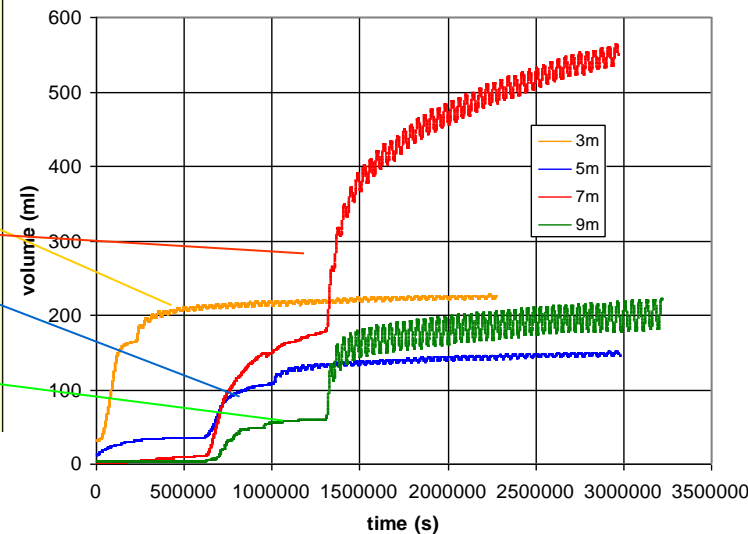
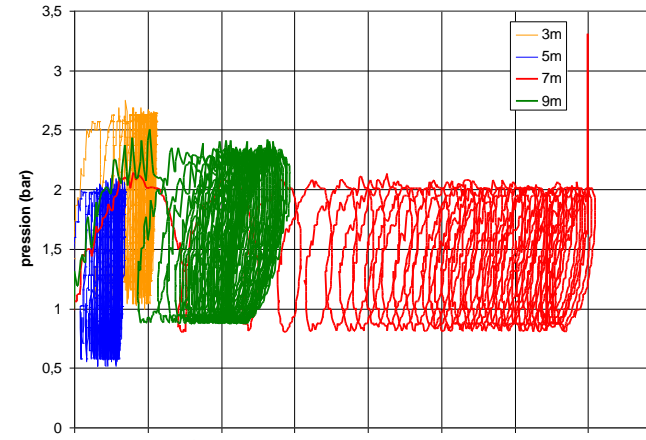
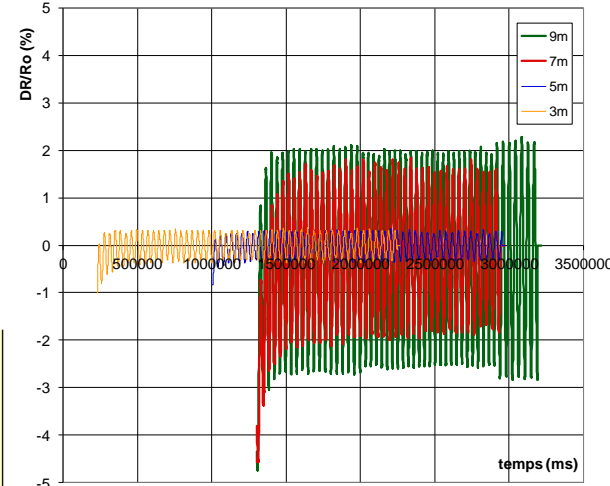


► Essais à Gosier, Antilles Françaises, Craïbes

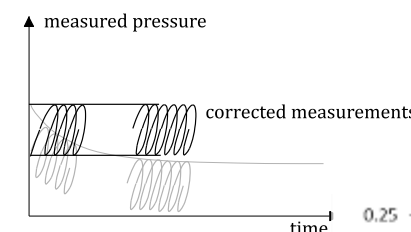
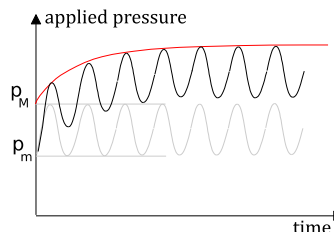
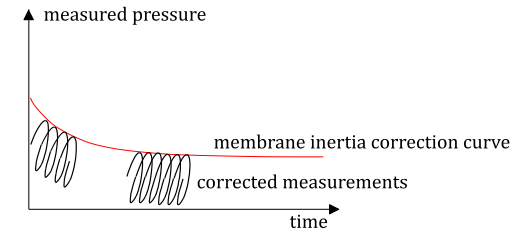
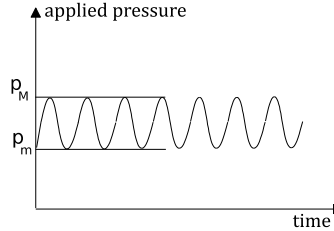
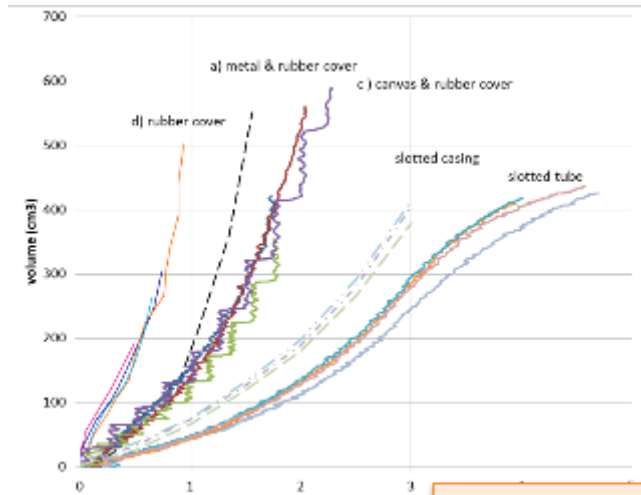
Premiers essais sur sites réels 2010 (projet ANR Belle Plaine)



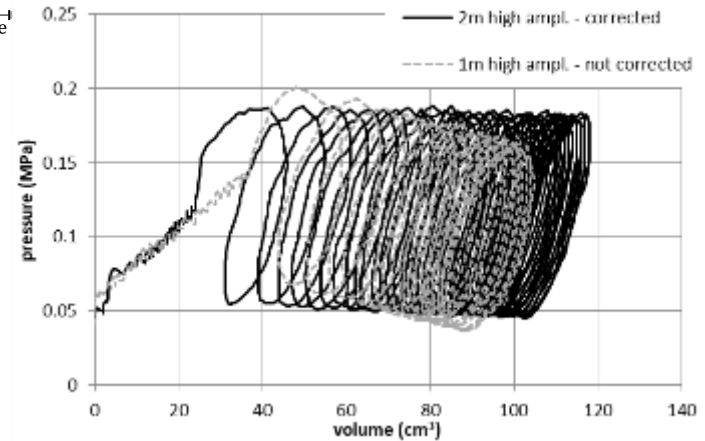
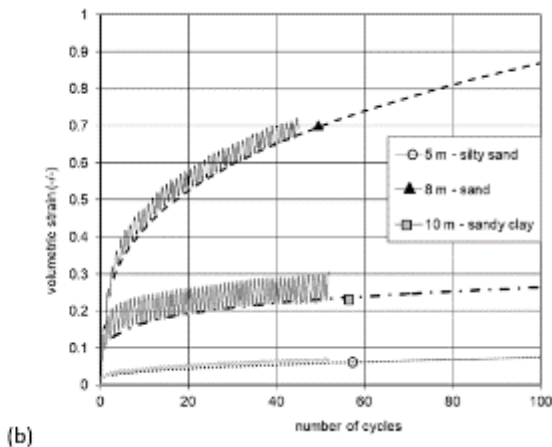
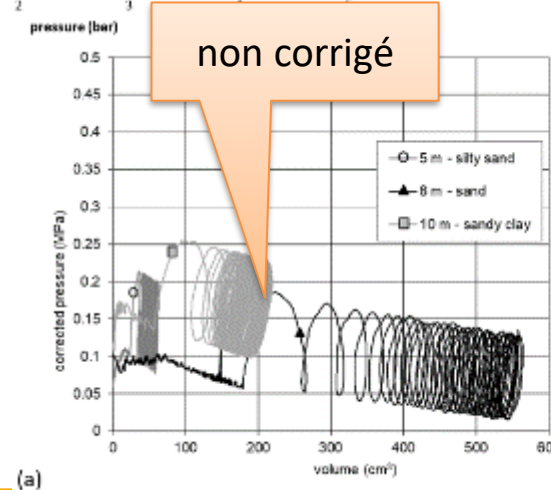
- ▶ Expansion cyclique dans une zone potentiellement liquéfiable
 - indépendant de la sonde



