

N° d'ordre : 2488

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DE MECANIQUE

par Nathalie MOUSSOUTEGUY

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : MECANIQUE

**UTILISATION COMBINÉE DES ESSAIS PRESSIOMETRIQUES ET
DIAGRAPHIES INSTANTANÉES POUR MIEUX ÉVALUER LE RISQUE
GÉOTECHNIQUE EN RECONNAISSANCE DES SOLS**

Soutenue le : 17 septembre 2002

Après avis de :

MM. R. FRANK.....**Rapporteurs**
J.L. FAVRE

Devant la Commission d'examen formée de :

MM. D. BREYSSE.....**Directeur de thèse**
P. CHASSAGNE.....**Examineurs**
F. DEPARDON
Mme J. RISS
M D. POULAIN..... **Invité**

Remerciements

Je remercie en tout premier lieu mon directeur de thèse M. Denys BREYSSE, sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour. En plus de la qualité de son encadrement, j'ai apprécié sa disponibilité et son soutien permanent. Ses compétences et sa rigueur de travail m'auront guidées tout au long de mon parcours et auront permis l'aboutissement de cette étude et, le plus important, contribués à ma formation.

J'adresse toute ma reconnaissance à M. Pascal CHASSAGNE, pour l'accueil et l'aide qu'il m'a apportée au sein du bureau d'études ALIOS INGENIERIE. Je n'oublie pas sa gentillesse et les moyens mis à ma disposition.

J'exprime également mes remerciements à M. Daniel POULAIN pour ses conseils et le suivi de mon travail.

Je remercie Messieurs Roger FRANK et Jean Louis FAVRE d'avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail, ainsi que M. François DEPARDON pour l'intérêt porté à cette étude. Leurs conseils et remarques, riches d'enseignement, m'apporteront beaucoup dans la poursuite de mon activité professionnelle.

Je souhaite également remercier Mme Joëlle RISS pour la disponibilité dont elle a fait preuve à mon égard et j'exprime toute ma gratitude à M. Bernard CLEMENT pour son accueil au sein du Centre de Développement des Géosciences Appliquées de l'Université Bordeaux I.

Il convient également de souligner que ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE avec le soutien financier du FEDER et de la DRRT Aquitaine.

Enfin, je ne saurais terminer ces remerciements sans exprimer mon infinie reconnaissance à mes amis, compagnons de thèse ou de travail qui ont su me porter et reconforter jusqu'au bout et dans les moments les plus difficiles A Kasper.

Table des matières

Remerciements	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des annexes	

Introduction

<i>Partie I</i>	5
<i>Problématique et présentation des moyens de reconnaissance retenus pour notre étude</i>	5
<i>Chapitre I</i> -	6
<i>L'hétérogénéité du sol et les pratiques actuelles en reconnaissance géotechnique</i>	6
1. L'hétérogénéité du sol.....	6
2. Les conséquences d'une méconnaissance de la variabilité d'un site : Augmentation du risque	12
3. Les objectifs de la reconnaissance géotechnique.....	14
3.1. Les missions géotechniques.....	14
3.2. Définition d'une campagne de reconnaissance	16
3.3. Détermination d'une valeur de calcul représentative	17
3.4. Exemple d'un cas réel - Etude d'un système de fondation	19
3.5. Variabilité et incertitudes.....	23
4. Mesure et estimation de l'hétérogénéité du sous-sol : l'expérience acquise.....	28
4.1. Multiplicité de l'information	28
4.2. Passage de l'échantillon à la population.....	30
<i>Chapitre II</i> -	33
<i>Moyens de reconnaissance retenus : les essais pressiométriques et les enregistrements de paramètres de forage</i>	33
1. Les essais pressiométriques.....	33
1.1. Quelle fiabilité pour le modèle de calcul ?	34
1.2. Les atouts et limites de l'essai	35
2. Les diagraphies instantanées	37
2.1. Principe et signification des paramètres enregistrés	37
2.2. Combinaison de paramètres de forage.....	42
2.3. Interprétation du signal diagraphique : Identification des limites de couches au sein d'un forage..	42
2.4. Les atouts et limites des diagraphies instantanées	47
2.5. Applications pratiques des diagraphies instantanées et utilisation combinée de différents modes de reconnaissance	49
3. Nos objectifs et les étapes de notre démarche	51

Partie II	53
La mise au point des outils	53
Chapitre I -	59
Corrélations entre paramètres diagraphiques et pressiométriques : à quelle échelle travailler ?	59
1. Les outils statistiques utilisés	59
1.1. L'analyse en composantes principales	59
1.2. Liaison entre deux variables - Régression linéaire et corrélation	61
2. Application aux variables diagraphiques et pressiométriques	64
2.1. Méthode	64
2.2. Des corrélations universelles par classe de matériaux ?	68
2.3. Des corrélations par site ?	72
2.4. Corrélations et régressions par site	73
Chapitre II -	78
Etablissement d'une lithologie plausible	78
1. Objectifs et principe algorithmique	78
2. Sous-procédure 1 : Mise sous forme d'un log. de probabilités de la lithologie de départ, proposée a priori par le géotechnicien.	81
3. Sous-procédure 2 : Calcul des fonctions de répartition des paramètres considérés	84
4. Sous-procédure 3 : Pour chaque formation, calcul des densités de probabilités du paramètre de forage D1.	86
5. Sous-procédure 4 : Attribution d'une valeur de probabilité lithologique aux valeurs mesurées du paramètre de forage D1.	89
6. Sous-procédure 5 : Calcul du critère de convergence.	92
7. Validation de la démarche	94
7.1. Principes	94
7.2. Tests sur un signal synthétique peu bruité	95
7.3. Tests sur des signaux réels.....	103
Chapitre III -	110
Exploitation des résultats et évaluation de la sécurité	110
1. Construction d'un intervalle de valeurs pressiométriques probables	110
1.1. Estimation d'un intervalle de valeurs pressiométriques probables.....	110
1.2. Génération de profils pressiométriques virtuels statistiquement représentatifs du site.....	113
1.3. Exemples de résultats	115
2. Justification des fondations et sécurité	117
2.1. Distribution de la portance du sol pour le site et la fondation considérés.....	117
2.2. Estimation de la sécurité attachée à une valeur de calcul	119
3. Optimisation de la campagne de reconnaissance pour un niveau de fiabilité fixé	122
3.1. Méthode	122
3.2. Résultats	125

