

Module pressiométrique Ménard : aides pratiques à l'interprétation

How Secant Modulus Curve and two Other Tools Help with Ménard Pressuremeter Interpretation

X. Caquineau
Expert, Meylan, France

B. Dumolard
TPDF / G5-ISSIM, Grenoble, France

RÉSUMÉ : Deux paramètres de résistance et de déformabilité sont déduits d'un essai pressiométrique Ménard : la pression limite p_{LM} et le module pressiométrique E_M . Alors que l'évaluation de la pression limite est directement accessible à la vue des courbes corrigées, l'appréciation du module pressiométrique nécessite des calculs et une bonne connaissance des conditions d'essai. Cette contribution propose de compléter les courbes corrigées conventionnelles par la représentation systématique de la courbe des modules sécants calculés entre deux paliers successifs de pression. Bien adaptée au contrôle visuel immédiat après dépouillement automatique, cette courbe des modules sécants fiabilise le choix de la valeur représentative du module pressiométrique E_M et assure la cohérence des valeurs finales admises. Deux outils supplémentaires ($E_M/2$ et courbes tangentes au fluage) sont proposés dans les cas où le module pressiométrique et le fluage sont difficiles à caler visuellement à partir des courbes corrigées.

ABSTRACT : The Ménard pressuremeter limit pressure and modulus are the most significant parameters derived from a pressuremeter test. On the one hand, limit pressure is easy to determine with corrected pressuremeter and creep curves, depending on formula. On the other hand, pressuremeter modulus needs visual help to be accurately interpreted after corrections and automatic data analysis. The secant modulus curve from two adjacent pressure data points is the best manual controlled solution offered by the authors to be added to each test analysis and report. Even if the borehole is not perfect, the secant modulus curve is useful to determine easily final Ménard modulus. However, it is only framework for discussion between operators and data analysts to improve test quality conditions of pressuremeter logs. Two additional aids are suggested to determine Ménard modulus and creep limit if these are questionable from conventional corrected data curves.

MOTS-CLES : pressiomètre, module de déformation Ménard, courbe des modules sécants.

KEYWORDS : pressuremeter, Ménard modulus, secant modulus curve.

1 ANALYSE CONVENTIONNELLE D'UN ESSAI

L'essai pressiométrique Ménard sans cycle, avec forage préalable autour de 60 mm ou par fonçage direct, est utilisé en géotechnique depuis plus d'un demi-siècle pour obtenir quatre paramètres conventionnels : p_{LM} pression limite, p_f pression de fluage, E_M module pressiométrique, sous sa forme usuelle « gaine souple » et le rapport E_M/p_{LM} . Ce dernier caractérise l'état de consolidation ou d'altération/fracturation et révèle des éléments de l'histoire géologique du sol étudié.

Les courbes sont construites à partir des relevés pression-volumes de l'essai conventionnel de sept à douze paliers d'une minute à pression constante.

Ceci aboutit de six à une dizaine de segments de droite reliant les valeurs de pressions-volumes à chaque palier, entre les volumes V_{30} (à trente secondes) et V_{60} (à soixante secondes).

Les paramètres sont déterminés à partir des valeurs corrigées formant les courbes dites : pressiométrique $p = f(V_{60})$ et de fluage $p = f(\Delta V_{60/30})$. Les formulations des paramètres ont varié dans le temps et selon les auteurs et sont encore discutées aujourd'hui (Baud et al. 2013).

Les courbes corrigées sont divisées en trois groupes ou phases d'état du sol (contact avec la sonde de mesure, état pseudo-élastique, état plastique) dont les limites supérieures des deux premières phases permettent de déterminer le module E_M .

La première phase de mise en contact est caractérisée par un fluage élevé et décroissant pour un forage préalable sans refoulement du sol. Si la sonde lors de sa mise en place est

forcée directement ou après forage d'un trou pilote, cette phase présente un fluage nul à très faible selon l'état du sol et le niveau de dissipation des pressions interstitielles.

La mise en contact pour un essai courant comporte au moins deux paliers de pression, un seul pour un essai idéal.

L'augmentation du nombre de paliers pour la mise en contact peut aboutir à réduire ou à masquer complètement la phase suivante pseudo-élastique.

La deuxième phase pseudo-élastique est caractérisée par un fluage normalement faible, V_{60} étant de quelques centimètres cubes plus élevé que V_{30} (0 à 5 cm³ pour une roche, 5 à 15 cm³ environ pour un sol). Elle se termine par la pression de fluage p_f marquée théoriquement par une rupture de pente nette sur la courbe de fluage.

La phase pseudo-élastique comporte normalement trois à six paliers successifs servant à calculer le module pressiométrique Ménard E_M .

Pour un essai comportant moins de sept paliers, l'exploitation usuelle est souvent incomplète, voire impossible.

La troisième phase plastique est caractérisée par des valeurs de fluage augmentant progressivement à chaque palier de pression, et si cette phase est présente, elle permet de déterminer la pression limite p_{LM} .

En pratique, un essai courant comporte pour les trois phases entre sept et seize paliers.

