

# MODE OPERATOIRE ET METHODE D'INTERPRETATION DE L'ESSAI AU DILATOMETRE RIGIDE FONDASOL (DFT)

## TEST PROCEDURE AND INTERPRETATION METHOD OF THE RIGID DILATOMETER FONDASOL TEST (DFT)

Théo BESSON<sup>1</sup>, Michel RISPAL<sup>1</sup>, Catherine JACQUARD<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fondasol, Avignon, France

**RÉSUMÉ** – L'essai au dilatomètre rigide Fondasol (DFT) est un essai d'expansion en forage donnant accès à une courbe contrainte-déformation des sols non rocheux. Cet article décrit l'appareillage, le mode opératoire, et les méthodes d'interprétation de l'essai donnant accès à un module pseudo-élastique et une contrainte limite. Cet article vise une évolution de la norme sur le dilatomètre rigide pour étendre son application aux sols non rocheux.

**ABSTRACT** – The rigid dilatometer Fondasol test (DFT) is a borehole expansion test that provides a stress-strain curve for non-rocky soils. This paper details the equipment, the operating procedure, and the interpretation methods, yielding both a pseudo-elastic modulus and a limit stress. This article aims to evolve the standard for the rigid dilatometer to extend its application to non-rocky soils.

### 1. Introduction

L'essai au dilatomètre consiste à appliquer une contrainte sur les parois d'un forage exécuté au préalable et à en mesurer les déplacements en résultant. C'est l'un des essais in situ les plus répandus en mécanique des roches pour la détermination d'un paramètre de déformabilité de type module d'Young. Dans le cas du dilatomètre dit flexible, le chargement de la paroi du forage est réalisé en pressurant un fluide contenu par une gaine extensible. Le chargement s'applique alors uniformément sur toute la circonférence du forage. Dans le cas du dilatomètre rigide, le chargement est effectué dans une direction perpendiculaire à l'axe du forage par deux coquilles rigides semi-cylindriques diamétralement opposées écartées à l'aide de vérins hydrauliques positionnés dans le corps de sonde.

Le concept de dilatomètre rigide a été introduit, selon Fecker (2018), par Kögler (1933). La sonde était alors dimensionnée pour des forages de 150 à 200 mm de diamètre et les coquilles avaient une longueur de 600 mm. Plusieurs prototypes ont ensuite été développés (Noël, 1963). Une première analyse théorique a été proposée par Absi et Seguin (1967) permettant de calculer un module à partir de la théorie de l'élasticité. Goodman et al. (1968) développèrent une sonde encore utilisée actuellement en Amérique du Nord. Cette sonde est dimensionnée pour des forages de type NX (environ 76 mm de diamètre de forage) avec des coquilles de 203 mm de long et de 45° de demi-angle d'ouverture. Heuzé et Amadei (1985) synthétisèrent les travaux antérieurs pour proposer une méthode d'interprétation de l'essai qui a été reprise par les principaux textes de normes, en particulier la norme ISO 22476-7 (2013).

Le dilatomètre flexible a son équivalent de longue date en mécanique des sols : le pressiomètre (ISO 22476-4, 2021). Le dilatomètre rigide n'a quant à lui connu son adaptation dans cette discipline qu'avec le récent développement du dilatomètre rigide Fondasol (Besson, 2022). L'augmentation de la course des vérins permet d'atteindre un déplacement relatif de la paroi du forage de l'ordre de 35 % et donne ainsi la possibilité de balayer intégralement la phase de rupture du sol. La contrainte maximale exercée sur la paroi du forage s'élève quant à elle à environ 3.5 MPa. Les dimensions de la sonde sont compatibles avec les forages de type BX traditionnels en mécanique des sols (61-66 mm

de diamètre). L'essai est à déplacement contrôlé et la mesure simultanée de la pression hydraulique et du déplacement de la sonde à raison de trois acquisitions par seconde permet d'accéder à une courbe continue contrainte-déformation du sol. De cette courbe peuvent être extraits à la fois un paramètre de déformabilité, le module dilatométrique  $E_{DFT}$ , mais aussi un paramètre de rupture : la contrainte limite dilatométrique  $\sigma_{LDFT}$ .

