

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



État de la pratique et résultat des essais croisés

Catherine Jacquard

- ▶ Enquête relative à la pratique quotidienne des essais pressiométriques (Fondasol, Apageo) 1 livrable
- ▶ Campagnes d'essais croisés
 - 5 sites : calcaires (Gouvieux), molasse (Toulouse), sables (Messanges), limons (Plancoet), argiles molles (Cran) 7 livrables
- ▶ Essais et matériels spécifiques
 - Essais pressiométriques cycliques avec mesure de la pression interstitielle à Newington, Plancoët, Saint-Benoit des Ondes et Saint Malo (UGE, Jean Lutz, Cerema) 1 livrable
 - Validation de la sonde Monochambre FC® comme outil pressiométrique et dilatométrique (Fugro, Calyf) 1 livrable
 - Mesure très haute définition de la déformation radiale d'une sonde mono-chambre par inductance (Calyf)- étude de faisabilité 1 livrable
 - Dégradation du module de cisaillement des sols à l'aide de mesures combinées géotechniques/géophysiques (Geomatech, Apageo, UGE, ENSTA) -étude de faisabilité 1 livrable
- ▶ Réflexions sur la précision des mesures
 - Calcul de la précision des résultats pressiométriques : modules, pression limite et module cyclique en fonction de la précision des mesures de pression et de volume (Gaiatech)
- ▶ Rapport de synthèse (Fondasol, Apageo) 1 livrable

► Enquête pratique quotidienne (2018)

- 27 réponses dont
 - 2 international
 - 85% secteur privé
 - 15% organismes publics.
 - La moitié des organismes qui ont répondu est partenaire d'ARSCOP
- Types de sonde utilisées:
 - Sonde tri-cellulaire 60 mm (BX) 58mm
 - Sonde tri-cellulaire 44 mm avec tube fendu court
- Types de tubulures:
 - Coaxiale haute pression
 - Jumelée haute pression
- Fluide: eau pure / eau avec anti-gel
- Gaines:
 - Majorité caoutchouc 3mm (argiles, limons),
 - Gaine toilée dans tous types de sols,
 - Gaine toilée haute pression dans sables et roches

Auteur(s) / Organisme(s) :

C. Jacquard – Fondasol

S. Varaksin - Apagéo

- CPV:
 - 15 CPV Ménard manuel
 - 10 CPV à acquisition automatique
 - 4 pressiomètres Ménard auto-contrôlés

Tableau 3 — Types de contrôleurs pression-volume

Type de contrôleur pression-volume	Type de régulation d'essai	Type de relevé et d'enregistrement
A	manuel	manuel
B	manuel	automatique
C	automatique	automatique

- Fluides forage: eau et bentonite
- Plages de pression conformes à NF EN ISO 22 476-4 sauf un utilisateur: $p_{max} = 3 \text{ MPa}$
- Essais haute pression: critère d'arrêt variable 6 à 20 MPa
- Critère d'arrêt volume: inférieur à celui préconisé par la norme
- Description par les sondeurs: 81%
- Récupération des échantillons: 18%
- Enregistrement des paramètres de forage: 50%

- Outils de forage
 - CFA (tarière hélicoïdale continue): tous types de terrain sauf roche dure
 - OHD (outil désagrégateur rotation): tous types de terrain
 - DST (tube fendu battu): sables lâches sous nappe, mais aussi vases et argiles molles

