

---

# Analyse statistique d'essais pressiométriques pour l'étude de la variabilité des sols du tunnel de la rocade Nord de Grenoble

**Christian CHAPEAU<sup>\*</sup>, Eugeniusz DEMBICKI<sup>\*\*</sup>, Norbert  
KUREK<sup>\*\*</sup>, Guillaume MARBACH<sup>\*\*\*</sup>, Jacques MONNET<sup>\*\*\*\*</sup>**

<sup>\*</sup>Centre d'Etude Technique de l'Equipement, Bron, France

<sup>\*\*</sup>Gdansk University of Technology, Gdansk, Poland

<sup>\*\*\*</sup>Direction Départementale de l'Equipement de l'Isère, Grenoble, France

<sup>\*\*\*\*</sup>LIRIGM, Université Joseph Fourier, Grenoble, France

---

*RÉSUMÉ. Le projet de tunnel de la Rocade Nord de Grenoble se développe sur un linéaire important, dans un contexte géologique impliquant 12 familles de sols et roche différentes avec une grande variabilité spatiale. Les exigences de dimensionnement imposent la détermination de valeurs de frottement caractéristiques telles que l'on ait 95% de chance de mesurer in situ une valeur du frottement supérieure. Une analyse statistique a été conduite avec des hypothèses de distributions différentes (Normale, Log Normale, Exponentielle, Weibull, Gamma, Chi2, Student, Pareto) et un test statistique a été appliqué pour valider la distribution. Les résultats montrent qu'aucune distribution ne permet de représenter la variabilité naturelle du sol, les lois Normale, Log Normale et Chi2 étant les plus représentatives.*

*ABSTRACT. The north transversal tunnel of Grenoble is very long, and crosses a lot of geologic formations with 12 different families of soils and rock with a large spatial variation. The design of the tunnel needs the determination of a characteristic friction angle so that 95% of the measured values should be larger than it. A statistical analysis was made with different theoretical distributions (Normal, Log Normal, Exponential, Weibull, Gamma, Chi2, Student, Pareto) and a statistical test was applied. The results show that there is no theoretical distribution to represent the natural variability of the soil, and the Normal, Log Normal Chi2 laws are the best representative.*

*MOTS-CLÉS : Essais in Situ & Mesures, Tunnel, Pressiomètre, Angle de frottement, Statistique, Loi distribution, Test statistique.*

*KEYWORDS: Field testing & monitoring, Tunnel, Pressuremeter, Friction angle, Statistics, Distribution law, Statistical test.*

---

## 1. Introduction

La construction de tunnel en site urbain est un problème particulièrement délicat par le contrôle soigneux à la fois des règles de sécurité à appliquer, pour prévenir la rupture, pour maîtriser les déplacements de surface et pour ne pas nuire au bâti existant. Au niveau d'un Avant-Projet, il s'agit d'évaluer les variantes fonctionnelles d'un point de vue technico-économique et de proposer la bonne adaptation de l'ouvrage à la nature géotechnique des sols. En particulier la connaissance, dès ce stade, des caractéristiques géomécaniques du sol s'est avérée primordiale. La complexité des contraintes du dimensionnement impose de réaliser des essais adaptés à la problématique posée. Les méthodes usuelles de la géotechnique par carottage et essais de laboratoire sont ici inadaptées par la présence de sables et limons situés sous la nappe phréatique et non prélevables intacts. Il a été choisi des reconnaissances pressiométriques par leur capacité à tester le sol à la profondeur du tunnel et dans son état naturel (Amar *et al.*, 1991 ; Clarke *et al.*, 1998)