► Intégration de la correction de pression en temps réel grâce aux nouveaux CPV

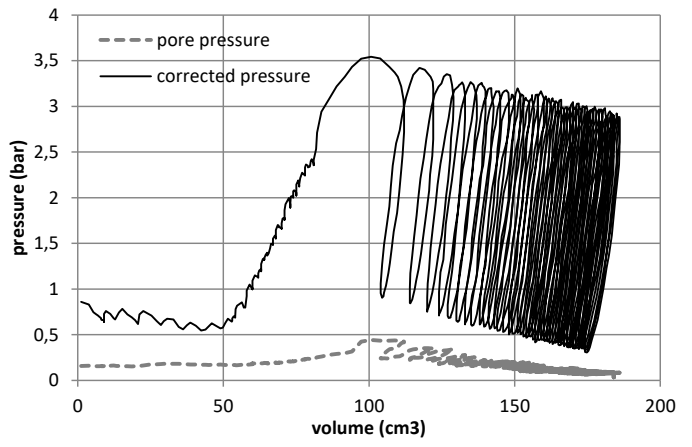
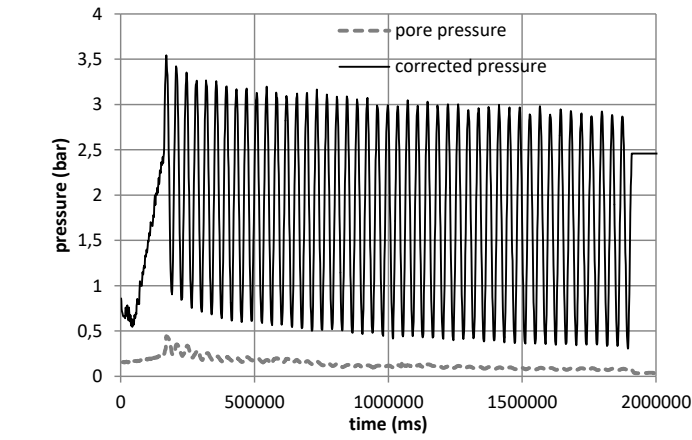


- Problématique de la résistance propre de la sonde :
- essais d'expansion à l'air libre,
 - calage,
 - pilotage temps réel

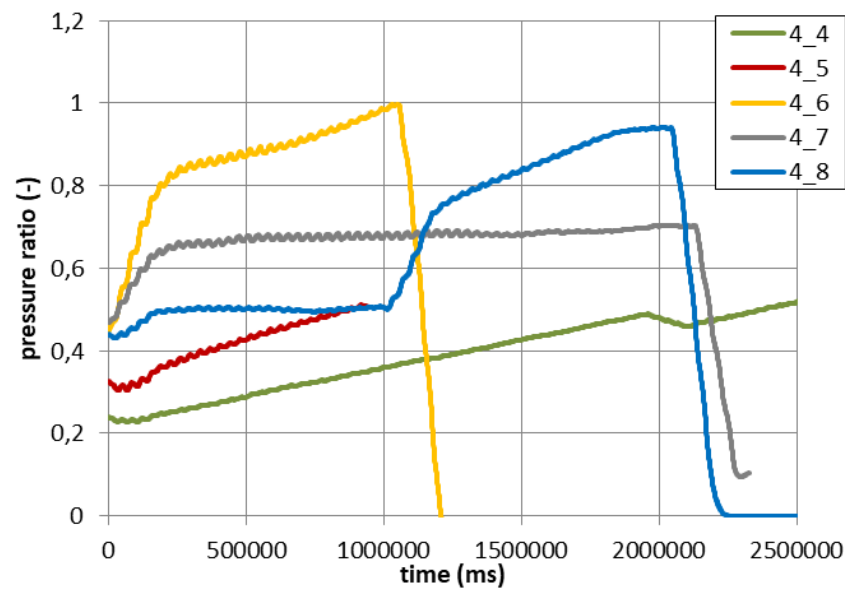


► Amélioration apportée par la mesure de la pression interstitielle

- Exemples d'essais réalisés avec le SBP avec mesure de la pression interstitielle
- réactivité, qualité de la mesure



transducteur à prix abordable (pour les montres de plongée)

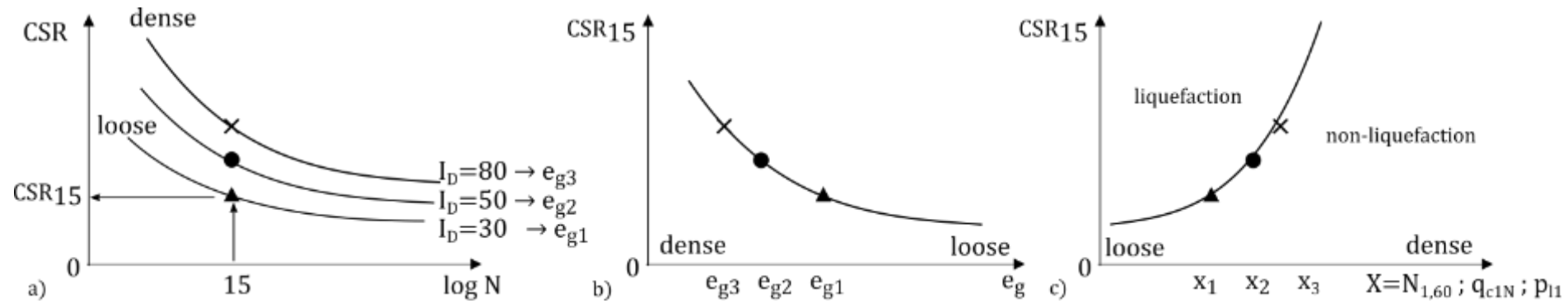


le calcul d'un ratio de surpression interstitielle r_u équivalent à celui défini pour le triaxial