Introduction de la sonde		Sans refoulement du sol										Avec refoulement du sol	
Types de sols et de roches ↓ selon les normes ISO 14688 (toutes les parties), et ISO 14689		Technique de forage											
		1 < d _v /d _c ≤ 1,1 (V _A < 90 m/h; P ₁ < 500 kPa; Q ₁ < 15l/min; V _r < 60 tours par minute) ^a											
		Forage par rotation				Rotoperçussion			Tube foncé				Sonde foncée
		OHDM	HA/HAM	CFA	RCD	RP	RPM	STDTM	OS-T/W P	OS-TK/W H	VDT	PP	DST
Sols fins	Argile très molle à molle	**	***	*	*	-	-	*	***	-	-	*	-
	Argiles molles à fermes	***	***	**	**	-	*	**	**	*	-	-	-
	Argiles raides	***	*	***	***	*	**	**	*	*	-	-	-
	Limons: - au-dessus de la nappe phréatique	***	***	***	**	-	*	**	**	*	-	-	-
	- sous la nappe phréatique	***	**	-	*	-	*	**	-	-	-	*	*
Sols grossiers	Sables lâches: - au-dessus de la nappe phréatique	***	***	**	*	-	**	**	-	-	-	-	-
	- sous la nappe phréatique	***	**	-	-	-	**	**	-	-	-	*	*
	Sables moyennement compacts et compacts	***	**	***	**	*	***	***	-	*	-	-	**
	Grave	**	-	-	*	*	***	***	-	*	-	-	***
Sols très grossiers	Cailloux, cailloux avec grave, blocs	**	-	-	**	**	***	**	-	-	-	-	**
Sols intermédiaires	Sols grossiers cohérents (par exemple, argile avec blocs)	**	-	*	**	*	***	**	-	*	-	-	*
	Sols lâches non homogènes, sols atypiques (par ex. moraines non consolidées, certains dépôts alluvionnaires, sols artificiels, remblais traités ou non)	**	*	*	*	*	**	**	-	*	-	*	**
Sols durs	Craie	***	*	**	**	**	**	**	-	*	-	-	-
Roches tendres	Masses rocheuses altérées et faibles	***	-	*	***	**	**	**	-	-	-	-	-
Roche	Roches moyennement dures et dures	**	-	-	***	***	***	*	-	-	-	-	-

- Longueurs de passe : en majorité 3 m, mais aussi 5 m dans le rocher, la roche altérée, voire les argiles très fermes et les graviers

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage ou de fonçage continue (m)
Vase et argiles molles	1 ^a
Argiles moyennement compactes	3
Argiles raides	5
Limons:	
- au-dessus de la nappe phréatique	4
- sous la nappe phréatique	2
Sables lâches:	
- au-dessus de la nappe phréatique	3
- sous la nappe phréatique	1 ^a
Sables moyennement compacts et compacts	5
Sols grossiers: grave, cailloux	5
Sols grossiers cohérents	5
Sols lâches non homogènes, sols atypiques (comme par exemple moraines non consolidées, etc.)	3 à 5
Roches altérées, roches tendres	5
Roches moyennement dures et dures	5

^a Ou l'intervalle requis entre deux essais successifs.

- Norme de référence:
 - 35% se réfèrent à NF EN ISO 22 476-4 (2015)
 - 35% se réfèrent à NF P 94-110-1
 - 30% se réfèrent à NF P 94-110 (obsolète depuis 2000!)

- Mode opératoire de l'essai
 - Selon procédure B (enregistrement): 50%
 - S'ils sont demandés à la consultation: 37,5%
 - Impression systématique des tickets: 21%
 - Impression des tickets si demandés à la consultation: 29%

- Haute pression : 8 MPa en majorité

- Nombre de paliers
 - 8 paliers demandés: 54.5%
 - 10 paliers demandés : 23%
 - Moins de 7 paliers: 7%

- Dilatation propre de l'appareillage (« calibrage »)
 - À chaque éclatement: 61% »
 - À chaque modification de tubulure: 43%
 - À chaque chantier: 30%
 - Une fois par an: 9%

$$a < 6 \text{ cm}^3/\text{MPa}$$

- Résistance propre (« inertie »)
 - Étalonnage à chaque chantier: 42%
 - À chaque éclatement: 67%!

$$0,05 \text{ MPa} < p_{el} < 0,3 \text{ MPa}$$

Les contrôles décrits en [B.4.3](#) et [B.4.4](#) doivent être effectués dans les cas suivants:

- à chaque modification de la configuration de la sonde pressiométrique;
- à chaque changement de tubulure entre la sonde et le contrôleur pression-volume;
- à des intervalles appropriés en relation avec la fréquence d'utilisation de la sonde, par exemple une fois par semaine pour un fonctionnement en continu.

Ces contrôles doivent être effectués lorsque la sonde est prête à être insérée dans la cavité pressiométrique, c'est-à-dire lorsqu'elle a été équipée d'une tubulure convenable et que les bulles de gaz ont été purgées de la cellule centrale et du circuit d'injection du liquide.