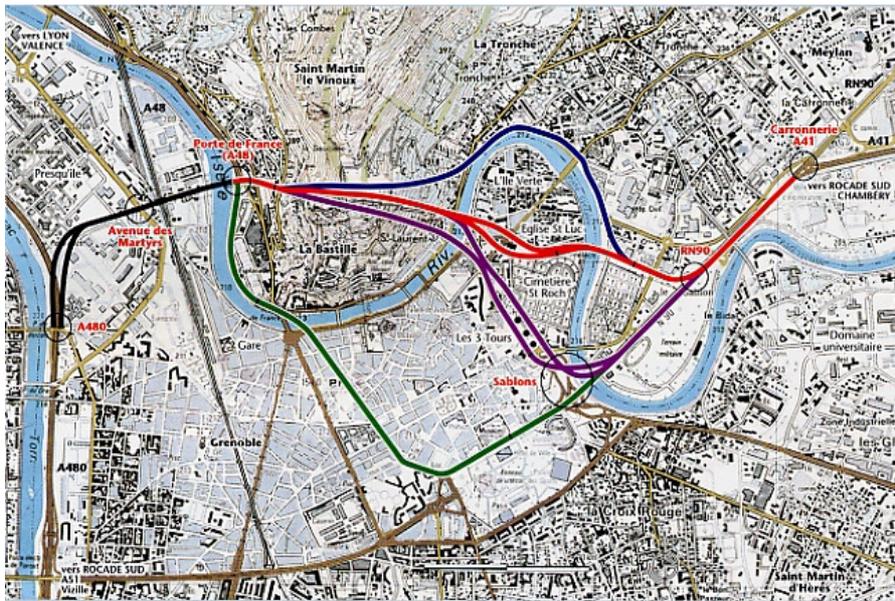


Figure 1. Les quatre familles de solutions pour la rocade nord de Grenoble

## 2. Description du projet

Le tracé du tunnel de la rocade nord de Grenoble (Figure 1) commence au Sablon, traverse en sous fluvial l'Isère, passe sous l'Ile Verte district, traverse une seconde fois en sous fluvial l'Isère pour rejoindre l'autoroute A48 à Porte de France et l'A480 au Pont du Vercors. C'est la solution POS qui a été choisie parmi quatre

Analyse statistique d'essais pressiométriques pour l'étude de la variabilité des sols  
du tunnel de la rocade Nord de Grenoble 3

possibilités. Pour POS deux profils longitudinaux ont été étudiés (Figure 2). La première solution, appelée *Esplanade*, traverse l'*Ile Verte* et la *Bastille* par un tunnel, traverse l'*Isère* par un viaduc, suit la rue *Durand-Savoyat*, traverse les voies de chemin de fer et le *Commissariat à l'Energie Atomique*. La seconde solution appelée *Vercors* traverse l'*Ile Verte*, la *Bastille* et la *Presqu'île* avec un tunnel.

Le gabarit du tunnel a été choisi à 2,7 m de haut pour permettre le passage de 96% des véhicules, comme les voitures, les camionnettes et les pick-up. Les projeteurs utilisent un profil bi-tubes pour diminuer le diamètre du tunnel. Ils sont connectés par des sections au gabarit de 2,7m pour des raison de sécurité (Figure 3).