2 PLAGE INITIALE POUR LE MODULE : P_{1i} ET P_{2i}

Les pressions p_{1i} et p_{2i} bornant la plage de calcul du module sont déterminées (ISO 2009, AFNOR 2012, aux figures D.2) :

- à partir de la plus petite valeur positive de la pente m_E du segment entre les valeurs des paliers (p'_E ; V'_E) et (p_E ; V_E),
- puis en sélectionnant les segments adjacents entre deux paliers successifs qui satisfont à une pente de la courbe pressiométrique m_i inférieure ou égale à $\beta \cdot m_E$ avec un coefficient β calculé pour un ajustement initial correspondant à une tolérance δV de 3 cm³ (voir Eq. 1).

$$\beta \cdot m_E = \left[1 + \frac{1}{100} \cdot \frac{p'_E + p_E}{p'_E - p_E} + \frac{2 \cdot \delta V}{V'_E - V_E} \right] \cdot \frac{(V'_E - V_E)}{(p'_E - p_E)} \quad (1)$$

La pente sécante m_i entre deux paliers successifs est calculée et représentée dans les tableaux détaillés des résultats d'essais. Elle correspond à une valeur mathématique et n'a pas de représentation pour celui qui interprète l'essai.

À l'inverse, les modules sécants représentent la variation du module tout au long de l'essai depuis la mise en contact jusqu'à la rupture. Plus la pente de la courbe pressiométrique est faible, proche de l'horizontale, plus le module est élevé (voir Fig. 1).

Si nécessaire, la tolérance δV est augmentée pour obtenir β supérieur à 1 et au moins trois segments successifs avec m_i inférieur ou égal à $\beta \cdot m_E$.

Il n'y a pas de règle définie sur la tolérance δV maximale, même indicative pour une détermination analytique du module initial. Plus δV est augmentée au-delà de 3 cm³, plus les modules sécants des nouveaux paliers sélectionnés diminuent et la valeur « vraie » du module devient délicate à interpréter : plusieurs choix sont possibles.

Les coordonnées (p_{1i} ; V_{1i}) du premier palier sélectionné sont proches du début de la phase pseudo-élastique : p_{1i} est inférieure ou égale à p_E (voir Eq. 1) et supérieure ou égale à p_1 , pression choisie en final pour déterminer la pression limite p_{LM} et pour calculer le module Ménard E_M (voir Eq. 2).

Les coordonnées (p_{2i} ; V_{2i}) du dernier palier sélectionné sont proches ou égales à celles de la pression de fluage finale p_f , et p_{2i} est supérieure ou égale à p'_E .

Les modules Ménard conventionnels sont usuellement calculés pour tous les modèles de sonde à partir de la formule dite « gaine souple » (voir Eq. 2) avec un coefficient de Poisson ν pris égal à 0,33 et V_c volume de la cellule centrale de diamètre d_c et de longueur l_c (ISO 2009, AFNOR 2012).

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

Une formule variante a été proposée pour les sondes avec tube fendu (voir Eq. 3) avec V_t volume de la cellule centrale y compris le tube fendu de diamètre d_{ci} et de longueur l_c (ISO 2009, AFNOR 2012)

$$E_M = 2(1 + \nu) \sqrt{\left(V_c + \frac{V_1 + V_2}{2} \right) \cdot \left(V_t + \frac{V_1 + V_2}{2} \right)} \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)} \quad (3)$$

3 COURBE DES MODULES SECANTS

La représentation des modules successifs entre deux paliers de pression (i ; $i+1$) est appelée ici courbe des modules sécants (voir Fig. 1), bien qu'il existe autant de courbes de modules sécants que de combinaisons entre paliers : (i ; $i+1$), (i ; $i+2$), (i ; $i+3$), etc... Parmi ces combinaisons, les valeurs p_{1i} et p_{2i} aboutissent au module initial E_{Mi} proche et inférieur ou égal au module maximum calculé entre les paliers p_E et p'_E .

Les modules sécants $E_{i/i+1}$ sont calculés directement d'après les points expérimentaux en remplaçant dans les formules (voir

Eq. 2 et 3) (p_1 , V_1) et (p_2 , V_2) par (p_i , V_i) et (p_{i+1} , V_{i+1}). Ces modules sécants (différents des modules tangents, Dhoub et al 2002) entre deux paliers successifs devraient figurer dans les graphiques, car leur visualisation est très significative de tout incident d'essai, de forage, ou d'histoire du sol étudié.

Dans la phase pseudo-élastique, la courbe des modules sécants permet de délimiter une plage de segments dans lequel se trouve le module pressiométrique E_M et de caler ainsi le choix avec fiabilité (voir Fig. 1).