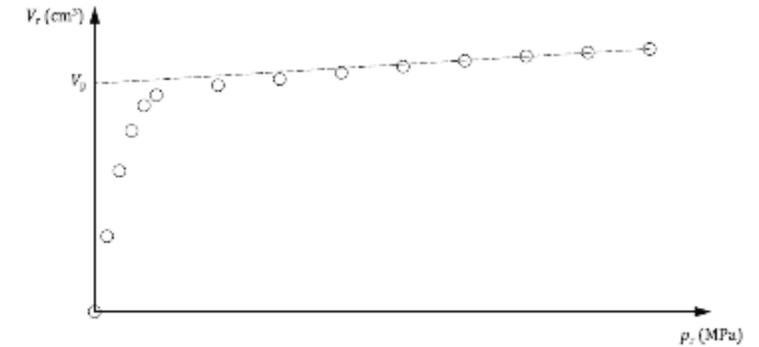


Figure B.2 — Étalonnage de la dilatation propre — Exemple

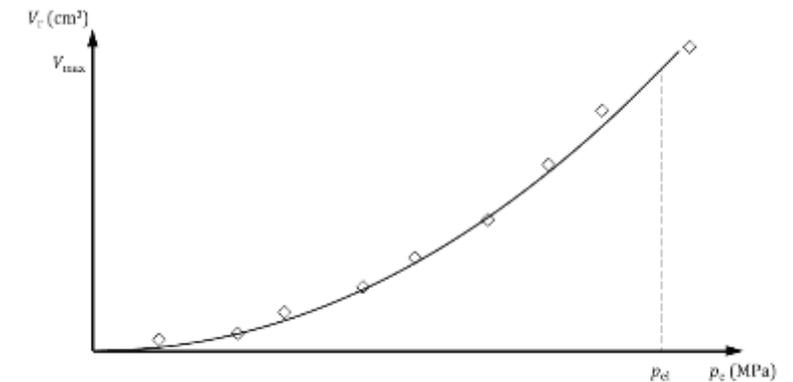


Figure B.4 — Exemple d'une courbe de résistance propre d'une sonde pressiométrique

- Critères d'arrêt:

- Le critère volume est majoritairement cité: est très rarement respecté en pratique
- Pression max: 5 MPa
- Pression de fluage: 17.6% seulement évoquent 2 ou 3 points après fluage
- Aucune réponse n'indique le doublement du volume de la sonde comme critère d'arrêt

- la pression p_r atteint au minimum la pression limite pressiométrique ou une pression au moins égale à 5 MPa (ou jusqu'à 8 MPa si spécifiées);
- le volume de liquide injecté dans la cellule de mesure dépasse la valeur indiquée en [4.2](#);
- au moins trois paliers de pression au-delà de p_f sont obtenus;
- la sonde éclate.

NOTE Pour une sonde tricellulaire de 60 mm, le volume de la sonde V_c donné en [4.2](#) correspond approximativement à un volume de 600 cm³.

La sonde pressiométrique doit être capable d'une expansion volumétrique permettant d'évaluer la pression limite pressiométrique Ménard, dans la limite de ses capacités en termes de pression.

NOTE 3 Pour les sondes de 60 mm et les sondes à tube fendu de 60 mm, la somme 200 + V_c peut être utilisée, où 200 et V_c sont en cm³.

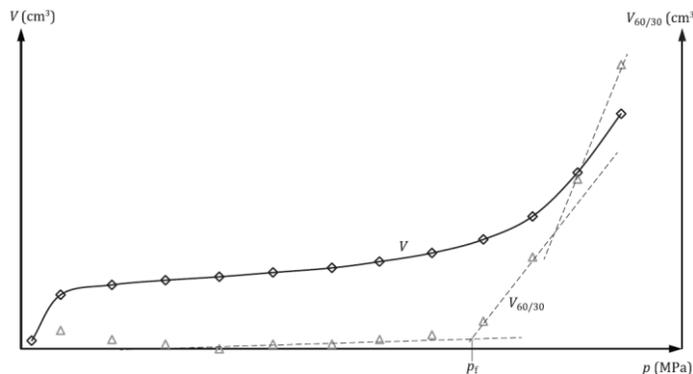


Figure D.4 — Détermination de la pression de fluage pressiométrique

► Interprétation : 57%

- Respect des critères de la norme N -1
- Critère visuel p_1/p_2 pour la plage élastique
- Rapport E_M/P_{LM}