Partie III.....	129
Application de la méthodologie proposée à des cas réels.....	129
Chapitre I -.....	130
Le site expérimental de TALENCE / GRADIGNAN - France. Les moyens et construction d'une image du site	130
1. Présentation du site d'étude.....	130
1.1. Situation et description du site.....	130
1.2. Contexte géologique	131
2. Les moyens de reconnaissance mis en œuvre	134
2.1. Campagne de reconnaissance préliminaire - Phase 1	135
2.2. Campagne de reconnaissance : phase 2	138
3. Construction d'une image du site.....	143
3.1. Lithologie perçue à la fin de la reconnaissance préliminaire - Phase 1	143
3.2. Résultats des essais de laboratoire - A l'issue de la phase 2	150
Chapitre II -	160
Exploitation des données diagraphiques et pressiométriques - Homogénéité et variabilité. Echelles d'observation et corrélations	160
1. Choix de l'échelle de travail ?	163
2. Etablissement des corrélations utilisées dans l'estimation des paramètres pressiométriques.....	173
Chapitre III -.....	180
Résultats	180
1. Propositions lithologiques à l'issue de la reconnaissance approfondie - Phase 2.1	180
1.1. Etablissement d'une lithologie à l'échelle du forage.....	181
1.2. Proposition d'une lithologie à l'échelle du site	186
2. Estimation du risque attaché à une valeur géotechnique.....	187
2.1. La démarche	187
2.2. L'estimation de l'ingénieur.....	189
2.3. L'estimation proposée via la méthodologie mise en œuvre	190
2.4. Evaluation des risques	192
Chapitre IV -	194
Portabilité de la méthodologie - Chantier de BOULOGNE	194
1. Etablissement des corrélations	195
2. Estimation des intervalles de valeurs pressiométriques probables	197
3. Estimation du risque attaché à chaque valeur nominale pour une fondation profonde donnée.....	199

<i>Partie IV</i>	205
<i>Analyse critique des résultats, perspectives</i>	205
1. Impact de l'interprétation lithologique sur les résultats	205
2. Qualité médiocre des corrélations employées	208
3. Estimation de profils pressiométriques pour des forages où seules les diagraphies instantanées sont disponibles.....	209
4. Prise en compte de la répartition spatiale des données	212
4.1. Identification d'une structure de corrélation	213
4.2. Modèle de corrélation spatiale.....	218
5. Apport réel des diagraphies instantanées dans l'estimation du risque associé à une valeur géotechnique.	221
6. Recommandations et précautions de chantier à mettre en œuvre pour optimiser les résultats obtenus par le processus proposé.	223
6.1. Acquisition contrôlée des données diagraphiques.	223
6.2. Qualité des essais pressiométriques	224

Conclusion générale

Bibliographie

Résumé / Abstract

Liste des figures

Figure 1: Exemple de la variabilité lithologique entre 2 forages.....	8
Figure 2 : Profils pressiométriques obtenus sur une zone restreinte (Zone SP7) - Site de l'IUT de Génie Civil Bordeaux I.....	25
Figure 3: Courbes pressiométriques d'essais correspondant aux critères d'acceptabilité selon la norme NFP 94-110 et essais présentant des anomalies.....	36
Figure 4 : Schéma de principe d'une foreuse (Exemple de la BE2030).....	37
Figure 5: Taillant à plaquettes	40
Figure 6: Tricone.....	40
Figure 7: Usure des dents d'outil de forage par l'American association of Oil Drilling Contractors (d'après Mazier 90).....	41
Figure 8 : Traitement et découpage de profils diagraphiques (vitesse d'avance) par le programme Scanner.....	45
Figure 9 : Schéma simplifié du raisonnement suivi	56
Figure 10 : Exemple de relation obtenue entre le logarithme népérien de la pression de fluage ($\ln(pf^*)$) et celui de la combinaison de paramètre vitesse d'avance sur pression sur outil ($\ln(VA/Po)$) pour les matériaux dits "sableux" du chantier de la Bourse de Moscou.....	64
Figure 11: Nuages de points obtenus pour le chantier de la Bourse de Moscou, dans les sables, les argiles et dans les calcaires.....	66
Figure 12 : Equation de régression obtenue sur le chantier du TGV belge au sein des matériaux argileux.....	66
Figure 13 : Cercle de corrélation et espace des individus pour le plan factoriel F1/F2 pour une base de données considérant 3 chantiers A, B et C menés dans des conditions de forage différentes.	68
Figure 14: Moyennes de pressions sur outil et moyennes des vitesses d'avance pour les 3 chantiers (IUT, Moscou, TGV belge).....	70
Figure 15 : Dispersion des moyennes de module pressiométrique en fonction des moyennes de vitesse d'avance relative pour les 3 chantiers (IUT, Moscou, TGV belge).....	71
Figure 16 : Cercles de corrélation et plans factoriels F1/F2 obtenus pour chacun des sites A, B et C au sein des matériaux argileux.....	72
Figure 17 : Nuages de points obtenus entre la pression de fluage nette (respectivement le module pressiométrique) et les paramètres de forage acquis au sein des matériaux argileux sur le chantier du TGV belge (chantier C).....	74
Figure 18 : Chantier B (Bourse de Moscou) Nuages de points et régressions obtenues au sein des matériaux argileux.....	75
Figure 19 : Régression entre le logarithme népérien de la vitesse d'avance (VA) pondérée par la pression sur outil (Po) et le logarithme népérien de la pression de fluage nette (pf^*).....	76
Figure 20 : Organigramme récapitulatif des étapes permettant l'établissement évolutif d'une lithologie probable à partir d'une lithologie initiale établie a priori.....	80
Figure 21 : Illustration de la sous procédure 1 : Mise en forme des propositions lithologiques données comme paramètres d'entrée par le géotechnicien (lithologie définie à partir des notes de sondage limitées à 1.70 et 3.70, zone d'incertitude postulée par le géotechnicien égale à 1.00 m).	83
Figure 22 : Illustration de la sous procédure 2 : fonctions de répartition calculées à partir du signal de VA présenté en Figure 21 et de la proposition lithologique initiale. (itération n°1).....	86
Figure 23 : Schéma représentant la discrétisation opérée sur une fonction de répartition, sous procédure 3.....	87
Figure 24 : Résultats obtenus au terme de la sous procédure 3 sur le signal diagraphique présenté en figure 7.	88
Figure 25 : Fonctions de répartition de PF1 et PF1/form _i obtenues à partir des hypothèses de départ et au terme de 10 itérations.	90
Figure 26 : Log des probabilités d'appartenance aux formations 1, 2 et 3 pour la vitesse d'avance d'un forage mené dans l'agglomération bordelaise.....	91
Figure 27 : Illustration des 3 tests réalisés sur un signal synthétique peu bruité	96
Figure 28 : Fonctions de répartition obtenues pour les hypothèses de départ des cas test 1 à 3 sur un signal synthétique peu bruité.	96
Figure 29 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itération	97
Figure 30 : Log des probabilités lithologiques obtenus aux itérations 2 et 4.....	98
Figure 31 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itérations - cas test n°2.	98
Figure 32 :Log des probabilités lithologiques pour le cas test n°2. Itérations 4 et 19	99
Figure 33 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itérations - Cas test n°3... 100	100