L'utilisation du dilatomètre rigide en mécanique des sols sort du cadre de la norme ISO 22476-7 (2013) qui ne s'applique qu'aux matériaux rocheux. Cet article vise à faire évoluer la norme pour étendre son application aux sols non rocheux. Il décrit le matériel d'essai, le mode opératoire de l'essai ainsi que les méthodes de corrections des mesures, et enfin les méthodes d'interprétation de l'essai.

## 2. Description de l'appareillage

L'appareillage utilisé pour l'essai au dilatomètre rigide Fondasol comprend une sonde dilatométrique, un Contrôleur Pression-Volume (CPV), une tubulure hydraulique et des tiges de manœuvre (Figure 1).

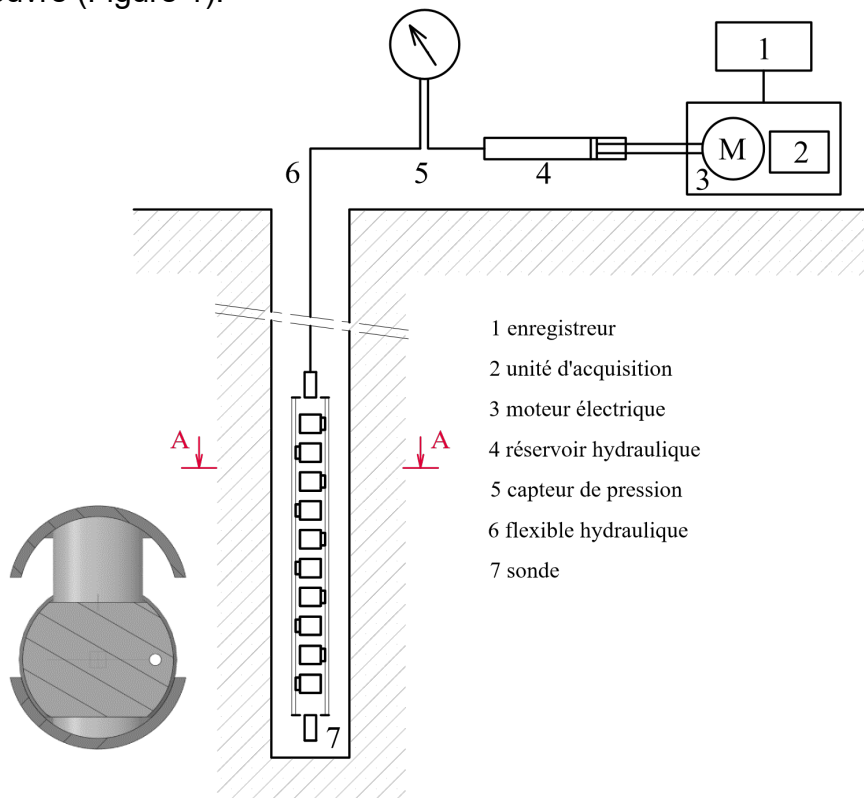


Figure 1. Matériel d'essai au dilatomètre rigide Fondasol.

### 2.1. La sonde dilatométrique

La sonde dilatométrique consiste en deux coquilles rigides semi-cylindriques et diamétralement opposées, écartées à l'aide de plusieurs pistons hydrauliques régulièrement répartis dans le corps de sonde (Figure 2).



Figure 2. La sonde dilatométrique.

L'ensemble est recouvert d'une gaine caoutchouc protégeant la sonde de l'intrusion d'éléments étrangers. La sonde a un diamètre initial  $D_0$  de 58 mm. Le demi-angle

d'ouverture des coquilles  $\beta$  est de  $69^\circ$  pour une longueur de 385 mm. Cette longueur est suffisante pour obtenir un ratio  $L/D_0 > 6$  ce qui garantit un champ de contrainte bidimensionnel dans le sol. La surface d'appui totale est ainsi égale à  $377 \text{ cm}^2$ .