- $p_2 < p_f$ indiqué par 43%
- 2 se préoccupent de la cohérence de l'essai avec le contexte lithologique

► Document transmis au client

- Log pressiométrique :
 - 91% : Description de la lithologie, niveau(x) d'eau, p_{LM}^* , E_M
 - 70%: p_f^* , E_M/P_{LM}^*
 - 9%: ne fournit pas de log pressio
- Courbes pression-volume fournies dans 28% des cas, 62% quand elles sont demandées à la consultation
 - Rappel P 22 476-4 (2015)

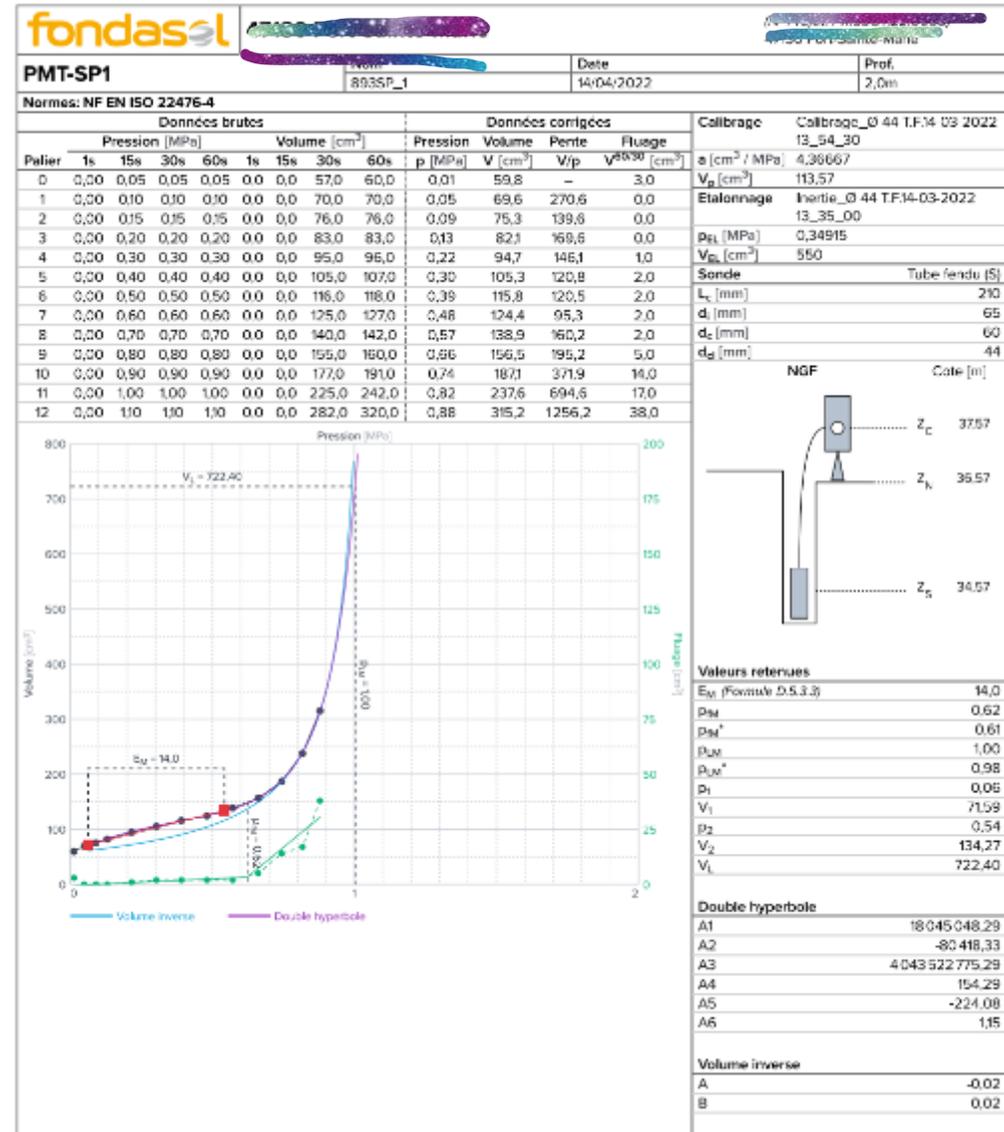
Le rapport de terrain doit contenir l'ensemble des données collectées sur le terrain (voir [5.4](#) et [6.1](#)).