Figure 34 : Log des probabilités lithologiques obtenus pour le cas test n°3.	101
Figure 35 : Log. diagraphiques de la vitesse d'avance et de la pression d'injection pour le forage retenu.....	103
Figure 36 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itérations.....	104
Figure 37 : Log des probabilités lithologiques obtenus à l'itération n°6 et signal de Pi étudié.....	105
Figure 38 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itérations - Signal de VA .	106
Figure 39 : Log probabilités lithologiques obtenus à partir du signal de VA - Itération n°7.....	107
Figure 40 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itération - Signaux VAPi .	108
Figure 41 : Log des probabilités lithologiques obtenus pour l'itération n°4 - Signaux VAPi.....	108
Figure 42 : Organigramme des différentes étapes de la procédure et niveau d'implication du choix lithologique.....	113
Figure 43 : Détermination de l'intervalle des valeurs probables de pf^* pour un niveau de confiance de 0.8 et génération de profils pressiométriques virtuels.	116
Figure 44 : Fonction de répartition de la contrainte ultime qu pour un site fictif et une fondation superficielle donnée.	119
Figure 45 : Extrapolation par une fonction exponentielle de la fonction de répartition dans le domaine des faibles valeurs de qu	120
Figure 46 : Lecture du risque associé à la valeur géotechnique et définition d'une valeur géotechnique pour un risque donné.	121
Figure 47 : Représentation iconographique des sites A, B, C et D et les fonctions de répartition des qu correspondantes.	124
Figure 48 : Plan de situation du site expérimental.....	131
Figure 49: Echantillons du carottage C2, formation dite "calcaire".....	133
Figure 50: Dispositif de mesure d'une pseudo-section électrique.....	136
Figure 51: schéma d'implantation des sondages réalisés à la tarière et profils électriques au stade de l'investigation préliminaire (phase1).....	137
Figure 52: Tableau de synthèse des forages, conditions de forage, profondeurs d'exécution et nombre d'essais pressiométriques réalisés.	140
Figure 53: Schéma d'implantation des points de la reconnaissance approfondie phases 2.1 et 2.2..	141
Figure 54: Pseudo-sections des quatre profils réalisés sur le site expérimental - Dispositif pôle - dipôle et sondages tarière pouvant être rapportés à chaque profil.	145
Figure 55: Profils hydriques obtenus au droit des sondages T1 à T4 et indicateurs VBS, passant à 80 μm et 2 μm	149
Figure 56 : Exemples d'échantillons retenus pour les essais triaxiaux	151
Figure 57 : Courbes obtenues dans le repère (σ_1 - σ_3) en fonction de la déformation axiale ϵ (%) pour l'échantillon prélevé en C2 entre 2.10 et 2.30 m de profondeur. σ_3 prend successivement les valeurs de 50 kPa (courbe 1), 100 kPa (courbe 2), 200 kPa (courbe3) et 300 kPa (courbe 4).	152
Figure 58 : Discrétisation des courbes expérimentales obtenues dans le repère (σ_1 - σ_3) en fonction de la déformation axiale ϵ (%). Echantillon prélevé en C2 entre 2.10 et 2.30 m de profondeur.	153
Figure 59 : Report des points expérimentaux (Figure 58) dans le repère $\epsilon/(\sigma_1-\sigma_3) = f(\epsilon)$	153
Figure 60 : Détermination de la droite de régression reliant la pression relative à la cote de l'essai pressiométrique et le module initial estimé à cette profondeur.	154
Figure 61": Comparaison des valeurs de modules obtenues par les essais triaxiaux CU menés sur des échantillons des carottages C1 et C2, et valeurs de modules pressiométriques mesurés au sein des sondages pressiométriques les plus proches SP4 et SP9.	155
Figure 62 : Correspondance entre les valeurs de modules pressiométrique mesurés in situ et les valeurs de module obtenues au laboratoire sur des échantillons des carottages C1 et C2.	155
Figure 63 : cercle des corrélations et répartition des échantillons prélevés en C1 et C2 dans le plan factoriel F1 / F2.....	156
Figure 64 : cercle des corrélations et répartition des échantillons prélevés en C1 et C2 hormis les échantillons C1_8.5 et C2_10.6m dans le plan factoriel F1 / F2.....	157
Figure 65 : Mise en parallèle des profils obtenus de droite à gauche : les valeurs de VBS sur les échantillons prélevés en C2, les valeurs de pf^* et E au sein du sondage SP9, les profils diagraphiques de VA et Pi, lissés sur une fenêtre de taille 0.10 m.....	158
Figure 66 : Passage entre signaux bruts et signaux filtrés par le logiciel Scanner - Forage SP4.....	162
Figure 67 : Plan factoriel F1/F2 et cercle des corrélations obtenus sur l'ensemble des données pressiométriques et diagraphiques à la fin du chantier.	166
Figure 68 : Log des vitesses d'avance, log pressiométriques et coupe lithologique simplifiée obtenue au niveau du carotté C2 pour une zone restreinte de mesures, la zone "SP7".	171