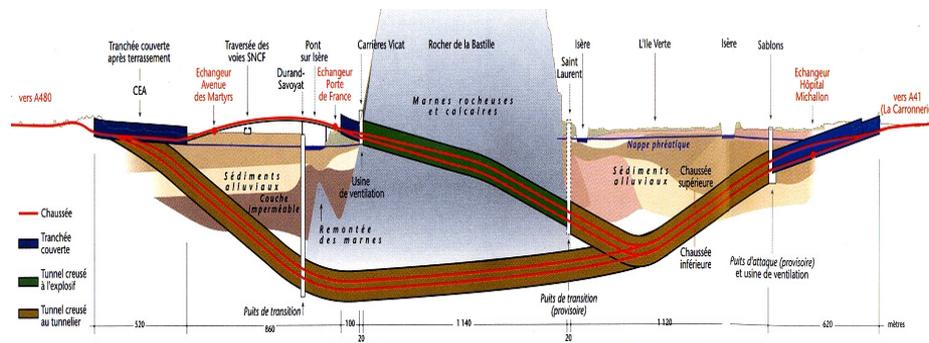


Figure 2 Les deux profils de la variante POS de la rocade nord de Grenoble

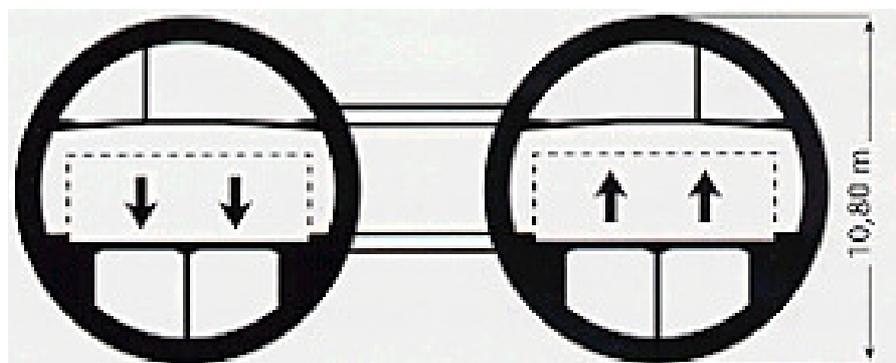


Figure 3 La section type du tunnel de Grenoble

### 3. Reconnaissances géotechniques et géologiques

#### 3.1. Structure géologique

Le tunnel traverse deux formations géologiques différentes: *Dépôts alluviaux*, entre 500m à 800m d'épaisseur, d'origine quaternaire, composés de graviers, sable, limons, argiles. Ils ont une origine lacustre et fluviale ; *Roche*, sous la "Bastille", qui datent du Jurassique Supérieur et Crétacé Inférieur et font apparaître une alternance de bancs calcaires et de bancs marneux.

#### 3.2. Structure géotechnique

Les essais ont été réalisés en 1996-1997 sur l'île Verte. L'entreprise Geotec a réalisé 4 forages destructifs, 8 forages carottés (30 m à 40 m de profondeur), 15 forages pressiométriques avec des essais standards et cycliques. Les essais ont montré que les dépôts alluviaux sont composés de 12 familles de sol et de roches:

Du côté Est du tracé : Famille F1, *remblais de surface*, 1 à 4 m de profondeur ; Famille F2, *argiles plastiques*, sous-jacentes à la couche F1 de faible épaisseur ; Famille F3, *limons sableux marrons à verts*, de 3 à 7 m, localement sous F1 ; Famille F4, *sables et graviers*, 3 à 20 m, sous-jacents aux limons F3 ; Famille F5, *limons argileux gris*, *limons argileux gris* remplaçant les sables et graviers à l'Est ; Famille F6, *sables fins et limons en alternance gris noirs*, sous la famille F4, avec des passées limoneuses, voire argileuses ; Famille F7, *limons sableux gris noirs profonds*, se retrouvant à l'Ouest du projet ; Famille F8, *sables profonds compacts*, situés très profondément.

Pour le rocher de la " Bastille": Famille F9, *marnes rocheuses et calcaires*, au milieu du tunnel.

Du côté Ouest du trace: Famille F10, *Sables gris et graviers*, en surface; Famille F11, *Sables gris et silts*, sous la famille F10 ; Famille F12, *Sables gris et graviers*, sous la famille F11.

### 4. Résultats des essais

Les interprétations des essais ont été réalisées en quatre étapes différentes: Mesure de l'angle de frottement intergranulaire  $\phi_{\mu}$  sur des échantillons intacts ou remaniés avec des tests triaxiaux ; Estimation de l'angle de dilataance  $\psi$  et de l'angle de frottement interne  $\Phi'$  par l'interprétation de l'essai pressiométrique ; Lissage des caractéristiques de frottement en fonction de la profondeur ; Utilisation des résultats déduits de l'analyse précédente dans un logiciel de traitement statistique pour déterminer la valeur moyenne  $\bar{X}$ , l'écart type  $\sigma_n$ , et la valeur caractéristique  $X_k$ .