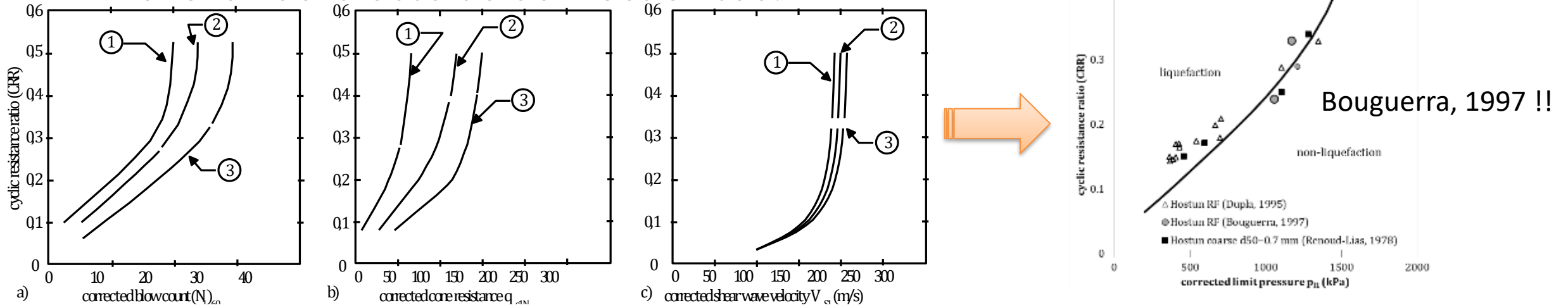


► Principe des méthodes simplifiées

- Construction de diagrammes relatifs aux paramètres de l'état d'influence



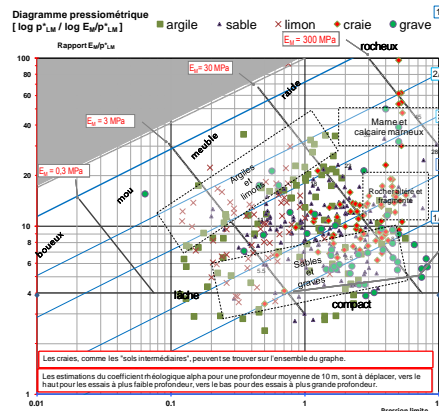
- Appliqué aux principaux tests in situ avec une version différente ou un compromis en fonction de la base de données utilisée.



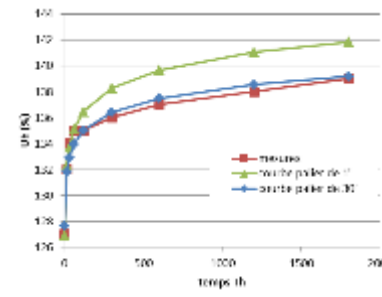
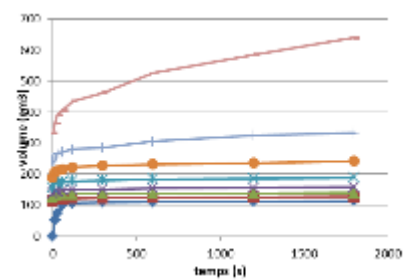
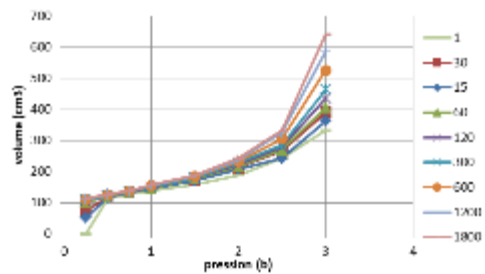
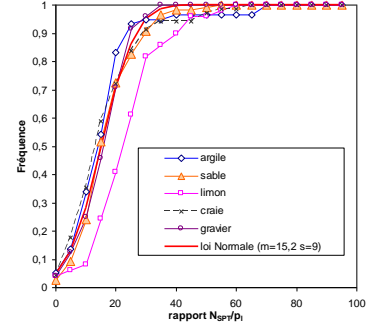
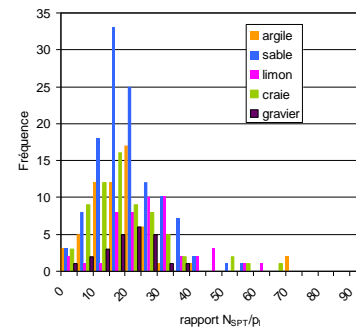
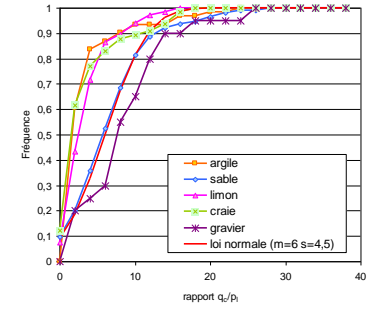
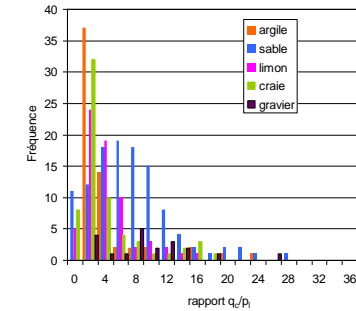
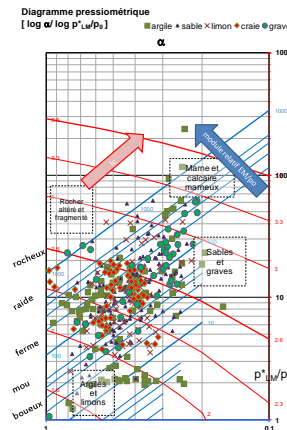
► Transposition au pressiomètre

- trois constats principaux

Existe à l'heure actuelle le Pressiorama cité dans les normes NF P 94-261 et 262 et une variante => pas suffisamment discriminant



Corrélations fiables entre la pression limite p_l et le nombre de coups NSPT ou la résistance du cône q_c



La procédure d'essai comprend des phases de maintien de la pression qui permettent de mesurer la dissipation du volume.

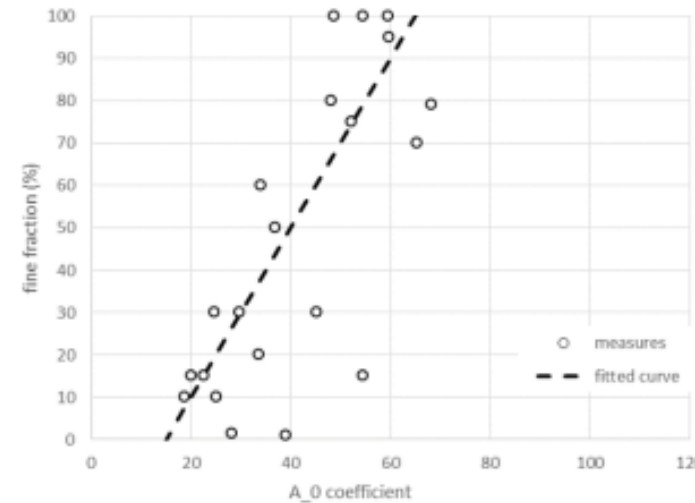
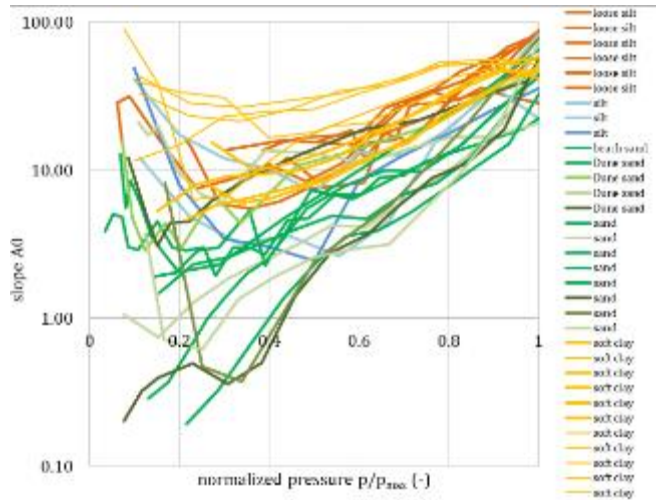
► Détermination de la quantité de fines