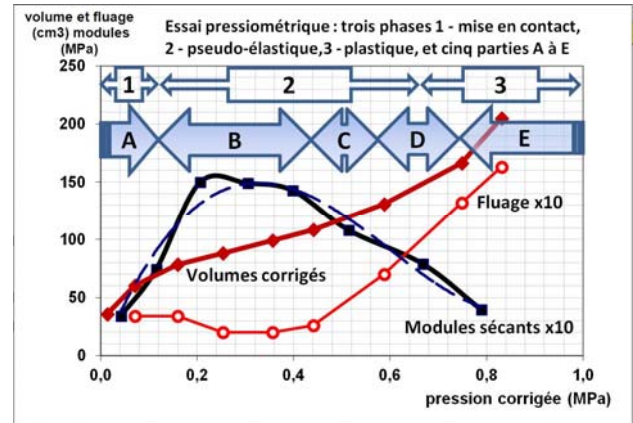


Figure 1. Courbe des modules sécants associée à la courbe de tendance, avec les trois phases ou les cinq parties d'un essai.

4 ANALYSE PHYSIQUE D'UN ESSAI

Le découpage d'un essai comprend cinq parties A à E identifiables sur les trois courbes pressiométriques représentées : volumes corrigés V_{60} , fluage, modules sécants (voir Fig. 1). Ces parties forment un redécoupage des trois groupes conventionnels (mise en contact – pseudo-élastique – plastique) qui ne sont pas toujours complets dans un essai courant.

A : en forage préalable. Mise en contact progressive avec la paroi du forage de la cellule centrale. Evacuation de part et d'autre de la sonde des fluides et sols remaniés, et « remise en place » des éléments grossiers éventuels déchaussés. La valeur du module sécant très faible au début augmente au fur et à mesure de la diminution du fluage.

Abis : en sonde battue ou foncée directement. Après attente pour dissipation des surpressions interstitielles, le module sécant est souvent faible au départ avec un fluage élevé du fait du sol remanié autour de la sonde. Avec l'élimination ou la plastification progressive des sols remaniés et la mise en « butée » du sol refoulé autour de la cellule centrale lors de sa mise en place, le module sécant devient rapidement très élevé presque sans fluage, puis ce module chute brutalement en même temps que le fluage augmente de quelques cm³.

B : après A au-delà de p_1 soit après un à trois paliers, voire plus dans les sols fragiles ou testés sans précaution, le module sécant tend à se stabiliser au fur et à mesure de la mobilisation de la résistance élastique du sol. Plus le sol est homogène et la paroi idéale, plus la courbe des modules sera aplatie et horizontale, autour d'un maximum absolu entre p_E et p'_E .

Après Abis la courbe des modules a une pente descendante plus faible, au mieux présentant un palier, le maximum absolu ayant été atteint avant p_1 dans la partie Abis.

Bbis : en autoforage SBP, le module sécant initial est élevé et diminue progressivement, la sonde étant dès le démarrage de l'essai en contact avec la paroi. La partie A de la courbe n'est pas présente (Reiffsteck et al. 2012).

C : en approchant du fluage, la courbe s'infléchit vers le bas, formant avec A et B une courbe en « cloche » de type gaussienne ; avec Abis et B une courbe concave en « toboggan ».

D : au fluage. Le sol résiste de moins en moins à l'augmentation de pression et le module chute fortement, la courbe « idéale » change de courbure et devient convexe.

E : au-delà du fluage et vers la rupture. Au fur et à mesure de l'extension de la couronne de sol déformé en plasticité, le module continue de diminuer progressivement.

5 ESSAI PRESSIOMETRIQUE ET ANOMALIES

La liste des causes possibles d'anomalies est au moins aussi longue que la liste des méthodes recommandées pour réussir un essai idéal :

- « si nécessaire avec tubage à l'avancement ou avec une boue de forage adaptée sous le niveau de la nappe »
- « avec un trou de forage réalisé pour chaque essai »
- avec cavité « aussi lisse que possible et que son diamètre soit aussi constant que possible »
- sans remaniement ou succion, ni augmentation ou diminution du diamètre en forage préalable
- avec attente de la dissipation complète des surpressions en sonde forcée ou battue
- avec la bonne sonde pour chaque terrain, quitte à en changer autant de fois que nécessaire
- avec des étalonnages à chaque changement de sonde.

Selon les conditions géologiques des dépôts d'une part, dans un contexte de temps et de budget contraints d'autre part, enfin avec des profondeurs fixées à l'avance, ce sont par expérience jusqu'à 50 à 80 % des essais qui présentent des anomalies plus ou moins marquées. Ces anomalies sont bien visibles par des « pics » positifs ou négatifs par rapport à la courbe idéale de forme gaussienne des modules sécants. Elles sont pour partie l'empreinte fidèle d'innombrables combinaisons d'histoires géologiques et d'aquifères qui se mêlent aux conditions de forage et d'essai. C'est bien cette empreinte qui est retranscrite dans les anomalies de la courbe des modules, permettant de la corriger en connaissance de cause, et de rattraper un essai « anormal » ou presque « ininterprétable ». La condition est de toujours avoir correctement la seconde partie de cette courbe c'est-à-dire la partie descendante.

Déjà la variation du pas de pression autorisée deux fois au cours d'un essai revient à modifier la vitesse relative de déformation du sol, ce qui influe sur la pente du segment. Ceci se traduit par un décalage de la courbe des modules (voir Fig. 1).