Le rapport de terrain doit permettre d'identifier l'opérateur responsable ([6.1.1](#) et [6.1.2](#)).

Un exemple de rapport de terrain pour un essai pressiométrique unique est disponible à l'[Annexe F](#).

► Données minimale requises (ISO 22 476-4 2015)

- la référence au présent document (ISO 22476-4:2021);
- le type de contrôleur pression-volume utilisé pour l'essai: A, B ou C;
- le numéro de sondage dans lequel l'essai pressiométrique a été réalisé;
- la cote altimétrique de l'essai ou sa profondeur depuis le sommet du sondage ou le haut du tubage;
- le type de technique et d'outil de forage utilisé pour réaliser la cavité et les cotes altimétriques supérieure et inférieure de la passe de forage;
- l'heure de la fin de formation de la cavité pressiométrique, à la minute près;
- le type, la marque et le numéro de série du CPV, et de l'enregistreur de données s'il est dissocié du CPV;
- les informations sur les contrôles récents effectués sur les appareils de mesure et de contrôle utilisé (voir B.1);
- l'heure de début de l'essai, à la minute près;
- le type de sonde utilisé (voir 4.2) et ses caractéristiques (type de gaine, protection rigide, tube fendu, etc.) ainsi que les résultats de l'essai d'étalonnage de la dilatation propre et de la résistance propre, tels que définis à l'Annexe B;
- la pression différentielle ($p_r - p_g$) à la côte altimétrique du CPV;
- un tableau des relevés de la pression et du volume du liquide à 1 s (types B et C uniquement), 15 s, 30 s et 60 s à chaque palier de pression de chargement;
- les coordonnées pV de chaque point permettant de tracer la courbe pressiométrique corrigée;
- tous les incidents survenus pendant l'essai (tels que l'éclatement de la sonde);
- les cotes altimétriques du sommet du sondage pressiométrique, z_N , et des capteurs de pression, z_c , représentés en E.2 et à la Figure D.1;
- les cotes altimétriques du niveau de fluide de forage le cas échéant et de la nappe phréatique, si celle-ci est connue, z_g ;
- le nom de l'organisme procédant au sondage pressiométrique, c'est-à-dire au forage et aux essais;
- la courbe pressiométrique corrigée et les méthodes utilisées pour les corrections de résistance propre et de dilatation propre;



► Attente des utilisateurs

- Améliorer la qualité des essais (86%)
 - Améliorer le matériel standard
 - Matériel plus facile à manipuler et à monter
 - Retour d'expérience souhaité dans certains terrains : argiles gonflantes, sables et graviers sous nappe

- Améliorer la qualité du forage (71%)
 - Systèmes d'auto-forage
 - Matériels plus faciles à utiliser
 - Meilleure formation des opérateurs (formation diplômante souhaitée)

- Améliorer l'interprétation (67%)
 - Représentativité du module avec une sonde foncée, utilisation du module sécant..

► Conclusions de l'enquête

- L'essai est sensiblement le même que celui décrit par Ménard il y a 60 ans
- Une attente de l'amélioration de la qualité des matériels: précision des mesures,...
- La qualité du trou de forage reste la difficulté principale pour un essai de bonne qualité
- Intérêt de réaliser des campagnes d'essais croisées avec des protocoles spécifiques
- Utilisation de la norme NF EN ISO 22 476-4 (2015), améliorations souhaitables:
 - (re)définition de la pression limite ou redéfinition de critères d'arrêt en phase avec la pratique
 - Définition de la pression de fluage p_{fM}
 - Utilisation des modules mesurés: cyclique (cf 22476-5), sécant
 - Besoins de formation des opérateurs

- ▶ 17 réponses (2017)
- ▶ Quelques points sensibles:
 - Essai de dilatation propre de l'appareillage:
 - préciser les points de calcul de la pente de la droite de correction des volumes
 - Influence sur le calcul des modules en terrain raide

 - Choix des points p1 et p2 pour le calcul du module:
 - 3 outils, 3 choix différents!

 - Calcul de la pression limite:
 - 3 outils, 3 extrapolations différentes!