- Comme avec le CPT, un indice équivalent peut être utilisé pour l'estimation du pourcentage des fines. Ce coefficient est calculé par la formule suivante:

$$A_0 = slope \left(\frac{V(p)}{\log(t)} \right)$$

- Une corrélation du coefficient A_0 à la phase plastique (près de la p_{max}) avec le pourcentage des fines de l'échantillon peut être décrit par la formule suivante:

$$FC(\%) = 2 \cdot A_0 - 30$$



Base de données
composée de sols réels
Erreur sous les
incertitudes dues à la
variabilité spatiale

► Méthode simplifiée adaptée à l'essai pressiométrique préforé - chargement monotone

- Sur la base de résultats antérieurs

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - 2 \cdot p_{\ell 1Ncs}} + \frac{2 \cdot p_{\ell 1Ncs}}{135} + \frac{10}{(20 \cdot p_{\ell 1Ncs} + 25)^2} - \frac{1}{200}$$

courbes obtenues par corrélation avec le CPT ou le SPT

PMT en chambre d'étalonnage et essais PMT in situ sur des sites américains, japonais et français

avec la pression limite normalisée

$$p_{\ell 1N} = \frac{p_{\ell}}{p_a} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

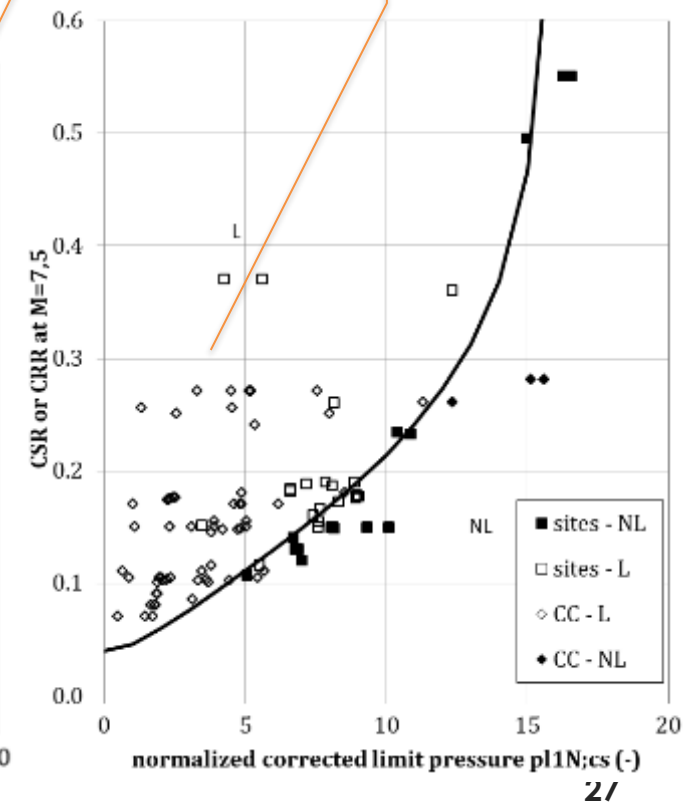
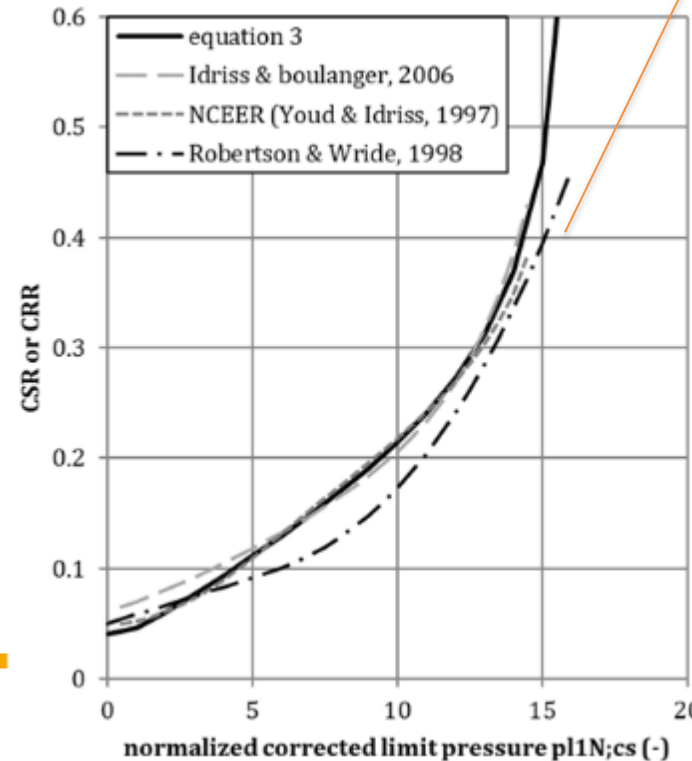
et la correction des fines

$$p_{\ell 1Ncs} = p_{\ell 1N} + \Delta p_{\ell FC}$$

if $FC < 5\%$ $\Delta p_{\ell FC} = 0$

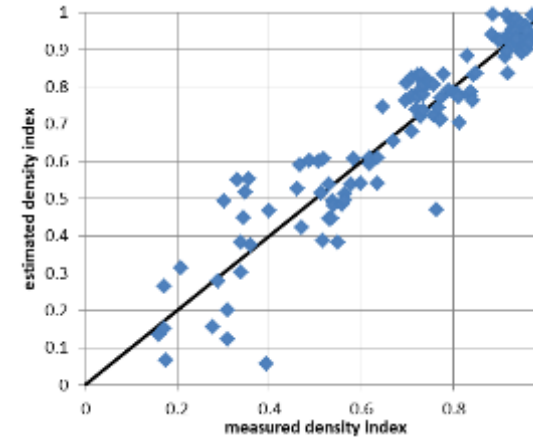
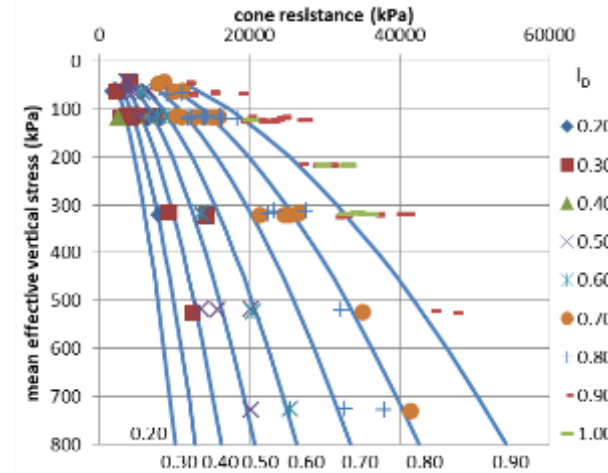
if $5 < FC < 35\%$ $\Delta p_{\ell FC} = e^{1,6 - 190/FC^2}$