## 2.2. Le Contrôleur Pression-Volume (CPV)

Placé à la surface du sol, le Contrôleur Pression-Volume (CPV) permet d'assurer l'écartement et la rétraction de la sonde et de mesurer tout au long de l'essai (Figure 3) :

- la pression d'huile,
- l'écartement de la sonde,
- la vitesse d'écartement de la sonde.

Il est relié à la tubulure via un connecteur hydraulique rapide (A) raccordé à un capteur de pression (B) lui-même placé en sortie d'un réservoir d'huile (C). L'injection d'huile dans la sonde et sa mise en pression est effectuée par un piston qui se déplace dans le réservoir via la rotation d'une vis sans fin (D).

L'opérateur contrôle l'essai à partir des commandes (F) positionnées sur le boîtier (E). Ces commandes prennent la forme de deux interrupteurs et d'une vis :

- un interrupteur général,
- un interrupteur définissant le sens de rotation du moteur électrique et déterminant ainsi si la sonde est en écartement ou en rétraction,
- un potentiomètre permettant de contrôler la vitesse de rotation du moteur et ainsi la vitesse d'écartement de la sonde.

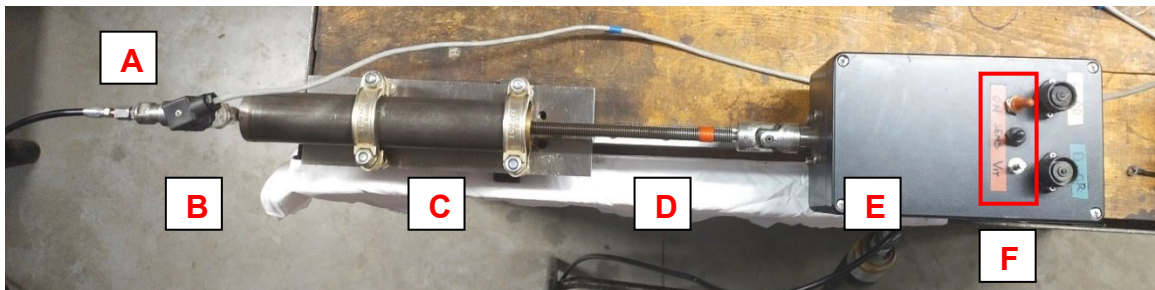


Figure 3. Le CPV.

## 2.3. L'enregistreur

Un enregistreur connecté au boîtier du CPV réalise trois acquisitions par seconde. Un affichage permet à l'opérateur de suivre en temps réel l'écartement de la sonde, la pression hydraulique ainsi que la vitesse d'écartement.

## 3. Mode opératoire de l'essai

### 3.1. Assemblage de l'appareillage

La tubulure connecte la sonde au CPV. Le circuit hydraulique est complètement purgé afin de supprimer les bulles d'air. Une fois l'étalonnage des capteurs réalisé (cf.§3.2), une gaine en caoutchouc est montée de sorte à recouvrir le corps de sonde. La sonde est alors dilatée jusqu'à son écartement maximal à trois reprises afin d'assouplir la gaine.

### 3.2. Etalonnage des mesures

Les capteurs de la sonde sont étalonnés à l'aide d'un bâti conçu à cet effet. Les essais d'étalonnage sont réalisés dans deux configurations différentes :

- Dans le premier cas (Figure 4 à gauche) l'expansion est bloquée permettant de relier la pression hydraulique à la force mesurée par un capteur de force.

- Dans le deuxième cas (Figure 4 à droite), les coquilles sont libres de s'écarter, la rotation du moteur est alors reliée à l'écartement total des coquilles  $(\Delta\Phi)_r$  mesuré par un capteur de déplacement.