Comme pour l'analyse visuelle d'un échantillon ou d'une coupe de sol, et que ces pics soient d'origine naturelle ou créés par le forage ou l'essai, il est essentiel de comprendre leur origine pour les prendre en compte ou au contraire les ignorer. Ceci permet d'aboutir à la décision finale selon qu'ils apparaissent prépondérants ou négligeables dans le comportement du sol.

Il faudrait même ajouter « selon le projet », comme il était d'usage avec certains logiciels anciens calés sur un seul choix de p_1 et p_2 en privilégiant soit une interprétation en module (fondations superficielles et tassement), soit en pression limite (fondations profondes et frottements). Espérons qu'il ne subsistera plus de telles interprétations estampillées « selon la norme », comme celles qui sont faites sans étalonnage de sonde ou d'appareillage !

6 ANOMALIES ET COURBE DES MODULES SECANTS

Les cas les plus fréquents présentés ci-après montrent l'influence des anomalies sur la courbe-type idéale de forme « gaussienne » des modules sécants.

Et les bornes finales p_1 et p_f du module pressiométrique E_M sont ainsi contrôlées et fiabilisées avec l'aide simultanée de l'analyse visuelle des trois courbes, pressiométrique, de fluage, et des modules sécants.

6.1 Sols hétérogènes

Courbe des modules, avec des pics hauts (points durs : galets) ou bas (faiblesses : sols mélangés, vides, fissures) à prendre en compte ou non pour le module final. (Fig. 2 avec $E_M = 5$ MPa : l'expérience permet de reconstruire la courbe « gaussienne » équivalente en trait continu grisé après élimination visuelle du pic dans la courbe des modules sécants). Peut se confondre avec des anomalies de réglage de la pression différentielle en cours d'essai avec des cellules de garde sur ou sous gonflées en azote.

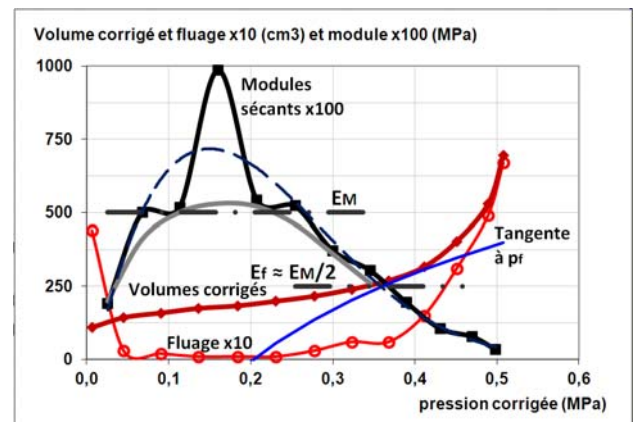


Figure 2. Anomalie ponctuelle peu visible sur la courbe pressiométrique, bien visible sur la courbe des modules.

6.2 Eboulement de paroi

Courbe des modules en « horizontale à pics ». L'analyse est plus précise dans la deuxième moitié de la phase pseudo-élastique, en général plus « calme », en lien avec la courbe de fluage. Valable aussi en sol sableux ou sablo-graveleux comme dans la figure, où dans ce cas le fluage n'est pas toujours apparent sur la courbe des modules (Fig. 3, avec $E_M = 20$ MPa)

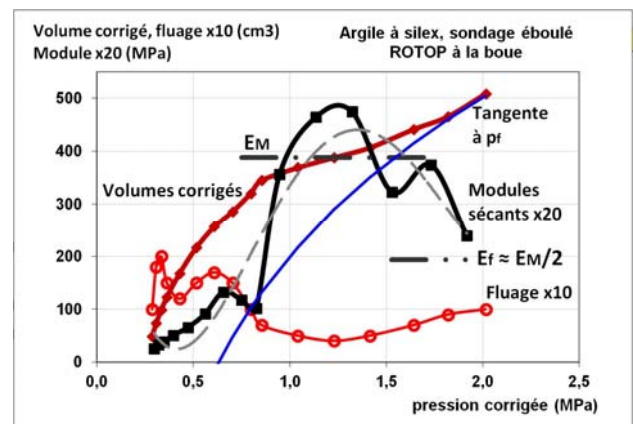


Figure 3. Forage éboulé avec influence visible du mélange argile sableuse (1^{ère} partie de l'essai) et silex (2^{ème} partie)

6.3 Forage préalable trop large

Essai non rattrapable si sa courbe est confondue trop longtemps avec la courbe d'étalonnage de la sonde. L'essai est rattrapable s'il « décolle » de la courbe d'étalonnage, et si la seconde partie de la courbe-type gaussienne apparaît (Fig. 4 avec $E_M = 1,2$ MPa). Cela est possible s'il reste suffisamment de volume disponible pour atteindre le fluage !