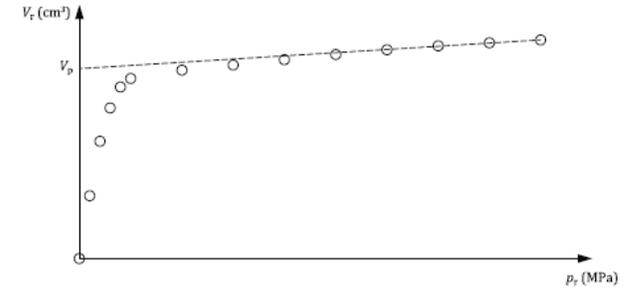


Figure B.2 — Étalonnage de la dilatation propre — Exemple

SONDAGE A- 29m										
CALCUL	OUTIL D'INTERPRETATION	P _{LM} - MPa	P _{LM} * - MPa	P _{IM} - MPa	E _M - MPa	p1 - MPa	p2 - MPa	Pel (MPa)	a (cm ³ /MPa)	Vc (cm ³)
12		12.6	12.2	8.03	156	0.99	5.07	0.33	3.68	143
8B		15.2	14.8	5.10	130	1.01	5.10	0.36	2.42	151
1C		<u>8.05</u>	<u>7.68</u>	8.04	119	1.00	7.10	0.32	3.03	147

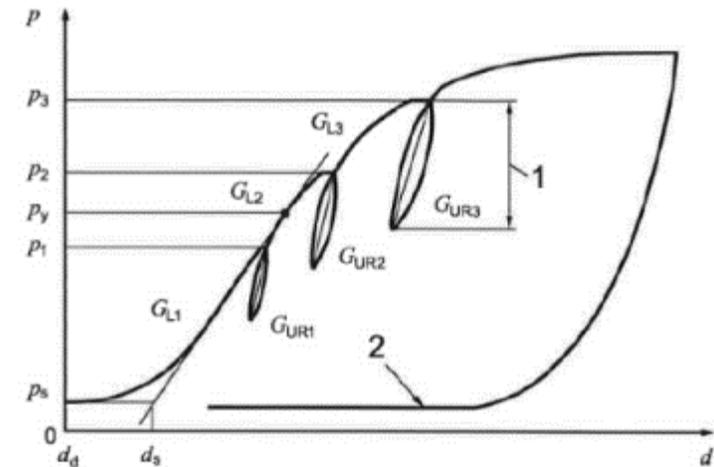
SONDAGE B- 21m										
CALCUL	OUTIL D'INTERPRETATION	P _{LM} - MPa	P _{LM} * - MPa	P _f - MPa	E _M - MPa	p1 - MPa	p2 - MPa	Pel (MPa)	a (cm ³ /MPa)	Vc (cm ³)
12		4.16	4.00	2.34	22.4	0.28	2.34	0.30	3.47	224
8B		4.32	4.14	2.37	19.2	0.30	2.37	0.35	2.59	229
1C		3.93	3.74	2.48	20.6	0.28	2.35	0.38	2.70	228

► 5 campagnes d'essais

- Objectifs: apprécier quelle sont les influences des protocoles de forage (outil, fluide, vitesse...) et le type de sonde et son équipement sur la qualité des mesures