if $FC > 35\%$ $\Delta p_{\ell FC} = 4,3$



► Détermination de l'indice de densité

- Équations utilisées similaires à celles du pénétromètre proposées par Baldi

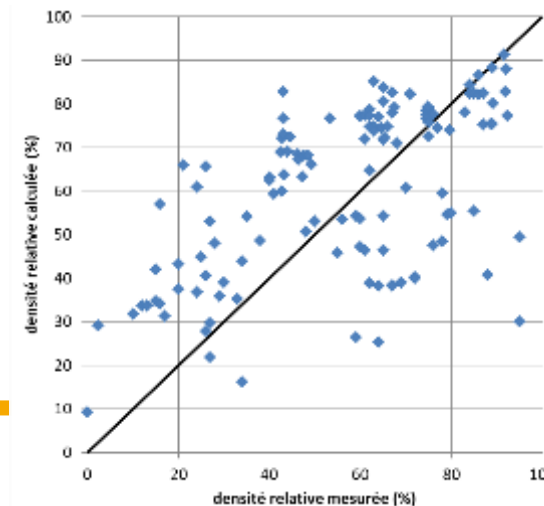
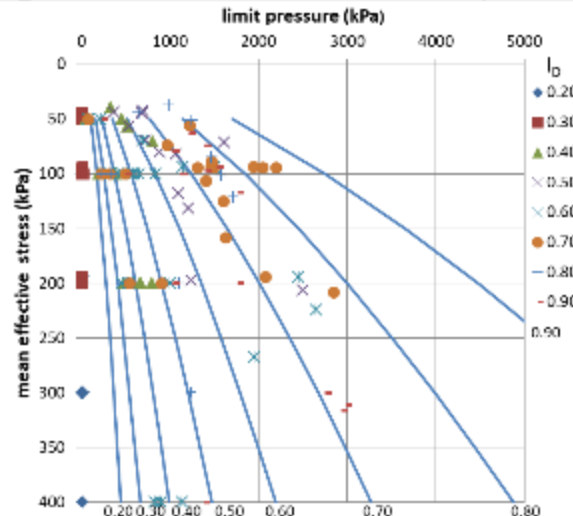


Sable Ticino
chambre
d'étalonnage

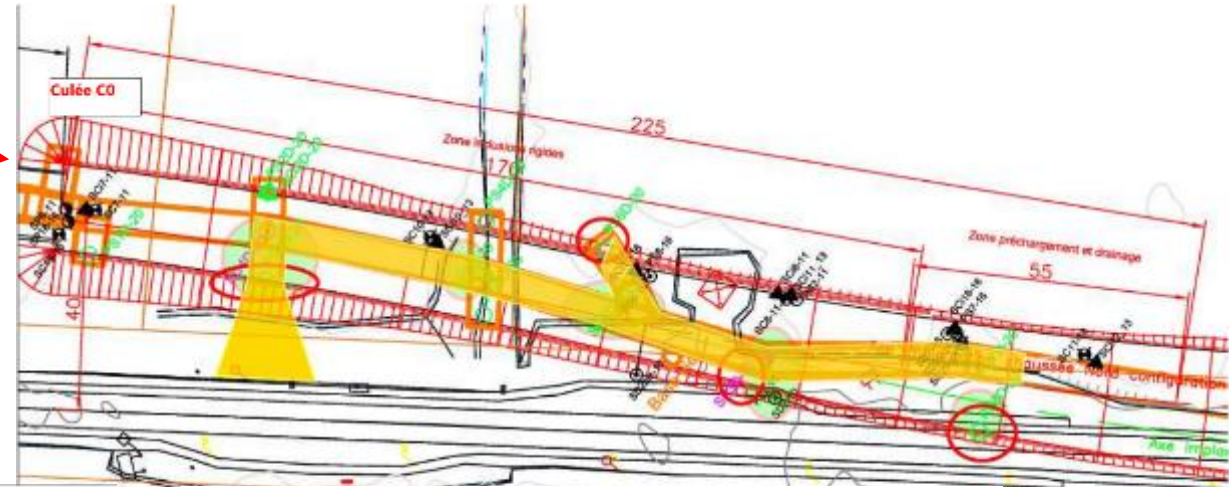
- Données de Mokrani, Bougherra, Bellotti, Dupla, Karagiannopoulos

$$I_D = \frac{1}{C_2} \cdot \ln \left[\frac{p_\ell}{C_0 \cdot (\sigma'_m)^{C_1}} \right]$$

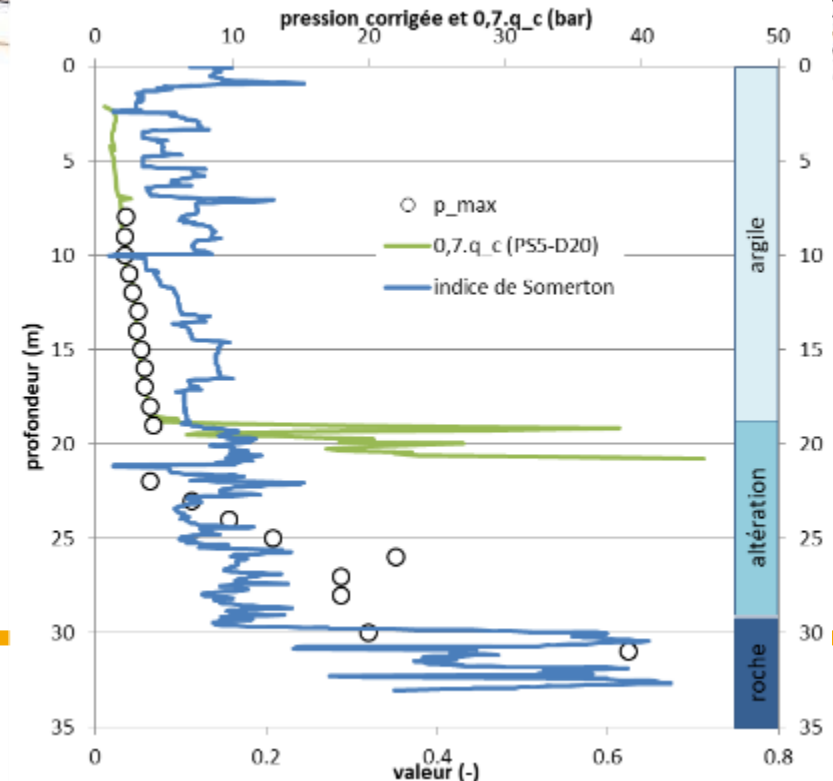
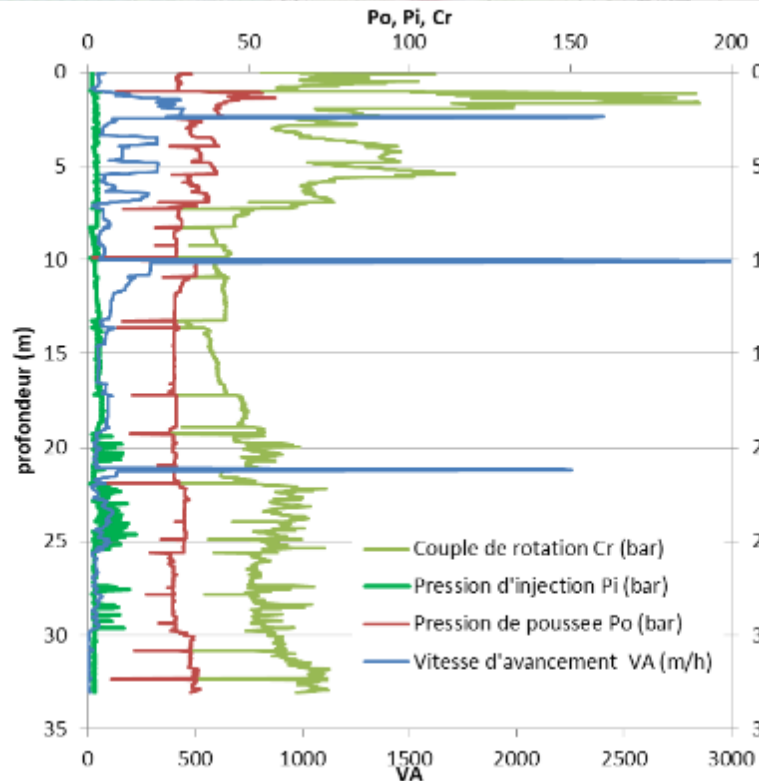
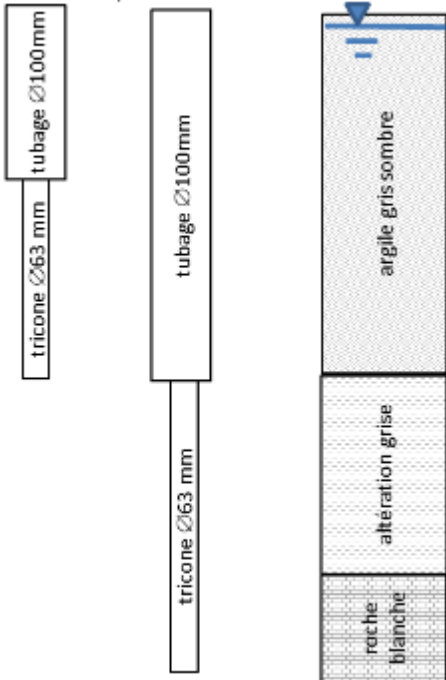
avec $C_0=3$, $C_1=0.7$, $C_2=4$