Cet étalonnage doit être réalisé à chaque changement du capteur de pression ou du moteur électrique et au moins une fois par an.

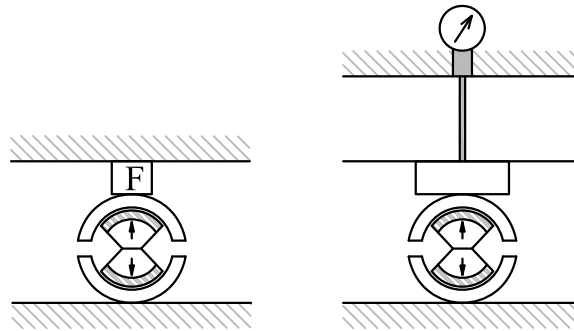


Figure 4. Etalonnage des mesures.

### 3.3. Essai à l'air libre et essai de calibrage

Avant de réaliser les essais en forage, un essai à l'air libre et un essai dans un tube de calibrage doivent être réalisés.

L'essai à l'air libre permet de déterminer la résistance propre de la gaine recouvrant la sonde. Lors de cet essai, la sonde est écartée à une vitesse d'écartement diamétral de 10 mm/min jusqu'à atteindre son envergure maximale.

Le calibrage de la sonde est réalisé via un essai de mise en pression dans un tube de diamètre connu. Lors de cet essai, la sonde est écartée à une vitesse de 10 mm/min jusqu'à atteindre le placage des coquilles contre la paroi interne du tube, puis la vitesse est diminuée à 3 mm/min. L'essai est arrêté lorsqu'une pression hydraulique de 20 MPa est atteinte.

Ces essais doivent être réalisés régulièrement et de manière systématique après modification ou remplacement de matériel.

### 3.4. Forage et mise en place de la sonde

La qualité du forage détermine en grande partie la qualité des mesures au dilatomètre rigide Fondasol. Les dispositions à prendre pour sa réalisation sont identiques à celles préconisées par la norme de l'essai pressiométrique ISO 22476-4 (2021). La cote d'essai correspond à la distance entre la surface et la mi-hauteur des coquilles.

### 3.5. Réalisation de l'essai

L'écartement de la sonde est réalisé à une vitesse d'écartement diamétral maintenue constante tout au long de l'essai, jusqu'à atteindre un des critères d'arrêt :

- une pression hydraulique correspondant à une contrainte de 3,5 MPa exercée sur les parois du forage est atteinte ou,
- le déplacement total des coquilles par rapport au diamètre initial de la sonde est d'au moins 30 mm.

## 4. Correction des mesures

### 4.1. Ajout du poids de la colonne d'huile

La pression d'huile au niveau de la sonde est égale à la pression mesurée au niveau du CPV à laquelle est ajoutée le poids de la colonne d'huile entre la cote du CPV et la cote de l'essai. Pour des essais de profondeur inférieure à 10 m, cette correction peut être négligée.

La force appliquée sur le terrain est calculée à partir de l'étalonnage. Puis, la contrainte brute  $\sigma_r$  est obtenue à partir de la surface projetée des coquilles.

#### 4.2. Correction de la résistance propre de la gaine

La contrainte corrigée  $\sigma$  est égale à la contrainte mesurée  $\sigma_r$  corrigée de la résistance propre de la gaine obtenue à partir d'un essai à l'air libre :

$$\sigma = \sigma_r - a_{i,1} \cdot (\Delta\Phi)_r \quad (1)$$

Avec le coefficient  $a_{i,1}$  obtenu par régression linéaire (Figure 5 à gauche).