Figure 69 : Moyennes des pf^* obtenues pour chaque condition de forage en fonction des moyennes des moyennes des vitesses d'avance calculées sur un intervalle de 0.20 m de part et d'autre des cotes d'essais pressiométriques.	174
Figure 70 : Corrélations obtenues à partir des individus des forages vPLL - Matériaux dits "Argileux".	175
Figure 71 : Corrélations obtenues à partir des individus des forages vPLL - Matériaux dits "Calcaires" à partir de coupe établie en cours d'exécution des sondages).....	176
Figure 72 : Corrélations obtenues à partir des individus des forages jBPV - Matériaux dits "Argileux".	177
Figure 73 : Corrélations obtenues à partir des individus des forages jBPV - Matériaux dits "Calcaires"	178
Figure 74 : Log lithologiques établis par deux équipes de sondage à partir de forages destructifs menés à environ 3 m l'un de l'autre.	182
Figure 75 : Fonctions de répartition des paramètres de forage pour les formations A ($p_f^* < 1$ MPa) et C ($p_f^* > 1$ MPa) du forage SP6.	184
Figure 76 : Lithologie probable obtenue pour le forage SP6 (site expérimental) à partir des paramètres de forage VA et Po,.....	185
Figure 77 : Propositions lithologiques à l'échelle du site, en prenant en compte l'information diagraphique (à partir des DI) et considérant un découpage suivant pf^* (PP).	187
Figure 78 : Fonction de répartition de la contrainte ultime qu pour le site de l'IUT pour une fondation superficielle de base $B = 0.70$, niveau d'assise = 2.90 m /terrain actuel, ancrage de 0.50 par rapport à la plate forme terrassée.	189
Figure 79 : Fonction de répartition des qu pour le site de l'IUT et la fondation étudiée (7 x 50 = 350 simulations).	190
Figure 80 : Modèle établi pour la queue de distribution de qu , à l'issue de la phase de reconnaissance 2.1, hormis les forages SP5 et SP8.	191
Figure 81 : Détermination du risque associée à chaque valeur de portance du sol définie par l'ingénieur.	191
Figure 82 : Détermination de la valeur de risque pour les valeurs de contrainte proposées par l'ingénieur reconnaissance phase 2.1 moins les forages SP1 et SP7jBLL	193
Figure 83 : Corrélations établies au sein des sables ; au sein des matériaux marneux à passées ou lentilles sableuses ou gréseuses.	196
Figure 84: Intervalle de valeurs probables de la pression de fluage pour un niveau de confiance de 80 % et profils pressiométriques mesurés.	199
Figure 85 : Courbes proposées dans le DTU 13.12 pour la détermination des valeurs de frottement latéral unitaire limite compte tenu de la nature des matériaux et des valeurs de pl^* (dans notre cas $1.7pf^*$).	200
Figure 86 : Fonction de répartition des valeurs de charge nominale prises pour un micropieu de longueur $L = 15$ m et de $\varnothing 200$ mm, site de Boulogne.	201
Figure 87 : Modèle proposé et risque associé à la valeur de $Q_{nELS} = 245$ kN et valeur de Q_n associée au risque 5.10^{-3}	202
Figure 88 : Fonctions de répartition obtenues pour le site de l'IUT selon deux échelle d'observation, à l'échelle du forage et à l'échelle du site.	207
Figure 89 : Risque associé aux valeurs de q_{ELS} et q_k selon la considération de la lithologie à l'échelle du forage ou à l'échelle du site.	207
Figure 90 : valeurs de $p(q_{réel} < q_{ingénieur})$ selon le choix de considérer la lithologie à l'échelle du forage ($p(formi)xz$) ou à l'échelle du site ($p(formi)z$).	208
Figure 91 : Estimation de l'intervalle de valeurs de pf^* au droit de SP4 au risque de 20%.	211
Figure 92 : Variogrammes expérimentaux suivant les directions x et y pour la pression de fluage pf^* , le module pressiométrique à l'échelle du site et au niveau de la zone SP7.	214
Figure 93 : Variogrammes expérimentaux de pf^* , E, VA, Po, Pi et CR suivant la direction D3 pour l'ensemble du site	215
Figure 94 : Ensemble des profils des pf^* mesurés sur l'ensemble du site	216
Figure 95 : Variogramme expérimental des pf^* suivant la direction D3 (profondeur) pour la tranche de sol comprise en 4 et 11 m de profondeur (Tolérance sur le pas = 0.5 et 0).	217
Figure 96 : Variogramme expérimental des pf^* suivant la direction D3 (profondeur) pour la tranche de sol comprise en 4 et 11 m de profondeur (Tolérance sur le pas = 0).	217
Figure 97 : Modèle de variogramme retenu pour pf^* (prise en compte de l'anisotropie des valeurs suivant D1, D2 et D3).	218