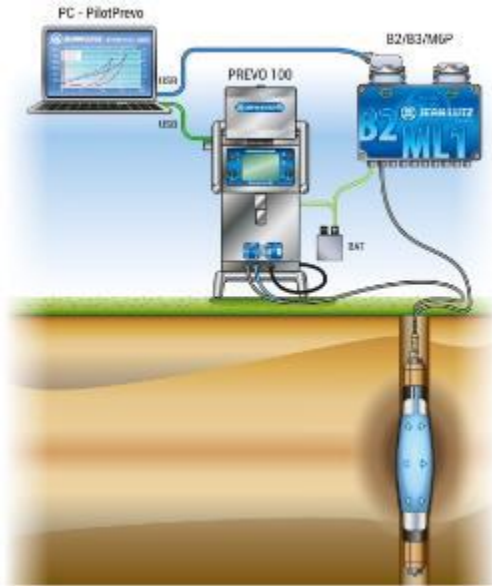
Différents sable y
compris naturels,
chambre d'étalonnage
et in situ



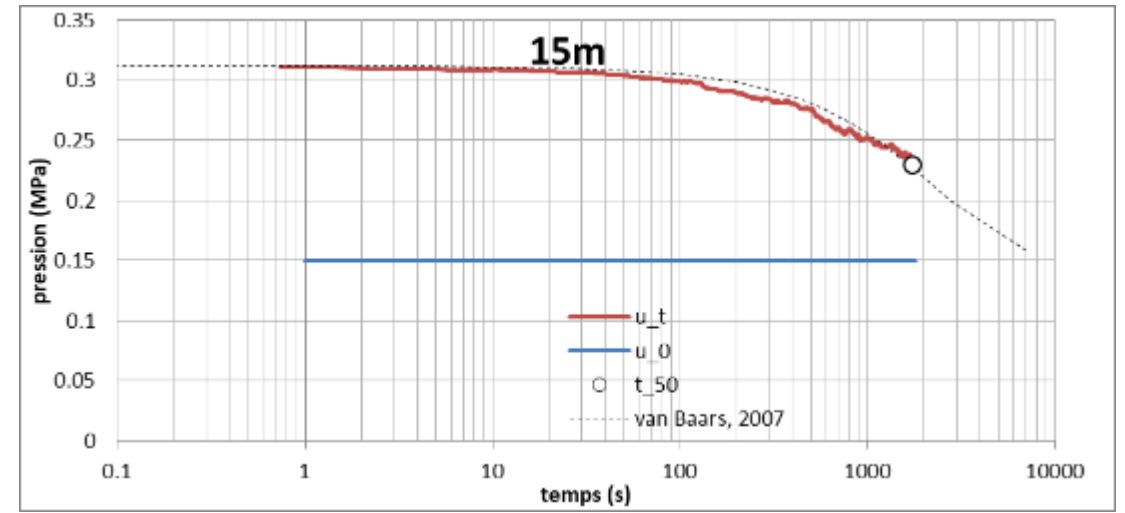
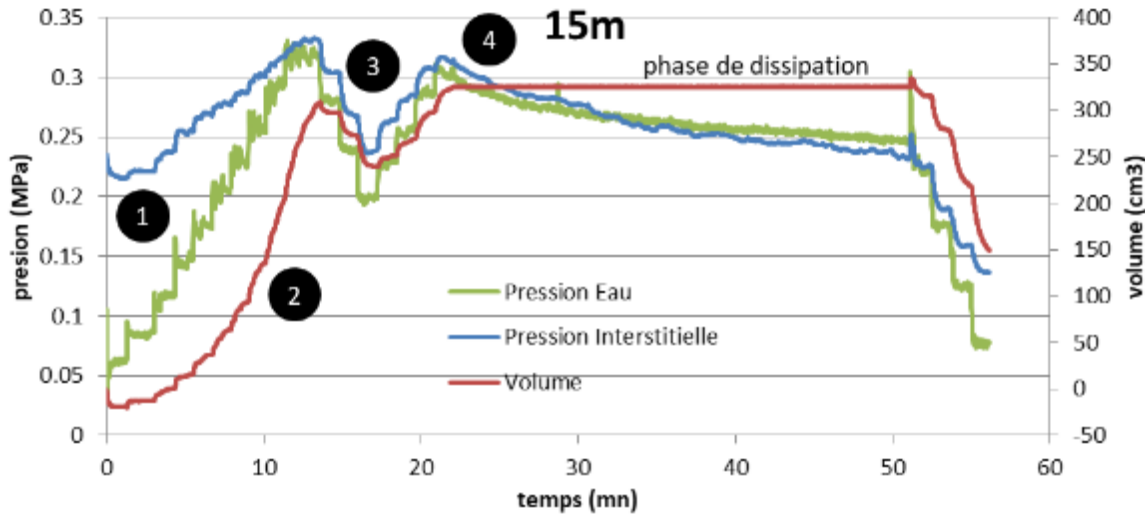
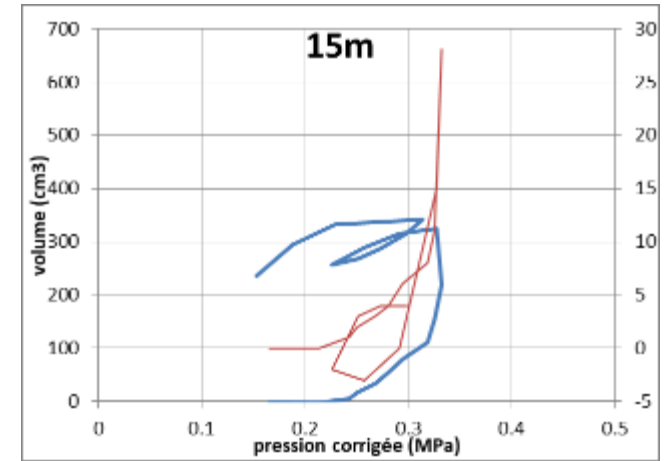
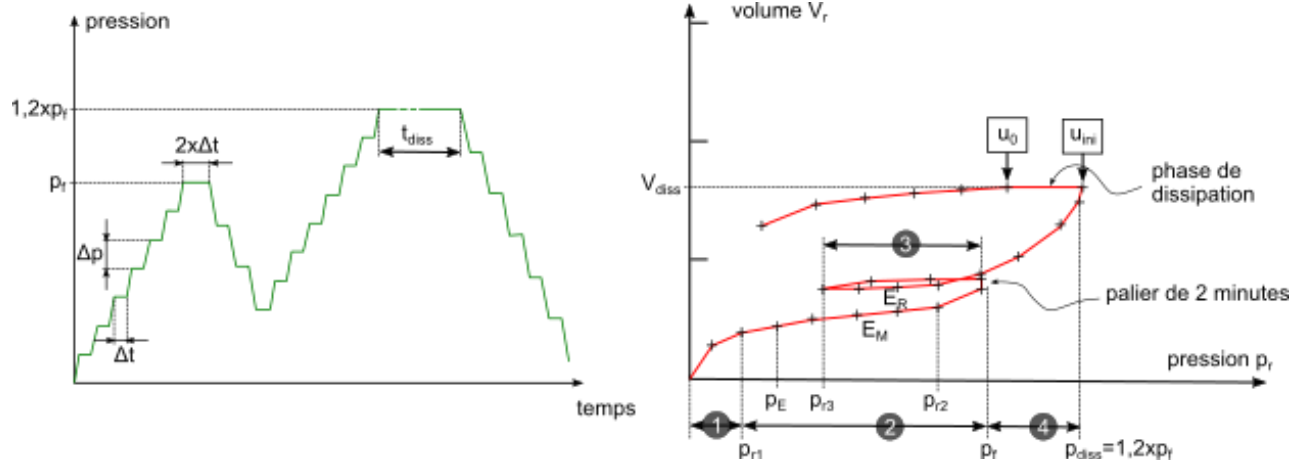
de 0 à 20 m passe de 2 m
de 20 à 30 m passe de 5 m