► Calcaires (Gouvieux): Fondasol, Fugro, Apageo) - site EDF

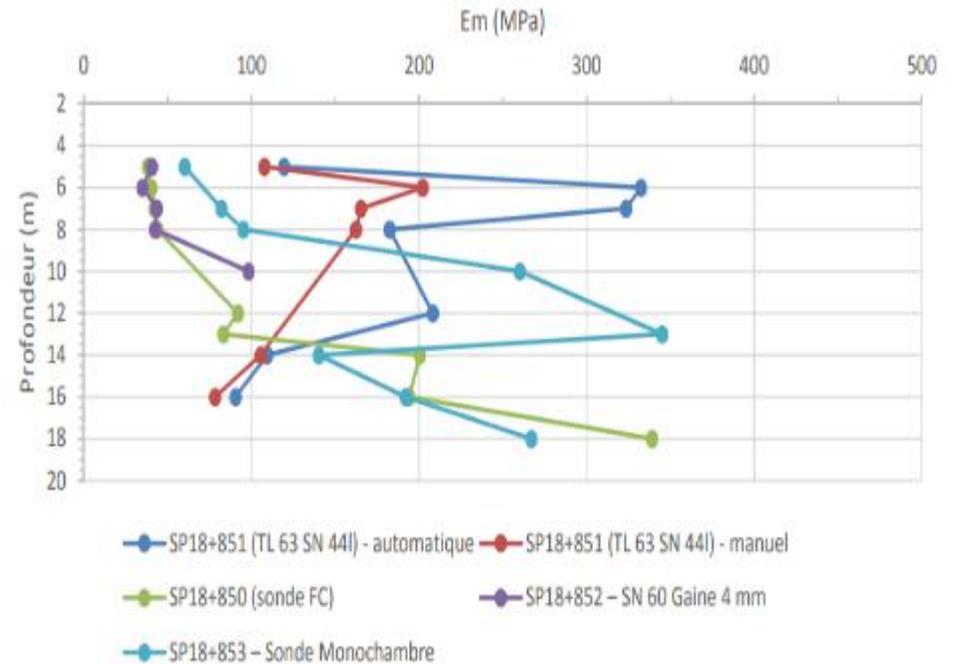
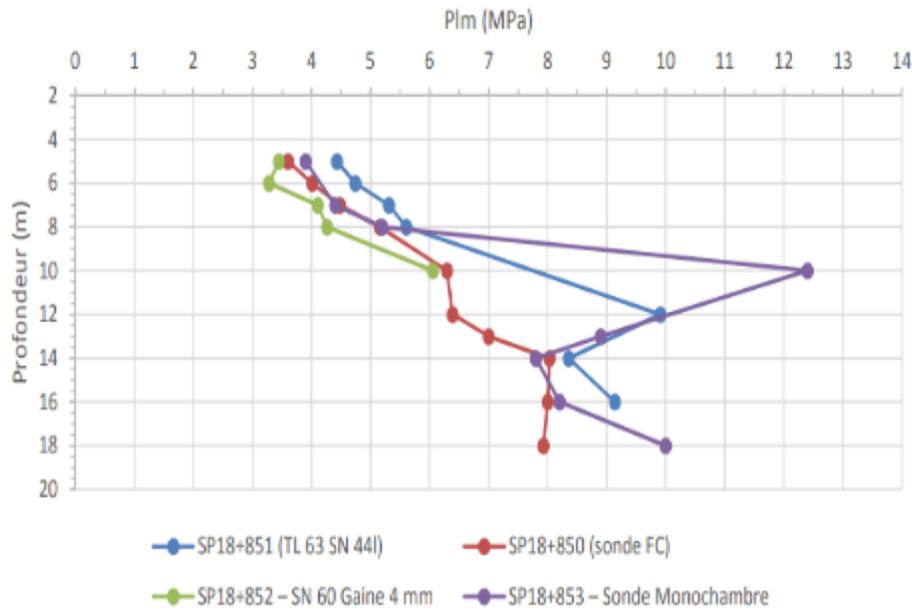
- Protocole B norme ISO 22 476-5 essais dilatométriques
- 6 carottés à 4m diamètres 101, 66 et 46mm- 12 essais
- Résultats proches pour le 1^{er} module de chargement ($0.5 < p < 1,5$ MPa)



► Molasse tertiaire (Toulouse): Ginger Cebtp

- Campagne Tisséo – 3^{ème} ligne métro
- Comparer p_{lM} et E_M avec

- Sonde LATHP dite Francis COUR – Contrôleur PREVO – enregistreur BAP – logiciel ExPRS
- TF63 sonde 44 longue – Contrôleur HYPERPAC – enregistreur GeoBOX – logiciel GeoVISION
- SN60 - Contrôleur HYPERPAC – enregistreur GeoBOX – logiciel GeoVISION
- Sonde Monochambre FUGRO – enregistreur logiciel FUGRO – dépouillement FUGRO



► Sables dunaires(Messanges): Fondasol

- 2 campagnes en 2019 et 2021
- Sonde nue gaine 3 mm et tube fendu cellule longue, et tube fendu cellule courte
- L'utilisation de tubes fendus dans un préforage affecte sensiblement les valeurs de modules calculés si on utilise la méthode de la gaine souple (§ D.5.2.2 de la norme NF EN ISO 22476-4:2015)
- il est donc vivement recommandé de modifier cette pratique et d'utiliser la méthode du tube fendu.

► Limons (Plancoët): Geotec

- Résultats difficiles à exploiter

► Argiles molles (Cran): Ginger Cebtp