<i>Figure 98 : Pour les forages de la phase de reconnaissance 2.2, pf^* mesurée en fonction de pf^* estimées par krigeage.....</i>	<i>219</i>
<i>Figure 99 : Profils de pf^* : estimés via les paramètres de forages VA, par krigeage 1 essai sur 2 ayant été réalisé, profils de pf^* mesuré (forage SP4).....</i>	<i>220</i>
<i>Figure 100 : Fonctions de répartition obtenues en considérant ou non l'information diagraphique....</i>	<i>223</i>

Liste des tableaux

Tableau 1: Moyennes, écart-types et coefficients de variation obtenus pour les paramètres pressiométriques correspondant aux matériaux argilo-silteux, argilo-sablo-silteux et limono-argileux rencontrés sur le site du projet de la bourse de Moscou.....	9
Tableau 2 : Valeurs statistiques repères obtenues sur les pressions de fluage et modules pressiométriques des forages d'une zone restreinte du site de l'IUT.....	26
Tableau 3 : modes d'investigation les plus courants, caractère continu ou non de l'information, obtention d'une valeur de calcul.	33
Tableau 4 : Principales valeurs statistiques relatives aux chantiers A, B et C.....	69
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des valeurs du seuil de convergence pour les cas test 1, 2 et 3. ...	101
Tableau 6 : Tableau récapitulatif des moyennes (m), écart-type (sd) et coefficient de variation (CV) pour le paramètre P_i selon deux découpages lithologiques.....	104
Tableau 7 : Résultats obtenus, pour une fondation superficielle, selon le % d'hétérogénéité du site et le caractère plus ou moins marqué des accidents.	125
Tableau 8: Programme de reconnaissance mis en œuvre sur le site expérimental.....	134
Tableau 9 : Principales grandeurs statistiques pour les teneurs en eau des échantillons prélevés de T1 à T4 entre 0 et 4.50 m de profondeur.....	149
Tableau 10 : Valeurs de E_i estimées aux cotes des essais pressiométriques.....	154
Tableau 11 : Principaux résultats des essais triaxiaux.....	156
Tableau 12 : Tableau récapitulatif des valeurs statistiques obtenues sur les paramètres pressiométriques et moyennes des paramètres de forage pour les différentes conditions de forage.	167
Tableau 13 : Tableau récapitulatif des valeurs statistiques obtenues pour les paramètres pressiométriques pf^* et E à la fin de la phase de reconnaissance 2.2.....	168
Tableau 14 : Tableau récapitulatif des valeurs statistiques obtenues sur les paramètres pressiométriques et moyennes des paramètres de forage selon les conditions de forage et pour deux classes de matériaux ($pf^* < 1$ MPa et $pf^* > 1$ MPa).....	169
Tableau 15 : Principales valeurs statistiques concernant les paramètres pressiométriques.	170
Tableau 16: Contraintes ultimes obtenues pour l'ensemble du site et au niveau de la zone SP7 (phase 2.1 de la reconnaissance géotechnique).	189
Tableau 17: Probabilités obtenues pour que les valeurs proposées par l'ingénieur soient supérieures à la valeur de portance réelle du sol pour le site selon le nombre de sondages pris en compte.	193
Tableau 18: Valeurs de Q_n , $Q_{n_{ELU}}$ et $Q_{n_{ELS}}$ calculées à partir des profils pressiométriques mesurés.	201

Liste des annexes

Annexe 1 : Chantier de la Bourse de Moscou - Plans de situation.

Annexe 2 : Chantier de la Bourse de Moscou - Schéma d'implantation des sondages.

Annexe 3 : Chantier de la Bourse de Moscou - Tableaux synthétiques des valeurs pressiométriques mesurées.

Annexe 4 : Chantier de Moscou – Log. pressiométriques.

Annexe 5 : Schéma d'enchaînement des missions géotechniques (Union syndicale géotechnique NF P 94 500).

Annexe 6: Classification des missions géotechniques types. (Extrait de la norme NF P 94 500).

Annexe 7: Exemple d'un cas réel : Construction de bâtiments agricoles à Potensac -

- Plan de situation.
- Schéma d'implantation des sondages
- Résultats des essais *in situ* (profils de résistance dynamique et profils pressiométriques)

Annexe 8: Détermination du facteur de portance k_p pour une fondation superficielle à partir d'essais pressiométriques (Abaque tirée du DTU 13.12 de mars 1988).

Annexe 9: Procédure de calcul des tassements pour une fondation superficielle à partir du module pressiométrique (DTU 13.12 de mars 1988).

Annexe 10: Construction de bâtiments agricoles à Potensac - Estimation des tassements absolus au droit des points de sondages pressiométriques (calculs réalisés à partir du logiciel CALPRESS DTU 13.12 de mars 1988).

Annexe 11: Construction de bâtiments agricoles à Potensac - Estimation de la contrainte apportée par le radier et la cuve de gasoil.

Annexe 12 : Accroissement de la contrainte verticale $\Delta\sigma_z$ sous le coin d'une fondation rectangulaire uniformément chargée par la contrainte q .

Annexe 13: Principe et interprétation des essais pressiométriques

Annexe 14 : Dimensionnement des fondations superficielles et profondes à partir des essais pressiométriques

Annexe 15 : Combinaisons de paramètres de forage les plus couramment utilisées

Annexe 16: Log. lithologiques et pressiométriques de 15 forages exécutés lors de la reconnaissance du tracé du TGV belge entre Walhorn et Welkenraedt.

Annexe 17 : Détermination de la valeur au bleu de méthylène (VBS)

Annexe 18 : Détermination de la granulométrie par tamisage et par sédimentométrie.

Annexe 19: Procès verbaux des essais de VBS et granulométrie établis pour les prises d'essais réalisées sur les tarières T1 à T4 (phase préliminaire de reconnaissance du site expérimental).

Annexe 20 : Log. diagraphiques et pressiométriques (données brutes) obtenus lors de la reconnaissance du site expérimental de l'IUT.

Annexe 21 : Coupes lithologiques établies pour les sondages carottés C1 et C2.