#### 4.1 Les essais triaxiaux

Les essais triaxiaux ont été réalisés au LIRIGM de Grenoble selon la norme (AFNOR, 1994). Ils ont permis la détermination des caractéristiques physiques et mécaniques des sols remaniés. Les échantillons sont de 70 mm de diamètre et de 150 mm de haut. Le CETE d'Aix en Provence a réalisé des essais triaxiaux cycliques pour étudier le risque de liquéfaction. Le sol semble sensible au séisme, et une grande amplitude de module de Young non drainée est obtenue pour les essais cycliques.

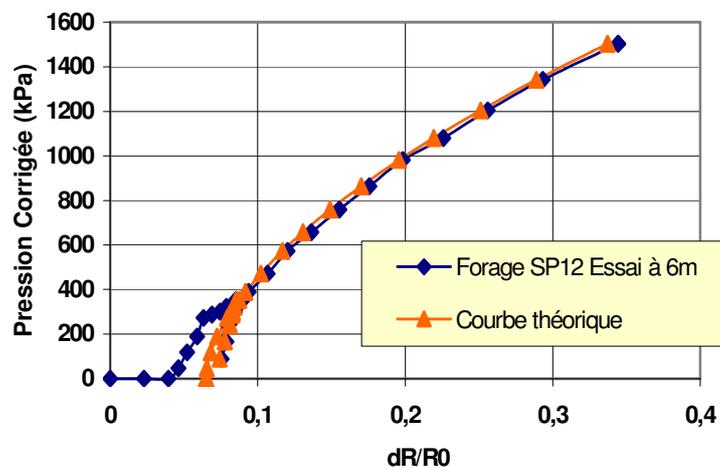


Figure 4. Contrôle des caractéristiques mécaniques, comparaison entre les courbes expérimentales et théoriques, Forage SP12 à 6m de profondeur

#### 4.2 Les essais pressiométriques

Les essais ont été réalisés avec une sonde lanterne battue de diamètre extérieur 60 mm, 49 mm de diamètre interne et de 110 mm de long selon la norme (AFNOR 1999 ; AFNOR, 2000). L'interprétation a été faite par le logiciel GaiaPress. Les courbes pressiométriques ont permis de déterminer le module de cisaillement  $G$ , l'angle de frottement  $\Phi'$  en fonction du frottement intergranulaire  $\phi_\mu$  et de la profondeur (Monnet *et al.*, 1994). Le contrôle final des caractéristiques mécaniques est réalisé par la superposition des courbes pressiométriques expérimentales et théoriques (Figure 4), et par la comparaison entre les pressions limites expérimentales  $P_1$  et théorique  $P_{ltheo}$ . Il a été réalisé 257 interprétations pour les 12 forages, mais 31 essais ont été rejetés car la pression de fluage n'avait pas été atteinte. Pour les 226 essais valides, le module d'élasticité et l'angle de frottement ont été déterminés par famille de sol de façon à permettre une analyse statistique.

#### 4. Analyses statistiques des résultats pressiométriques

##### 4.1 Distribution théorique de l'angle de frottement

Les angles de frottement ont été interprétés comme une distribution de type loi Normal, Log Normal, Exponentielle, Weibull, Gamma, Chi2, Student et Pareto. Le test d'*Anderson-Darling (A-D)* (Stephens, 1974) a été appliqué pour valider ces distributions supposées. Ce test est meilleur que celui de *Kolmogorow-Smirnov* car il donne plus de poids à la queue de la distribution. Ce test est défini, avec n la taille de l'échantillon et F la distribution spécifique étudiée, par les relations :

$$A^2 = -n - S \quad [1]$$

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{(2i-1)}{n} \cdot [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))] \quad [2]$$

Ce test est rejeté si la valeur de A est plus grande que la valeur critique choisie. Les résultats du test A-D appliqué aux huit distributions et aux 12 familles de sol ont conduit aux remarques suivantes :