#### 4.3. Calibrage et correction de l'écartement des coquilles

L'interprétation de l'essai de calibrage est présentée Figure 5 à droite. Une droite est ajustée à la partie de la courbe correspondant à la mise en contact des coquilles avec la paroi interne du tube. De cette droite sont extraits deux paramètres : l'intersection de la droite avec l'axe des ordonnées  $a_{c,0}$  et la pente de la droite  $a_{c,1}$ . L'écartement corrigé  $\Delta\Phi$  est obtenu en soustrayant la dilatation propre de l'appareillage de l'écartement mesuré  $(\Delta\Phi)_r$  :

$$\Delta\Phi = (\Delta\Phi)_r - a_{c,1} \cdot \sigma_r \quad (2)$$

$a_{c,0}$  permet d'accéder au diamètre initial de la sonde  $\Phi_0$  :

$$\Phi_0 = \Phi_c - a_{c,0} \quad (3)$$

Où  $\Phi_c$  est le diamètre intérieur du tube de calibrage. Le diamètre de la sonde s'écrit alors :

$$\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi \quad (4)$$

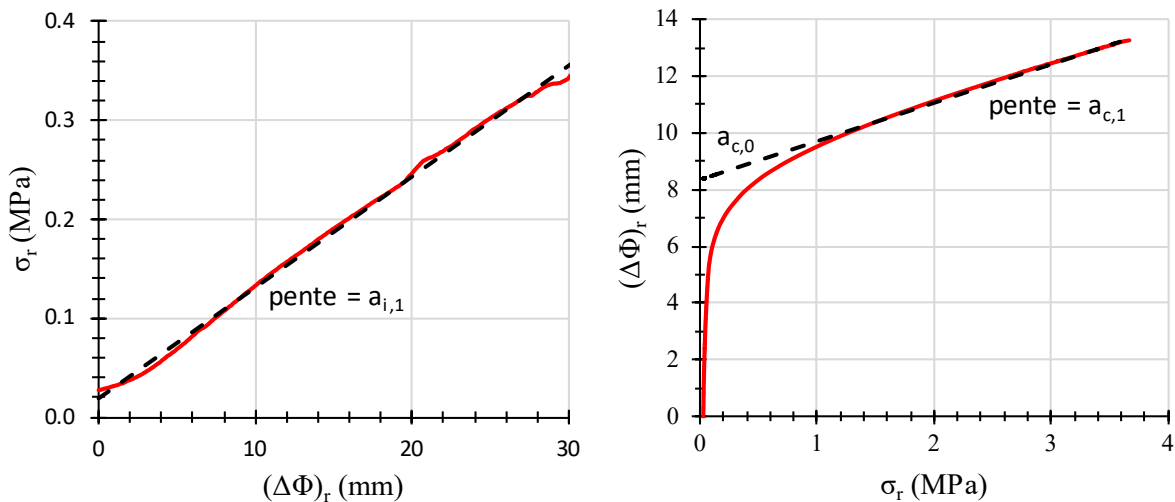


Figure 5. A gauche : Essai à l'air libre. A droite : Essai de calibrage.

#### 4.4. Courbe corrigée

Les mesures brutes et corrigées sont représentées sur un graphe avec le déplacement relatif en abscisse et la contrainte en ordonnée (Figure 6). Pour l'interprétation de l'essai, les mesures sont moyennées par pas de 1 mm de déplacement diamétral. Ce pas peut être affiné si besoin.

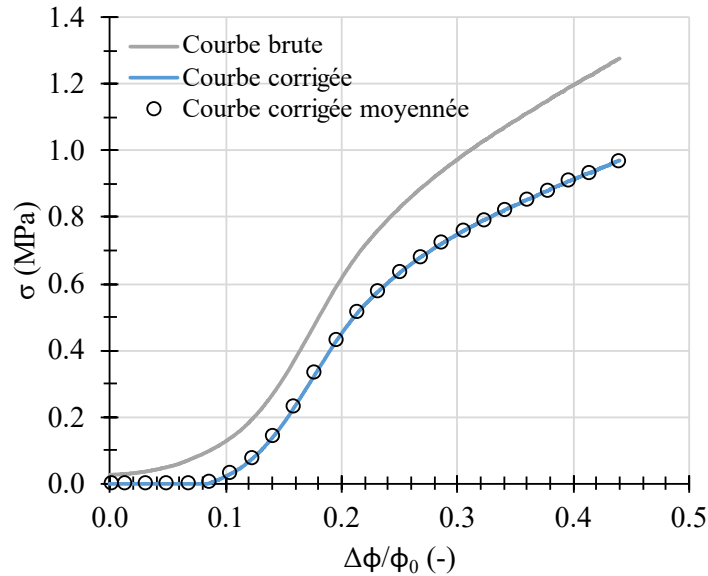


Figure 6. Courbe brute et courbe corrigée.