Annexe 22 : Procès verbaux des essais triaxiaux réalisés sur le site expérimental (IUT - Talence / Gradignan)

Annexe 23 : Estimation des modules E_i à la cote des essais pressiométriques pour l'ensemble des échantillons soumis aux essais triaxiaux - Site expérimental de l'IUT

Annexe 24 : Tableaux récapitulatifs des données diagraphiques et pressiométriques relatives au site expérimental de l'IUT avant et après élimination des valeurs suspectes.

Annexe 25 : Log. des probabilités lithologiques obtenus via le processus itératif décrit partie II - Chapitre II pour les forages du site de l'IUT pour deux formations (seuil de convergence de $2 \cdot 10^{-2}$).

Annexe 26: Tableau récapitulatif des équations de régression utilisées pour l'estimation des intervalles de valeurs pressiométriques (phase de reconnaissance 2.1).

Annexe 27 : Chantier de Boulogne

- *Plan d'implantation des sondages,*
- *log. pressiométriques et diagraphiques issus du rapport d'étude géotechnique.*

Annexe 28 : Chantier de Boulogne - Tableau des données pressiométriques et diagraphiques retenues pour l'étude.

Annexe 29 : Grille de classement des essais pressiométriques selon la typologie de la courbe pressiométrique : qualification de la qualité des résultats pressiométriques.

Introduction

Dans le cadre d'un projet de construction de bâtiment, l'un des objectifs du géotechnicien est de définir une **valeur de portance du sol représentative** des terrains affectés par le projet. Dans cette problématique il est confronté à l'**hétérogénéité des matériaux** constitutifs du sous-sol qu'il ne peut apprécier que partiellement à partir d'un nombre limité de sondages.

En effet, dans le cadre d'un projet de construction de niveau, que nous qualifierons, "d'usuel", compte tenu des **contraintes économiques**, la taille de la campagne de reconnaissance géotechnique se limite très souvent à **quelques points de sondages** et, dans ces conditions, l'ensemble des variations lithologiques et / ou mécaniques des matériaux d'assise ne peut être perçu que partiellement.

Les conséquences d'une méconnaissance des hétérogénéités du niveau d'assise peuvent être lourdes et entraîner à court terme des surcoûts lors de la construction et à plus ou moins long terme des coûts liés aux dommages relatifs à un défaut de portance du sol.

Ainsi, la valeur de calcul définie par le géotechnicien dépend du nombre et de la localisation des sondages et le praticien n'est pas aujourd'hui en mesure d'associer un niveau de fiabilité à sa valeur de calcul. En d'autres termes, il n'a pas les moyens d'estimer quelle est la probabilité que la portance réelle du site soit inférieure à sa valeur de calcul, et donc le risque de sinistre lié à un défaut de portance du sol. En pratique, la démarche de l'ingénieur et les choix qu'il doit faire sont essentiellement basés sur l'expérience, sa connaissance a priori du site.

En France, le dimensionnement de la portance du sol via les règlements en vigueur (DTU 13.2 et 13.12, Fascicule 62) repose très souvent sur des **essais pressiométriques**. Ils permettent d'apprécier les caractéristiques in situ des matériaux tous les mètres au sein d'un forage, mais ne permettent pas toujours de localiser les modifications locales des propriétés mécaniques. De plus, la qualité des mesures dépend de la bonne exécution du forage préalable à leur exécution.

Les **enregistrements de paramètres de forages** ou diagraphies instantanées offrent la possibilité de localiser les hétérogénéités du milieu en cours d'exécution d'un sondage à très petite échelle, mais les résultats obtenus ne sont pas utilisables dans le cadre du dimensionnement des fondations et leur interprétation peut se révéler particulièrement délicate en raison de l'interdépendance des différents paramètres et des facteurs influençant la réponse diagraphique.

L'idée est d'exploiter de façon combinée les informations issues de ces deux techniques complémentaires, afin d'**améliorer l'image du sous-sol** et **mieux maîtriser le risque global** en générant une image du site plus riche qualitativement et quantitativement.

En effet, la génération d'un intervalle de valeurs pressiométriques à partir de signaux diagraphiques permet de prendre en compte les variations locales des propriétés mécaniques des matériaux et la variabilité des mesures, d'apprécier la cohérence des profils pressiométriques mesurés avec les enregistrements de paramètres de forage.

L'établissement de la fonction de répartition de la portance du sol, pour une fondation donnée, via les **règles de calcul usuelles** préconisées dans les DTU permet d'**estimer le risque attaché à la valeur de calcul définie par l'ingénieur** et inversement d'**associer à un niveau de fiabilité donné une valeur de contrainte pour le sol**.

La rédaction de ce mémoire a été réalisée au terme d'une convention CIFRE signée entre le bureau d'études géotechniques Alios Ingénierie et le laboratoire de recherche du CDGA (Centre de Développement des Géosciences Appliquées) de Bordeaux I. Une partie de ma formation s'est déroulée au sein de l'entreprise, ce qui m'a permis d'évoluer dans un contexte concret et mon travail s'inscrit dans cette **réalité du terrain** en présentant des exemples issus de dossiers traités et s'appuie sur des **données acquises en conditions réelles de chantier**. Dans ce contexte de formation par la recherche, nous avons choisi de mettre l'accent sur les difficultés pratiques rencontrées en bureau d'études et adapter des outils développés par la recherche à des données réelles acquises en conditions de chantier.

Ce mémoire, en participant à une meilleure évaluation des risques, s'adresse à la communauté scientifique, mais aussi aux maîtres d'ouvrages et bureaux d'études géotechniques, dans le sens où il contribue à améliorer les processus de reconnaissance. Le souci constant a été de mettre au point une démarche d'exploitation des données géotechniques dont puissent à terme se saisir les bureaux d'études géotechniques. Cette raison explique plusieurs parti pris dans le travail scientifique et la rédaction du mémoire. En effet, l'ensemble du travail est réalisé sur des **données réelles obtenues en conditions de chantier** avec les contraintes techniques qui en découlent (seules quelques données synthétiques sont exploitées pour les étapes de validation des algorithmes). L'accent est mis sur le **contexte opérationnel de la reconnaissance** et de la pratique de l'étude géotechnique telle qu'elle se pratique de façon usuelle, même si cette pratique nuit à la qualité des résultats que le théoricien serait en droit d'espérer.