- Une famille de sol doit avoir un nombre minimum de valeurs pour être interprétée de manière statistique. Par exemple la famille F6, qui n'a que 6 valeurs ne peut pas être considérée comme une variable statistique et aucune distribution ne lui correspond. Un nombre minimum de 10 à 15 valeurs est nécessaire.
- Aucune distribution ne représente l'ensemble des familles de sol. La loi Normale est utilisée le plus souvent pour atteindre une valeur moyenne et un écart type, mais cette distribution ne peut pas être appliquée partout. Elle ne représente correctement que les familles F1, F3, F4, F8 et le test A-D montre qu'il n'est pas correct de l'utiliser pour les autres familles (Tableau 1).
- La loi Chi2, correspond bien aux familles F1, F3, et semble une meilleure distribution que la loi Normale cependant les différences entre les deux distributions sont faibles et il serait nécessaire d'avoir un échantillon plus important pour conclure sur ce point.
- Pour la famille F8, la distribution montre une décroissance de l'angle de frottement avec de nombreuses valeurs proches du frottement intergranulaire. Dans ce cas la loi Pareto peut être utilisée. Ce sol est composé de sable fin avec une grande variabilité sur l'angle de frottement due à la présence de gravier.
- Les lois Exponentielles et Student ne sont pas adaptées aux mesures
- Certaines familles comme F10, F11, F12 ne correspondent à aucune distribution, mais si l'on trace les histogrammes on trouve une répartition bi modale, avec deux maximums proches de l'angle de frottement typique d'une part des sables et gravier d'autre part des sables et limons.

- Le test d'Anderson Darling a été utilisé avec succès ici, ce qui montre que la variabilité des sols naturels sur 12 Familles peut être appréhendée par des lois statistiques, surtout si les couches sont homogènes, épaisses et si des essais in-situ sont pratiqués.

#### 4.2 Angle de frottement caractéristique des familles de sol

L'analyse statistique a permis de déterminer par famille de sol, la valeur moyenne  $\bar{X}$ , l'écart type standard  $\sigma_{n-1}$ , la valeur caractéristique  $\Phi_k$  sur un nombre total de  $n$  essais. La valeur caractéristique est calculée de façon à ce qu'on ait une probabilité de  $\alpha$  (égale à 5%) pour que la nouvelle valeur expérimentale soit inférieure à  $\Phi_k$ :

$$P(X_0(\bar{X}_0, \sigma_0^2) > \Phi_k) = 95\% \quad [3]$$

Le tableau 1 donne les valeurs caractéristiques obtenues par famille de sol et par loi de distribution.

Table1. Valeur des angles de frottement caractéristiques obtenus

Sol	Description	Normal $\Phi_k$	LogNormal $\Phi_k$	Weibull $\Phi_k$	Gamma $\Phi_k$	Chi2 $\Phi_k$	Pareto $\Phi_k$	Exp. $\bar{\phi}$	$tg\bar{\phi} / tg\phi_k$
F1	<i>remblais de surface</i>	28.3	...	31.3	...	28.1	...	41.8	1.66
F3	<i>limons sableux marrons à verts</i>	26.4	29.5	28.4	29.8	24.9	...	38.3	1.46
F4	<i>sables et graviers</i>	29.3	29.7	28.3	29.5	...	...	35.8	1.28
F8	<i>sables profonds compacts</i>	31.1	31.3	30.3	30.3	...	...	35.3	1.17

##### 4.2.1. Distribution de Gauss

Nous supposons que la valeur moyenne de  $n$  mesures suit la distribution Normale, avec la variable de Student associé [4] à  $n$  degrés de liberté :

$$t_\alpha = \frac{\Phi_k - X_1}{\sqrt{\frac{n+1}{n}} \cdot \sigma_0} \quad [4]$$

La loi Normale est symétrique,  $t_\alpha$  étant conforme à une distribution de Student, à  $n-1$  degrés de liberté. Pour avoir 10% de probabilité de se produire,  $\Phi_k$  est alors :

$$\Phi_k = \bar{X} - \sqrt{\frac{n+1}{n}} \cdot (1-t_\alpha) \sigma_{n-1} \quad [5]$$