► Matériel



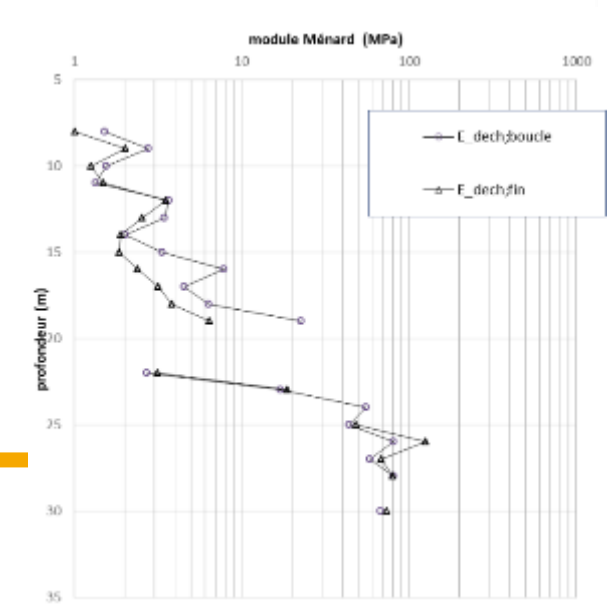
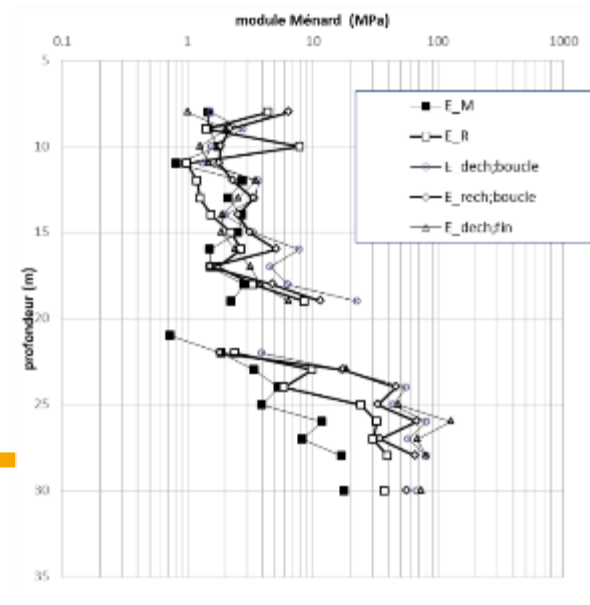
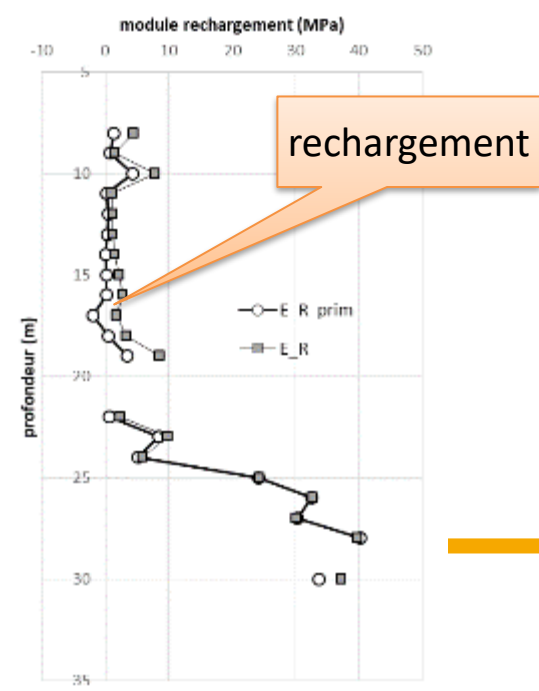
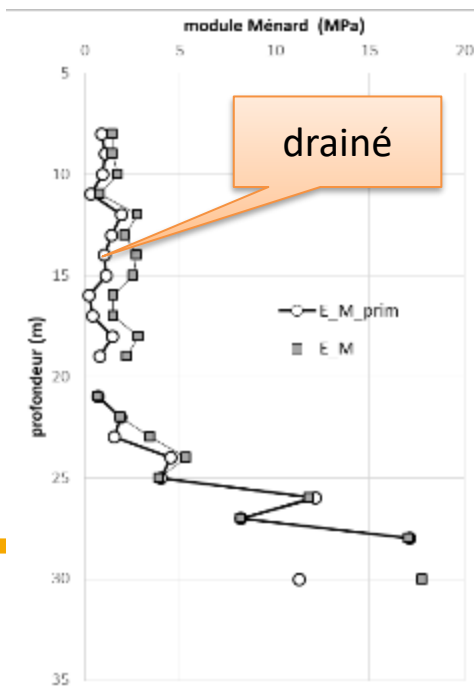
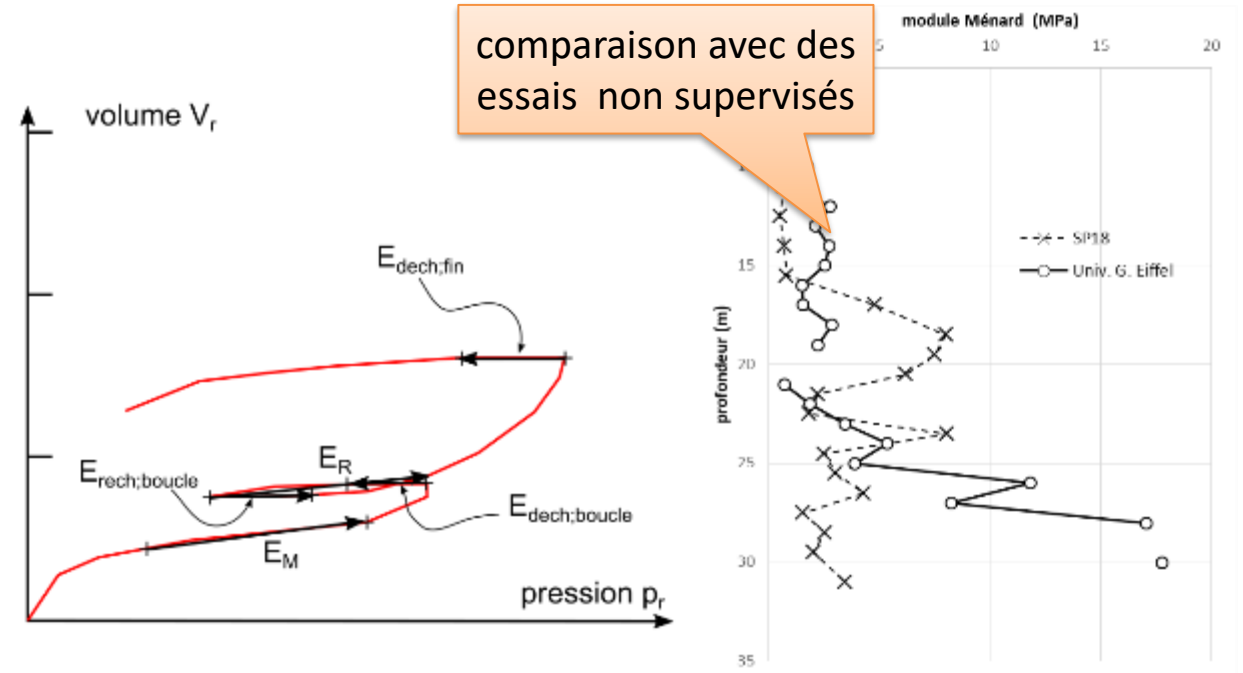
► Programme d'essais et résultats