Le mémoire se décompose en 4 parties :

Dans une première partie, nous exposons la **problématique liée à l'hétérogénéité du sol** et présentons les **moyens d'investigation retenus pour notre étude**. A partir de données réelles, nous exposons les problèmes liés à la variabilité des matériaux constitutifs du sous-sol, définissons les objectifs et les contraintes d'une campagne de reconnaissance géotechnique, nous appuyons sur l'expérience acquise afin de voir comment d'autres auteurs abordent le problème de l'hétérogénéité du sol. Les outils retenus pour notre étude étant les essais pressiométriques et les enregistrements de paramètres de forage, nous verrons les atouts et les limites des deux méthodes.

La seconde partie détaille les **étapes de la méthodologie proposée** permettant d'estimer le risque associé à toute valeur de portance du sol estimée par le géotechnicien en bureaux d'études. Ce risque est défini comme la probabilité que la valeur de calcul obtenue par l'ingénieur soit supérieure à la portance réelle du site, autrement dit, le risque de sinistre lié à un défaut de portance du sol. Dans le prolongement de la méthodologie, nous verrons comment, dans le cadre d'une première approche, il est possible d'optimiser le nombre de sondages à réaliser lors d'une étude géotechnique pour un niveau de fiabilité donné.

L'application de la démarche à des données issues d'un site expérimental de la région bordelaise et à des données provenant d'un chantier réel (Boulogne) constitue la **troisième partie** du mémoire.

Enfin, **l'analyse critique des résultats** obtenus fera l'objet d'une **quatrième section**. Nous apporterons des éléments complémentaires sur les facteurs affectant la fiabilité des estimations.

Partie I

Problématique et présentation des moyens de reconnaissance retenus pour notre étude

Chapitre I -

L'hétérogénéité du sol et les pratiques actuelles en reconnaissance géotechnique

1. L'hétérogénéité du sol

La lithologie du sous-sol (ou la succession de matériaux de natures différentes suivant la profondeur), les propriétés mécaniques relatives à différentes formations et les variations de ces mêmes propriétés pour une formation donnée résultent de l'histoire géologique du milieu et de l'activité humaine qui s'est déroulée sur le site au cours du temps.

En effet, les variations de faciès et des caractéristiques observées pour les géomatériaux constitutifs d'un site correspondent à une variabilité naturelle du milieu. Elle résulte des phénomènes de sédimentation, des mouvements tectoniques, de l'érosion et de l'altération du substrat. Ces différents phénomènes ont déterminé la nature des matériaux du sous-sol et contribué à la distribution spatiale des variables d'étude.

A cette variabilité naturelle du sol s'ajoute une variabilité d'origine anthropique, l'activité humaine ayant modifié la répartition naturelle des variables "nature des sols" et "propriétés mécaniques des matériaux". La construction et la démolition d'édifices au cours du temps, l'enfouissement de déchets, la modification des modelés paysagers ont contribué à faire du sous-sol un milieu totalement imprévisible. [Cherubini 93], [Breysse 99].

La variabilité du sous-sol est perceptible suivant trois dimensions, elle est à la fois horizontale et verticale. Les modifications des caractéristiques lithologiques et mécaniques du milieu sont effectives d'un point à un autre du plan, mais également au sein d'un forage où les propriétés des matériaux varient entre deux formations et au sein d'une même entité lithologique. On peut également ajouter que les variables "*nature*" et "*propriétés mécaniques*" des matériaux peuvent varier au cours du temps. Cette dernière forme de modification des valeurs mesurées au cours du temps ne sera pas ici illustrée, mais l'on sait par exemple que l'augmentation de la teneur en eau naturelle de matériaux limoneux tend à diminuer leurs propriétés mécaniques (problèmes de traficabilité en période pluvieuse sur les matériaux limoneux). [Ducreux 01].

Deux exemples concrets permettront d'illustrer la variabilité d'un site via l'étude de coupes lithologiques issues de campagnes de reconnaissance menées par le bureau d'études Alios Ingénierie.

Le premier cas rend compte de la variabilité lithologique des matériaux de couverture et de la profondeur variable du toit du substratum calcaire entre deux forages distants d'environ 15 mètres.

Dans le cadre d'une expertise, nous avons mené deux forages de part et d'autre d'un pavillon sinistré situé dans l'agglomération bordelaise (33), sur la commune de Villenave d'Ornon. Les forages fournissent une image ponctuelle de la succession des matériaux traversés et mettent en évidence l'hétérogénéité du toit du substratum calcaire (Figure 1).

Au-delà d'une épaisseur variable de remblais et terre végétale sablo-limoneuse, nous reconnaissons, des matériaux argileux identifiés jusqu'à 6.00 m de profondeur en T1 (profondeur d'arrêt du sondage) et 2.40 m de profondeur en T2. Ces formations argileuses peuvent contenir, selon la profondeur et les points de sondage, des éléments ou veines calcaires.

Au droit du sondage T2, à partir de 2.40 m de profondeur et jusqu'à 2.80 m de profondeur, le forage permet de relever un calcaire argileux altéré, non identifié au droit du sondage T1.

Le mode d'investigation utilisé (sondage à la tarière mécanique hélicoïdale de diamètre 63 mm) n'a pas permis de reconnaître la nature des matériaux au-delà de 2.80 m en T2 et ce sondage ne suffit pas pour affirmer qu'il s'agit effectivement du toit du substratum calcaire et non d'un banc ou bloc calcaire au sein des argiles. Toutefois, cet exemple illustre bien la variabilité des sols de part et d'autre d'un simple pavillon.