#### 4.2.2. Autre distributions

Pour les distributions autre que la loi Normale, la valeur de  $\phi_k$  est prise comme la valeur de la distribution cumulée, avec  $1-\alpha$  valeurs plus grandes que  $\phi_k$ . Le rapport entre les tangentes de angles moyens et caractéristiques angle apparaissent compris entre 1.17 et 1.66, ce qui est dans l'ordre de grandeur des coefficients de sécurités appliqués sur  $\Phi$  par les règles de l'*Eurocode* (Tableau 1).

### 4.3. Evolution de l'angle de frottement et de la pression limite avec la profondeur

Cette analyse a été effectuée sur les deux familles de sol les plus épaisses, pour pouvoir mettre en évidence le rôle de la profondeur, et plus généralement de la contrainte moyenne, sur l'angle de frottement.

#### 4.3.1. Famille F4 - sables et graviers

La pression limite (Figure 5) obtenue par le programme Gaiapress, qui tient compte de l'épaisseur des membranes et de l'équilibre élasto-plastique du sol montre une meilleure corrélation en fonction de la profondeur que la pression limite obtenue par les relations de Ménard.

L'évolution de l'angle de frottement (Figure 6) en fonction de la profondeur montre une décroissance des résultats moyens en terme d'angle de frottement alors que les valeurs trouvées par la relation de Ménard décroissent moins. Ceci peut être expliqué par les différences entre les deux déterminations: Les angles donnés par la théorie sont proportionnels à la contrainte verticale. Par contre les valeurs angulaires trouvées par la relation de Ménard ne dépendent pas de la contrainte verticale mais sont liées uniquement à la valeur de la pression limite si bien que l'on trouve alors la même évolution et la même dispersion entre les pressions limites et les angles de frottement obtenus par les relations Ménard. Entre 3 et 12m les angles de frottement théoriques sont plus grands que ceux obtenus par les corrélations de Ménard. En dessous de 12m la situation s'inverse et l'on trouve des valeurs angulaires inférieures aux résultats Ménard.

#### 4.3.2. Famille F8- sables profonds compacts

La pression limite (Figure 7) obtenue par le programme Gaiapress présente une variabilité très faible, alors que la méthode Ménard montre une plage de variation beaucoup plus importante.

Analyse statistique d'essais pressiométriques pour l'étude de la variabilité des sols du tunnel de la rocade Nord de Grenoble 9

Les angles de frottement moyens (Figure 8) sont pratiquement identiques entre les résultats théoriques et les résultats donnés par la corrélation de Ménard. Par contre les valeurs particulières du frottement du sol montrent deux groupes de frottement, l'un autour d'une valeur 42° proche de ce qu'on peut attendre d'un gravier et l'autre autour d'une valeur de 32° proche de ce qu'on peut attendre d'un sable. Ceci peut être expliqué par la composition du sol avec d'une part des graves et d'autre part des sables.

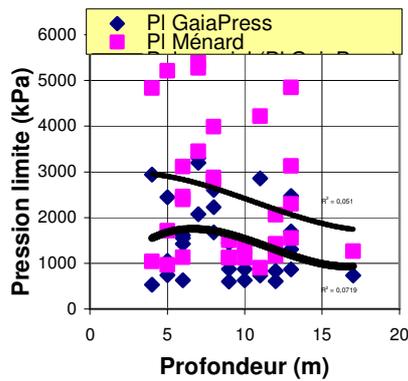


Figure 5. Evolution de la pression limite en fonction de la profondeur pour la famille F4