► Dépouillement - Module

$$E_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left(V_s + \frac{V_E + V_{R2}}{2} \right) \cdot \frac{p_{R2} - p_E}{V_{R2} - V_E}$$

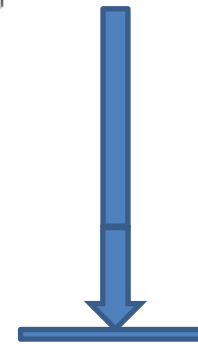
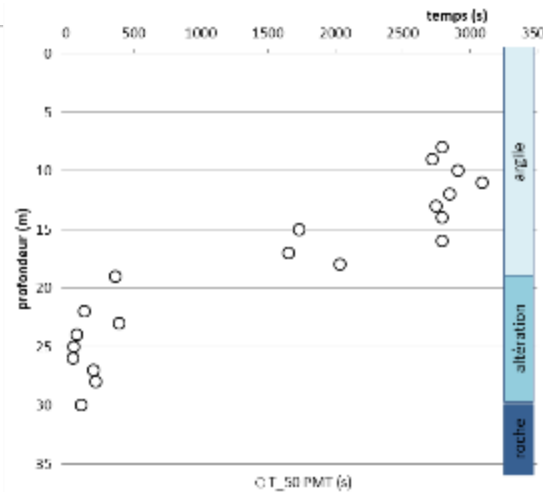
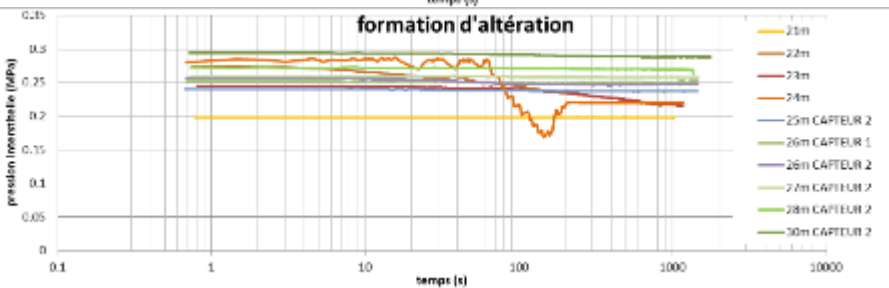
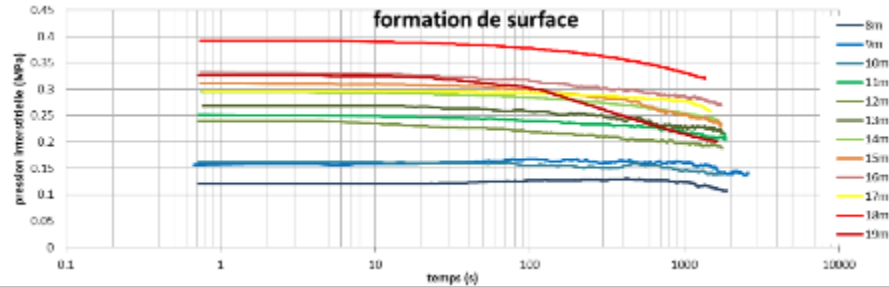
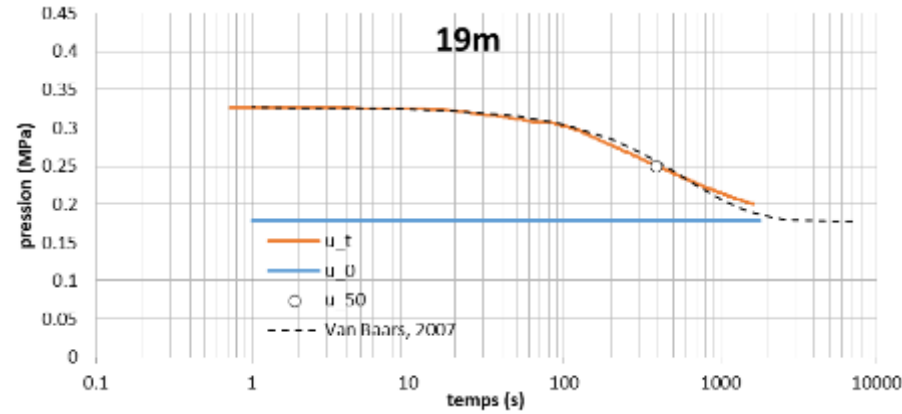
$$E'_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left(V_s + \frac{V_E + V_{R2}}{2} \right) \cdot \frac{(p_{R2} - u_{R2}) - (p_E - u_E)}{V_{R2} - V_E}$$



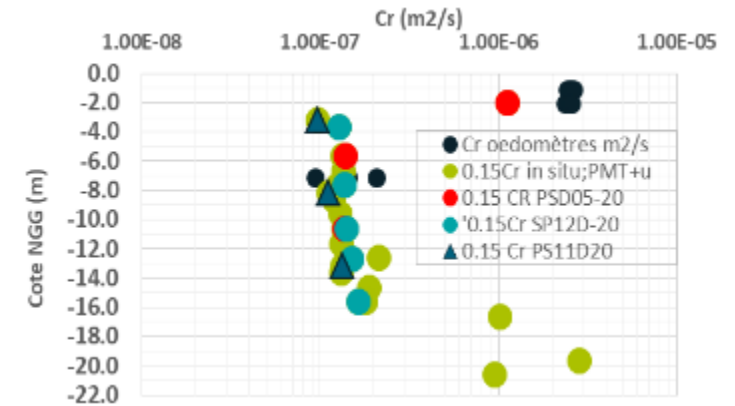
► Dépouillement – dissipation

- (van Baars, 2007)

$$\frac{\delta p}{\delta t} = c_{\beta} \cdot \left(\frac{\delta^2 p}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\delta p}{\delta r} \right)$$



FIN CPT



► Synthèse du chapitre 3

- mesure de module en petites déformations
- développement sur l'automatisation de l'essai
- développement sur la mesure de la pression interstitielle
- développement des procédures d'essais et d'interprétation

► des outils pratique et utilisables :

- matériels : CPV, sondes, capteurs, etc.,
- des protocoles: avec boucles, multicycles, dissipation,
- de nouvelles interprétations : modules, K_0 , Cr, liquéfaction,