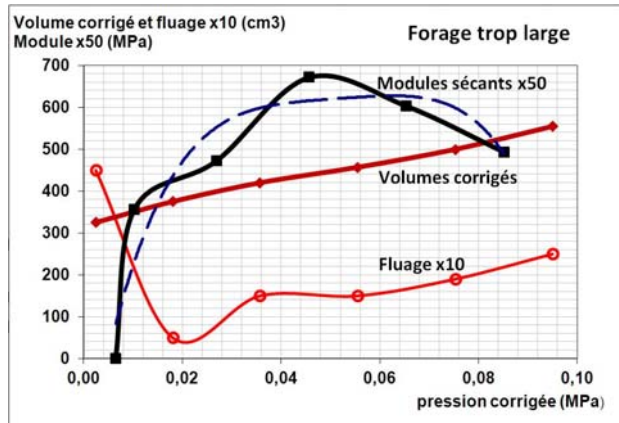


Figure 4. Forage trop large

6.4 Forage préalable trop étroit, sol gonflant, sonde forcée

L'essai démarre avec des volumes faibles, inférieurs à 100 cm³, et après un pic très prononcé, la courbe des modules sécants retrouve son évolution normale en fin de phase pseudo-élastique (voir Fig. 5 la droite en tiré-point discontinu « $2 E_f$ et non E_M ») montre le maximum de la valeur E_M pouvant être prise en compte, ici $E_M = 9$ MPa). Rattrapable aussi si l'essai « décolle » de la courbe d'étalonnage comme en 6₃. Recréation possible « à rebours » de la première partie de la courbe de tendance équivalente (tirets grisés discontinus), manquante ici, de forme « type gaussienne », en continuant vers la gauche le tracé descendant à partir de la valeur de E_M .

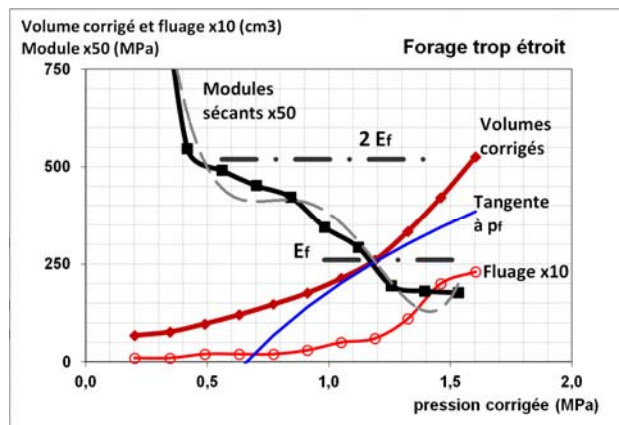


Figure 5. Forage trop étroit ou sonde forcée.

6.5 Sols fragiles

Ce cas peut être rencontré si les éléments sont peu imbriqués les uns dans les autres et à indice des vides élevé : éboulis « crus », remblai non compacté à éléments grossiers, moraine sableuse délavée par les circulations d'eau. Il peut être aussi rencontré lors d'un lessivage du forage. Dans ce cas, le sol résiste jusqu'à un fluage net et brutal, bien visible sur la courbe des modules qui s'effondre, suivi d'une autre plage horizontale. Une attention particulière est à porter ensuite aux valeurs p_f et p_{LM} à ne surtout pas surestimer. Ce cas est à analyser avec les aides

complémentaires ci-après, car peuvent co-exister deux modules E_M (avant effondrement et après réarrangement de structure).

6.6 Importance de l'analyse de la seconde partie de l'essai

Les exemples ci-dessus montrent que l'essai est affecté d'anomalies le plus souvent dans la première partie ascendante de la courbe des modules sécants. La seconde partie peut permettre de recréer « à rebours » la première partie si celle-ci est trop affectée d'anomalies. Pour cela, l'essai doit être poussé le plus loin possible en volume au-delà du fluage vers la rupture (voir Fig. 5 et paragraphe 6₄)

6.7 Approche complémentaire $E_f \approx E_M / 2$ ou $E_M \approx 2 E_f$

En première approche ou en contrôle final visuel, il est possible de délimiter la valeur du module pressiométrique à partir de la valeur du module sécant E_f à la pression de fluage. Le module E_M se situe dans un grand nombre de sols autour de :

$$E_M \approx 2 E_f \quad (4)$$

Cette particularité obtenue à partir de l'observation des courbes des modules sécants et dont le fondement reste à préciser, a été validée par l'analyse d'essais de chargement en vraie grandeur menés à la rupture dans différentes natures et conditions de sol, et pour différents encastresments.

6.8 Tangente de la courbe corrigée à la pression de fluage

Un autre calage de contrôle également issu de l'expérience et de l'observation peut être obtenu à partir de la courbe pressiométrique corrigée représentée en coordonnées fixes (log p, V) : la pression de fluage est généralement proche de la pression pour laquelle elle tangente une droite de coordonnées (K, 0 ; 10K, 1000), et jamais au-delà (voir Fig. 6).