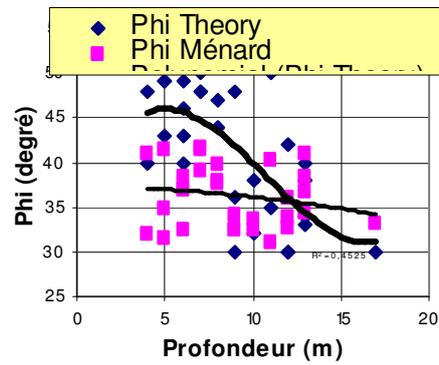


Figure 6. Evolution de l'angle de frottement en fonction de la profondeur pour la famille F4

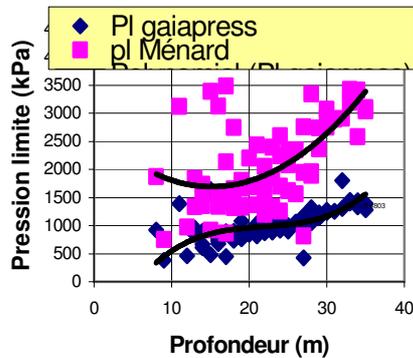


Figure 7. Evolution de la pression limite en fonction de la profondeur pour la famille F8

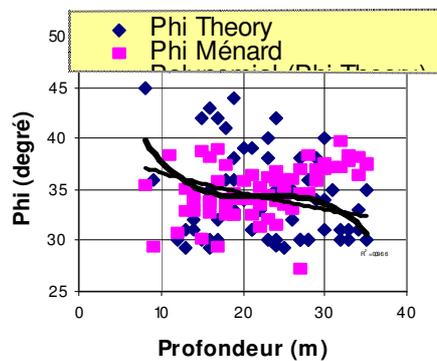


Figure 8. Evolution de l'angle de frottement en fonction de la profondeur pour la famille F8

#### 4. Conclusion

La campagne de reconnaissance géotechnique pour le tunnel de la Rocade Nord de Grenoble a été réalisée par des essais in situ, principalement des essais cycliques pour éviter le remaniement du sol et les problèmes de prélèvement intact. Des essais triaxiaux ont été réalisés pour mesurer les caractéristiques physiques du sol comme le frottement intergranulaire.

Les essais pressiométriques ont permis de mesurer le module de cisaillement et l'angle de frottement interne du sol en place avec des méthodes appropriées de mesure et d'interprétation.

L'analyse statistique des résultats montre que la loi Normale ne peut pas être généralisée à toutes les familles de sol, principalement par suite du faible échantillonnage. Cependant certaines distributions ont montré une bonne représentativité comme les lois Log Normal et Chi<sup>2</sup>.

L'analyse géotechnique du site du tunnel montre une variabilité des angles de frottement en fonction de la profondeur. Celle-ci peut être prise en compte par la détermination de la valeur caractéristique, telles que l'on ait 95% chance d'avoir une mesure plus grande que la valeur caractéristique.

#### 5. References

- Amar S., Clarke B.G.F., Gambin M. (1991) The application of pressuremeter test results to foundation design in Europe, *European Regional Technical Committee 4, Pressuremeters*, A.A.Balkema, 1-24.
- Clarke B.G., Gambin M. (1998) Pressuremeter testing in onshore ground investigations, Report by the ISSMGE Committee TC16, *1st Int. Congress on site Characterisation*, Atlanta, Ed. Balkema, Vol.2.
- AFNOR, 1994, Norme Française NF P 94-070, Essai à l'appareil triaxial de révolution
- AFNOR, 2000, Norme Française NF P 94-110-1, Essai pressiométrique Ménard, Partie 1 : Essai sans cycle.
- AFNOR, 1999, Norme Française NF P 94-110-2, Essai pressiométrique Ménard, Partie 2 : Essai avec cycle.
- Monnet J., Khelif J. 1994, Etude théorique et expérimentale de l'équilibre élasto-plastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre, *Revue Française de Géotechnique*, n°67, pp. 3-12.
- Monnet J., Chapeau C. Godard G., 2003, Caractérisation des sols pour le tunnel de la Rocade Nord de Grenoble, *Revue Française de Géotechnique*, n°101, pp. 57-70.
- Stephens M. A. (1974) EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 69, pp. 730-737.