## 5. Interprétation de l'essai

Une courbe d'essai au dilatomètre rigide fait apparaître trois phases :

- 1<sup>ère</sup> phase : mise en contact des coquilles contre la paroi du forage.
- 2<sup>ème</sup> phase : relation quasi-linéaire entre la contrainte et le déplacement relatif : phase pseudo-élastique.
- 3<sup>ème</sup> phase : diminution de la pente associée à la rupture progressive du sol.

### 5.1. Module dilatométrique $E_{DFT}$

Le module dilatométrique est déterminée sur la 2<sup>ème</sup> phase de la courbe.

Un volume fictif  $\Delta V$  est calculé en assimilant l'écartement des coquilles au diamètre d'un cylindre fictif de 210 mm de long. Cette quantité n'a aucun lien avec le volume réellement déplacé lors d'un essai au dilatomètre rigide mais il permet de déterminer la plage de calcul du module selon une méthode analogue à celle définie pour l'essai pressiométrique et de manière semi-automatique. Cette plage inclut tous les segments consécutifs ayant une pente  $m_i = (\Delta V_{i+1} - \Delta V_i) / (\sigma_{i+1} - \sigma_i)$  inférieure au produit  $\lambda \cdot m_E$ ,  $m_E$  étant la pente  $m_i$  la plus basse positive. Le coefficient  $\lambda$  est obtenu à partir de la relation suivante :

$$\lambda = 1 + \frac{1}{100} \cdot \frac{\sigma'_E + \sigma_E}{\sigma'_E - \sigma_E} + \frac{2\delta V}{V'_E - V_E} \quad (5)$$

Avec les coordonnées de l'origine  $(\sigma_E, V_E)$  et de la fin  $(\sigma'_E, V'_E)$  du segment  $m_E$ .  $\delta V$  est une tolérance de 3 cm<sup>3</sup> prise pour un premier calcul de  $\lambda$ . Si le nombre de segments obtenu avec cette première valeur est inférieur à 3,  $\delta V$  est augmenté par pas de 1 cm<sup>3</sup>. Les points P1 et P2 délimitent la plage de calcul du module.

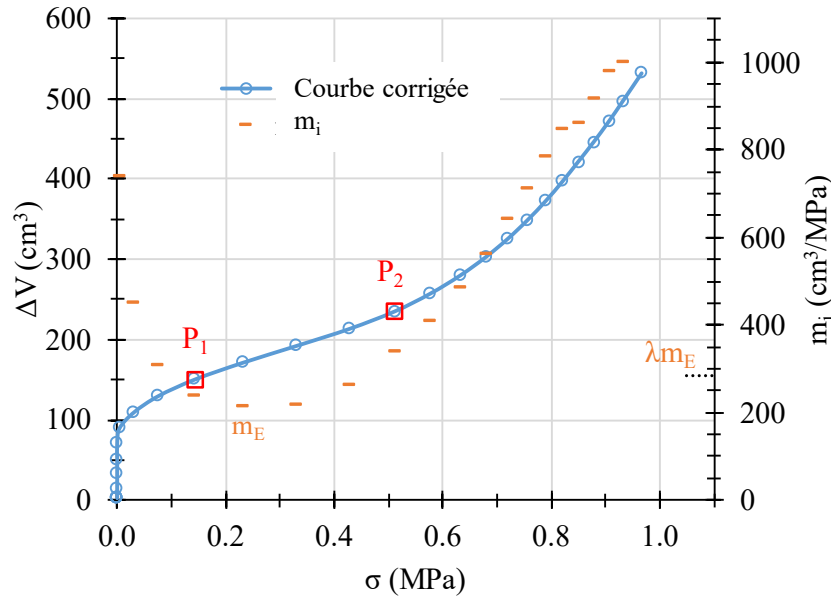


Figure 7. Détermination de la plage de calcul du module.