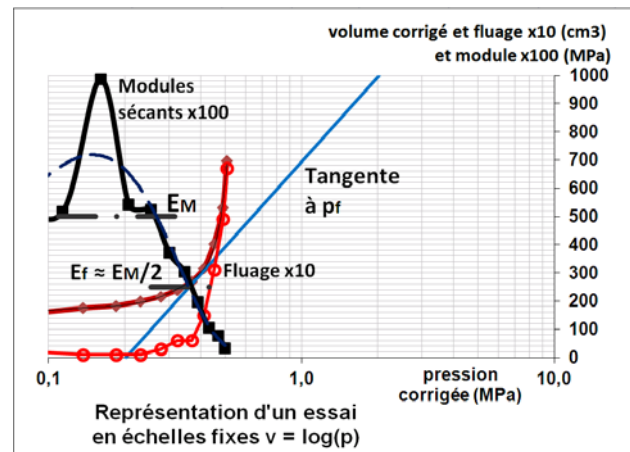


Figure 6. Essai de la figure 2 représenté en échelles fixes (log p, V) avec les aides proposées dans cet article : courbe des modules, $E_f = E_M/2$, tangente au fluage.

En système de coordonnées classiques (p, V), avec p et K en MPa et V en cm³, l'équation de la courbe équivalente à cette droite est bien représentée (voir Fig. 2, 3 et 5) par :

$$V = 433,75 \ln(p) - 434,29 \ln(K) + 1000 \quad (5)$$

Ceci constitue une aide supplémentaire, en particulier lorsque la rupture de pente de la courbe de fluage est difficile à déterminer, soit parce qu'il n'y a pas de véritable rupture de pente (sables) soit parce que la rupture de pente est progressive (argiles), soit parce qu'il y a deux ruptures de pente (sols

hétérogènes ou fragiles, soit parce que l'essai est réalisé « à cheval » sur deux sols, ou encore lorsque par crainte du risque d'éclatement de la sonde l'essai a été interrompu trop tôt après la pression de fluage (exemple voir Fig. 7, sans les aides $E_f = E_M/2$ et la courbe décrite en Eq. 5, il est plus difficile de repérer que l'essai a été arrêté juste après le fluage atteint entre 0,7 et 0,8 MPa avec $10 < V_{60}-V_{30} < 15 \text{ cm}^3$. La courbe des modules passe au-dessous de $E_f = 7 \text{ MPa} = E_M/2$ pour $p = 0,7 \text{ MPa}$, alors que la courbe de fluage ne présente pas de rupture de pente dans la deuxième moitié de l'essai). La courbe des modules permet ici très rapidement de valider cet essai sans hésiter pour le module et la pression de fluage, et de regretter qu'il n'ait pas été poursuivi et mené à son terme pour approcher ou atteindre p_{LM} .

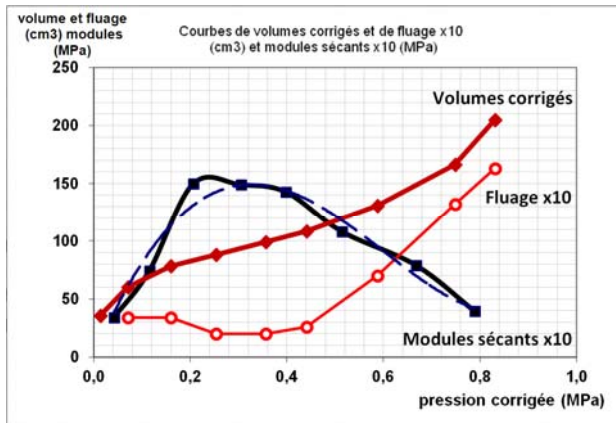


Figure 7. Essai arrêté au début de la phase plastique (Fig. 1).

6.9 Essais à pression appliquée inférieure à 5 MPa

En sols moyennement compacts, la correction de volume avec le coefficient α de dilatation n'est pas nécessaire selon les normes. Mais sans règle stricte, l'opérateur interprétant les essais correspondants est privé de l'assurance d'un circuit conforme, sans fuite ni défaut au montage ($\alpha < 6 \text{ cm}^3/\text{MPa}$). Quelle est l'erreur - inconnue sans étalonnages - en cas de circuit non-conforme ?

Remplacer dans les tableaux de résultat les pentes des segments par les modules sécants et représenter graphiquement la courbe des modules permet d'accéder à l'analyse visuelle directe demandée dans les normes.

Et dans certains cas lorsque la plage pseudo-élastique est trop réduite ou inexploitable, et au-delà d'une limite d'un δV trop important restante à fixer, le calage avec la courbe des modules permet de retrouver le module « à rebours » qui doit être contrôlé avec le rapport E_M/p_{LM} à partir d'essais comparables de qualité, et à l'aide des outils complémentaires précédents (voir Fig. 5).

6.10 Essais à pression appliquée supérieure à 5 MPa

Pour les essais hors norme poussés à plus de 5 MPa, la précision de la plupart des appareillages en service rend délicat la construction et le calage de la courbe des modules en domaine strictement positif, et demande une grande rigueur dans les étalonnages, en particulier la résistance propre de l'appareillage qui n'est plus linéaire.