La formule permettant de calculer le module est issue de la théorie de l'élasticité appliquée au cas de chargement unidirectionnel en forage (Heuzé et Amadei, 1985, Goodman et al. (1968)) :

$$E_{DFT} = K\Phi_p \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\Phi_2 - \Phi_1} \quad (6)$$

Avec :

$\Phi_p$  le diamètre du forage.

$(\sigma_1, \Phi_1)$  et  $(\sigma_2, \Phi_2)$  respectivement les couples de valeur des points P1 et P2.

$\beta$  le demi-angle d'ouverture des coquilles.

et la grandeur  $K = 1.67$  pour  $\beta = 69^\circ$  et  $\nu = 0.33$ .

## 5.2. Contrainte limite

La détermination d'un paramètre de rupture de type contrainte limite  $\sigma_{lim}$  se base sur l'analyse conjointe de la 2<sup>ème</sup> et de la 3<sup>ème</sup> phase de la courbe corrigée. Plusieurs critères peuvent être appliqués par analogie avec l'interprétation de la rupture du sol sous une fondation superficielle (Vesic, 1973). La contrainte limite est alors associée à la rupture de la pente dans la courbe de chargement déterminée par :

- La méthode de l'intersection des tangentes (Figure 8 à gauche) :  $\sigma_{tang}$ .
- La méthode Log-Log (Figure 8 à droite) :  $\sigma_{log}$ .
- la fin de la plage pseudo-élastique au point P2 (Figure 8 à gauche) :  $\sigma_2$ . Cette valeur est une estimation basse de la contrainte nécessaire pour initier la propagation des déformations plastiques dans le milieu à partir de la paroi du forage.

Pour la méthode  $\sigma_2$ , la contrainte limite est directement obtenue à partir de l'analyse présentée au §5.1. Pour les deux autres méthodes, une deuxième pente doit être tracée suivant une méthode similaire utilisée pour la première pente : la plage de calcul de la pente inclut ainsi tous les segments consécutifs ayant une pente  $m_i$  (cf. Figure 7) supérieure au produit  $\lambda_{max} m_{max}$ ,  $m_{max}$  étant la pente  $m_i$  la plus élevée positive. Le coefficient  $\lambda_{max}$  est pris égal à  $1-(\lambda-1)/2$  avec  $\lambda$  le paramètre défini pour la détermination de la plage pseudo élastique (cf. équation (5)).

La contrainte nette appliquée sur le terrain s'écrit  $\sigma_{lim}^* = \sigma_{lim} - \sigma_{h0}$  avec  $\sigma_{h0}$  la contrainte horizontale initiale avant forage égale au produit  $K_0 \cdot \sigma_{v0}$  avec  $K_0$  le coefficient des terres au repos et  $\sigma_{v0}$  la contrainte verticale initiale à la profondeur d'essai.