L'interprétation est ici plus en termes d'altération et de fissuration que de tassements, les modules dépassant largement 100 MPa.

La visualisation de l'évolution de la courbe des modules sécants permet également de valider l'interprétation normalisée classique dans la plage de pressions jusqu'à 5 MPa (voir Fig. 8, l'évolution des modules est bien visible sur la courbe des

modules sécants, indétectable sur la courbe corrigée très plate. Une interprétation avec $E_M > 800 \text{ MPa}$ pour $p < 5 \text{ MPa}$ est valide du moment que l'essai est enregistré et que les étalonnages de la sonde et de l'appareillage ont été réalisés avec une très grande rigueur).

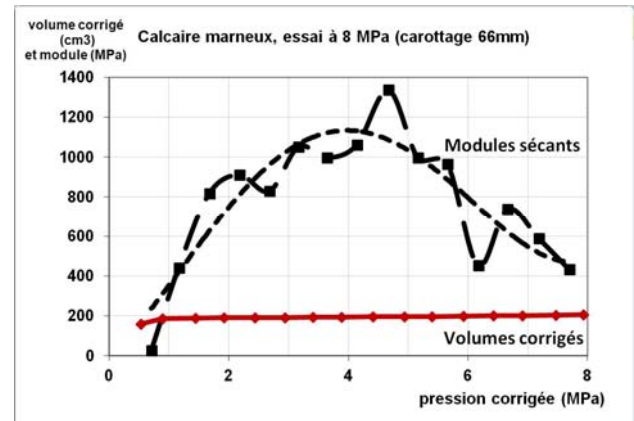


Figure 8. Courbe des modules sécants associée à la courbe de tendance dans un essai à 8 MPa.

6.11 Essais représentés en planche-contact

Enfin en complément de la représentation habituelle synthétique des sondages pressiométriques avec les valeurs E_M , p_f , p_{LM} , et E_M/p_{LM} et les observations associées, le géotechnicien responsable de l'interprétation des essais peut joindre une planche-contact représentant les courbes corrigées des essais en échelles fixes, par exemple en coordonnées $\log p_i$ de 0,1 à 10 MPa et V_i de 0 à 1000 cm³.

Cette planche-contact intégrant la courbe des modules sécants entre paliers et la méthode de mise en place de la sonde valorise fondamentalement l'interprétation. Sans reprendre l'ensemble des données de l'essai d'un compte-rendu détaillé de chantier, elle permet néanmoins à toute autre personne avertie de relire immédiatement l'histoire du forage et de l'essai avec une fiabilité que la représentation brute actuelle des seules valeurs conventionnelles retenues en final efface sans possibilité d'analyse et de réinterprétation.

7 FIABILITÉ DU RAPPORT E_M/p_{LM}

Avec un module pressiométrique fiable, il est possible de valoriser le rapport E_M/p_{LM} très significatif de l'état de consolidation du sol et la profondeur de passage d'un type de formation géologique à une autre (voir Tab. 1)

Tableau 1. Exemple de niveau de passage entre deux couches géologiques différentes.

Profondeur en m	Rapport E_M/p_{LM}	Contexte géologique
1	5.2	Alluvions modernes
2	4.8	
3	5.8	
4	8.8	Alluvions anciennes
5	9.5	
6	7.9	
7	10.1	

La succession des valeurs de ce rapport E_M/p_{LM} suffit à une interprétation utile et significative. Car il n'est pas rare à la

lecture de sondages diffusés aujourd'hui de trouver des rapports E_M/p_{LM} variant anormalement entre 5 et 80... dans une même formation et à une même profondeur !

8 CONCLUSION

Les réflexions précédentes sont le fruit de dizaines d'années d'expérience, de milliers de dépouillements d'essais sur toutes natures de sols, d'utilisation de plusieurs méthodes et outils de dépouillements, à la main sur la plage linéaire avec les abaques historiques, ou automatiques et informatisés, enfin avec l'aide visuelle de la courbe des modules sécants entre paliers. Les deux documents suivants montrent l'utilité de cette étude.

Tableau 2. Valeurs des modules pressiométriques E_M (en MPa) obtenus par plusieurs méthodes de dépouillement pour un même essai.

Sondage n° et prof	AutoL	AutoA	AutoP	Linéaire	Sécant
1 S2 4,5m	5,5	refus	7,9	-	6,3
1 S2 6m	16,3	16,9	16	15	15
1 S2 9m	23,8	25,2	24	22	22
1 S2 18m	33,8	35,8	31	16	16
1 S3 16m	104,8	123,4	55	29	37
2 SA 3m	0,43	6,7	2,0	-	0,5
2 SA 4m	0,54	7,7	4,2	1,3	0,7
2 SA 8m	0,86	6,7	2,0	0,8	1,1
3 S1 12m	34,5	35,9	35	19	19
3 S1 14m	40,0	42,9	43	27	28
3 S1 20m	31,6	30,8	33	28	30
4 S7 1m	24,1	23,3	23	11	11
4 S7 5m	26,7	25,8	25	15	14
4 S7 12m	52,1	50,1	46	24	30
5 S1 2m	20,8	20,6	20	17	18
5 S1 10m	26,3	26,2	25	21	22
5 S1 12m	36,4	36,5	34	31	26
6 S1 2m	5,8	7,0	6,0	2,3	4,1
6 S1 3m	7,1	8,0	7,4	2,5	3,0
6 S2 2m	18,6	18,8	18	2,5	3,3
7 S1 7m	17,8	18,4	17	4,5	3,3
7 S2 4m	7,3	6,9	8,1	7,9	8,1
7 S2 7m	10,9	8,6	11	5,2	4,3