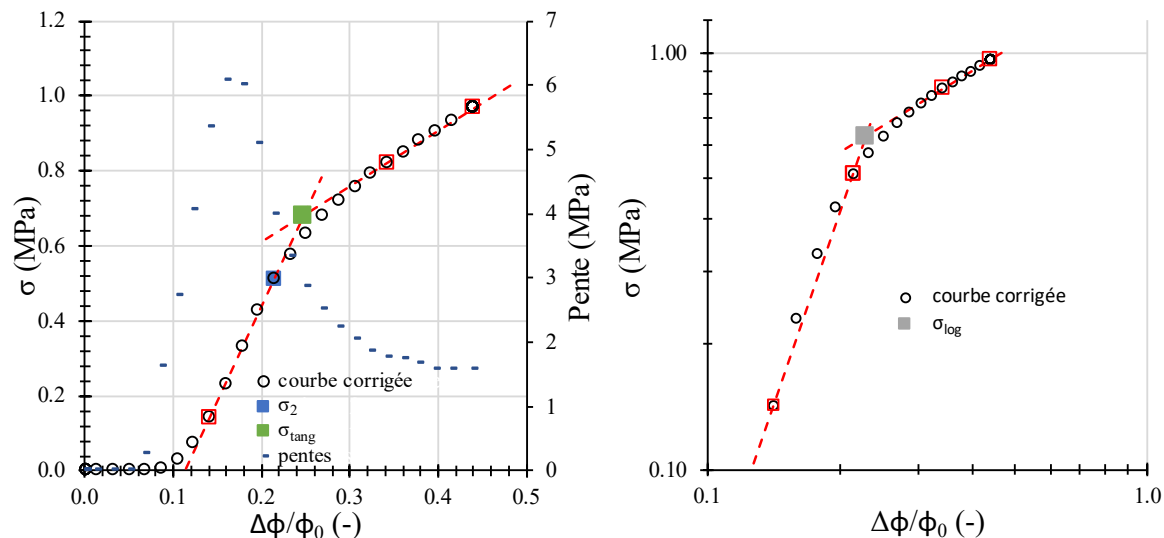


Figure 8. Méthodes d'interprétation de l'essai DFT en termes de contrainte limite  $\sigma_{lim}$ .

## 6. Conclusion

Cet article donne la marche à suivre pour réaliser dans des sols non rocheux des essais d'expansion en forage avec le dilatomètre rigide Fondasol. Après application des corrections, une courbe contrainte-déformation in situ des sols peut être tracée. Les méthodes d'interprétation proposées permettent d'extraire de cette courbe un module pseudo-élastique et une contrainte limite. Ces deux paramètres géotechniques peuvent alors être utilisés pour estimer le tassement et la contrainte limite des sols sous les fondations. La description de la méthode suivie pour ce dimensionnement fait l'objet d'une communication distincte. Cet article ouvre ainsi la voie à l'évolution de la norme encadrant les essais au dilatomètre rigide pour étendre son domaine d'application aux sols non rocheux. Cette évolution mènerait à une utilisation plus répandue du dilatomètre rigide en mécanique des sols.

## 7. Références bibliographiques

- Absi, E., Seguin, M., 1967. Le nouveau Géoextensomètre. Ann. Inst. Tech. Bâtim. Trav. Publics 1151–1158.
- Besson, T., 2022. Étude des lois de comportement des sols à partir d'un nouvel essai de chargement unidirectionnel rigide en forage (Dilatosol). Thèse de doctorat. Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée.
- Fecker, E., 2018. Bohrlochaufweitungsversuche. Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 143–170.
- Goodman R. E., Van T. K., Heuzé F. E. (1968). Measurement of rock deformability in boreholes. Proceedings 10<sup>th</sup> US symposium on rock mechanics, University of Texas, Austin.
- Heuzé F. E., Amadei, B. (1985). The NX-borehole jack: a lesson in trial and errors. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 22, No. 2, pp. 105–112.
- ISO 22476-4. (2021). Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place - Partie 4 : essai pressiométrique dans un forage préalable selon la procédure Ménard.
- ISO 22476-7 (2013). Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place - Partie 7 : essai au dilatomètre rigide diamétral.
- Kögler, F., 1933. Baugrundprüfung im bohrloch. Bauing. 8, 266–270.
- Noël, G., 1963. Mesure du module d'élasticité en profondeur dans les massifs rocheux. Ann. Inst. Tech. Bâtim. Trav. Publics 533–540.
- Vesić, A.S., 1973. Analysis of ultimate loads of shallow foundations. J. Soil Mech. Found. Div. 99, 45–73. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001846>.