1 - Sols sablo-graveleux	Grenoble 38
2 - Sols vaseux très mou	La Tranche-sur-mer 85
3 - Sols crayeux compacts	Lillebonne 76
4 - Sols marneux compact	Villemonble 93
5 - Sols sableux assez compacts	Berck-sur-mer 62
6 - Sol remblayé limono graveleux	Arcueil 94
7 - Sols limono argileux alluvionnaire	Arcueil 94

En option dans certains logiciels sur demande d'anciens « Ménard », mais souvent difficilement utilisables, la courbe des modules sécants renseigne précisément sur le comportement et les événements vécus par le sol au cours de chaque forage, de chaque essai pressiométrique, voire de l'histoire géologique, et ceci quelle que soit la méthode utilisée. Elle fiabilise les ajustements analytiques des essais recréés en continu qui permettent maintenant d'interpoler avec précision entre les paliers expérimentaux. Les autres aides proposées ($E_f = E_M/2$, tangente au fluage, planche-contact) sont intégrables sans difficulté dans les processus informatisés de calcul et de représentation des essais.

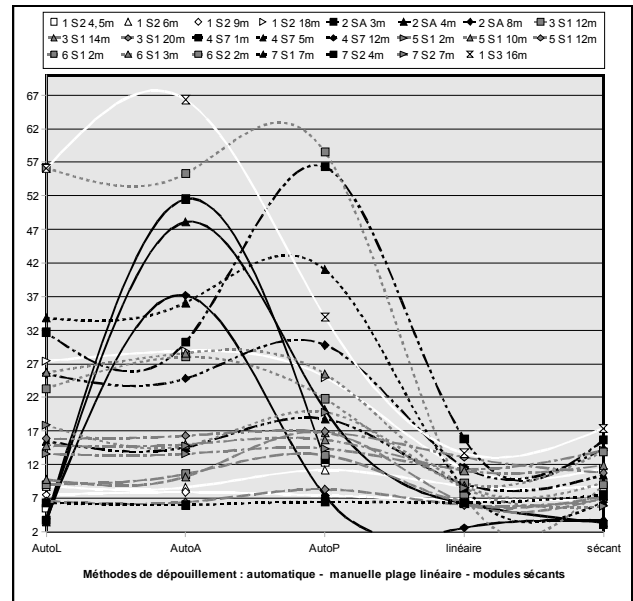


Figure 9. Résultats du rapport E_M/p_{LM} pour chaque essai du tableau 2 selon les méthodes de dépouillement utilisées

Avec ces aides, l'interprétation du module Ménard devient extrêmement fiable dans les meilleurs essais et se rapproche de la réalité dans les plus délicats à interpréter. En valorisant l'arbitrage final par l'analyse humaine visuelle rapide et fiable, l'interprétation avec la courbe des modules sécants répond pleinement aux objectifs des normes actuelles et en préparation.

Avec la connaissance de toutes les données de l'essai, elle permet aussi d'envisager à terme le calcul d'une incertitude-type représentative.

L'interprétation du module Ménard mérite de gagner en transparence, en précision et en répétabilité, parce qu'elle est une donnée majeure et fondamentale de l'essai pressiométrique. Les représentations systématiques de la courbe des modules ainsi que des outils proposés ($E_M/2$, tangente au fluage) permettent d'atteindre ces objectifs en apportant une aide précieuse sans modifier les méthodes actuelles de dépouillement décrites dans les normes sur l'essai pressiométrique Ménard.

9 REFERENCES

- AFNOR 2012. Pr NF EN ISO 22476-4 *Reconnaissances et essais géotechniques – Essais en place – Partie 4 : Essai au pressiomètre Ménard*, 46-48
- Baud J.P., Gambin M. et Schlosser F. 2013. Courbes hyperboliques contrainte-déformation au pressiomètre Ménard autoforé. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris 2013
- Dhouib A., Caqueneau X. et Gambin M. 2002. Variations des paramètres mesurés par le pressiomètre Ménard. *PARAM 2002*, Presses de l'ENPC/LCPC, Paris, 465-470
- ISO 2009. EN/ISO 22476-4 *Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 4 : Ménard pressuremeter test*, 41-43
- Reiffsteck P., Lossy D. et Benoît J. 2012. *Forages, sondages et essais in situ géotechniques. Les outils pour la reconnaissance des sols et des roches*. Presses des Ponts, Paris, 533-557