Notons que dans ce cas de figure la topographie du site ne présente pas de dénivelé permettant d'expliquer les différences de profondeurs des limites de formations. Celles-ci résultent uniquement de l'altération des calcaires du Stampien¹ sous climat chaud responsable de la karstification² du substratum carbonaté donnant au calcaire une forte hétérogénéité dans sa composition et une profondeur du toit de la formation très variable. [Vigneaux 75], [Lajoinie & al 86].

1 Stampien encore appelé Rupélien = 1^{er} étage de la série Oligocène (Ere tertiaire). Le Stampien s'étend de 34 à 28 millions d'années. A cette époque la mer est un peu plus avancée qu'à l'éocène (53 à 34 mA) et au niveau de la région bordelaise les dépôts sont caractéristiques d'un littoral peu profond (calcaire coquillier, calcaire récifal, calcaire à Astéries (calcaire comportant des éléments fossiles du squelette d'étoiles de mer)).

2 Karstification : altération du calcaire par des eaux d'infiltration plus ou moins agressives vis à vis du calcaire (karst) ou toute autre roche soluble (pseudo-karst).

Pavillon X . Villenave d'Ornon (33)

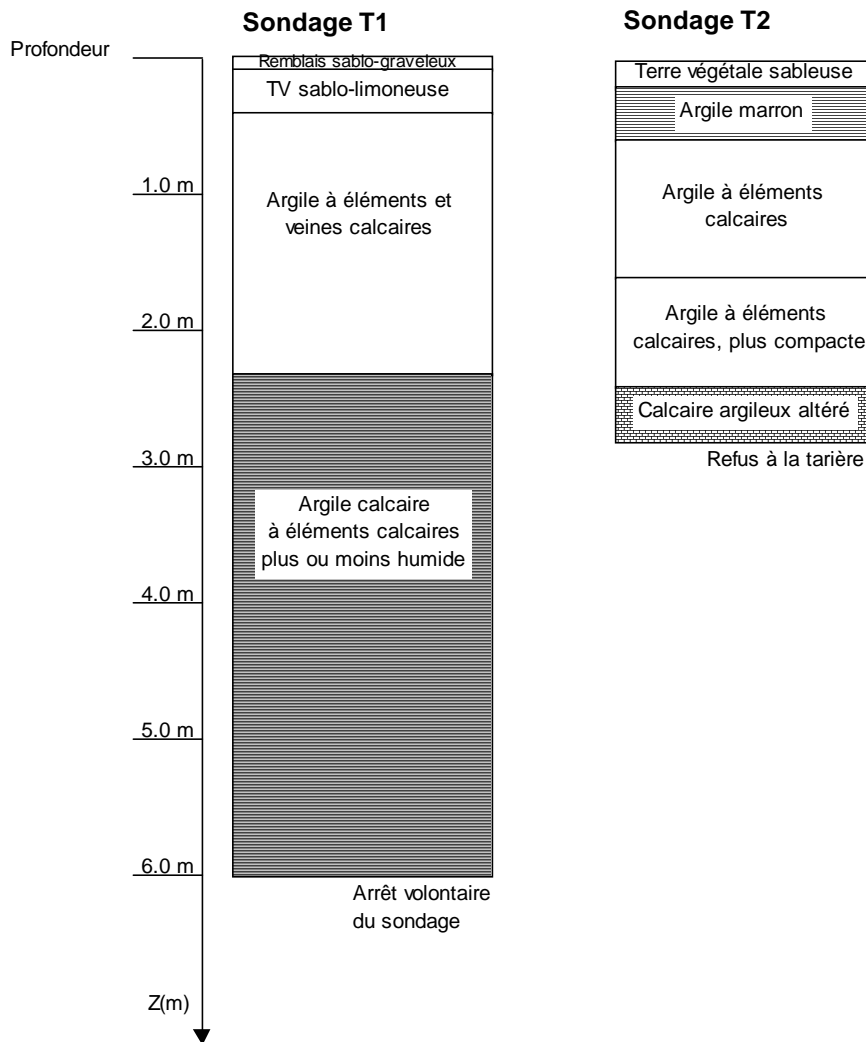


Figure 1: Exemple de la variabilité lithologique entre 2 forages

Le second exemple, présente les données pressiométriques relevées sur un chantier situé dans l'ouest de Moscou (Russie) (annexe 1). Les forages ont été menés dans le cadre du projet de construction de la bourse moscovite, l'emprise au sol du bâtiment était alors de (70x70) m².

Nous mettons ici en avant la variabilité des valeurs pressiométriques obtenues pour une formation donnée en considérant l'ensemble des forages, puis chaque sondage pris en compte individuellement.

Nous avons calculé pour les huit forages exécutés, les moyennes, écart-types et coefficients de variation des pressions limites nettes (p_l^*) et modules pressiométriques (E) obtenus au sein des matériaux argilo-silteux, argilo-sablo-silteux et limono-argileux rencontrés lors de la reconnaissance (Tableau 1).

Nature du sol	pression limite nette p_l^*			module pressiométrique E			Nombre d'essais pressiométriques		
	m (MPa)	sd (MPa)	CV	m (MPa)	sd (MPa)	CV	réalisés	corrects	% corrects
Argiles silteuses, sablo-silteuses et limons argileux	1.3	0.7	0.6	12.0	10.8	0.9	93	65	70
Argiles silteuses	1.3	0.8	0.6	12.2	11.9	1.0	68	51	75
Limons argileux (SP1)	1.5	0.5	0.3	11.5	4.6	0.4	14	12	86
SP2 argiles silteuses	0.7	0.3	0.4	5.9	4.2	0.7	10	6	60
SP4 argiles silteuses	1.1	0.4	0.4	18.5	19.8	1.1	11	7	64
SP5 argiles silteuses	*	*	*	*	*	*	10	4	40
SP7 argiles sablo-silteuses	*	*	*	*	*	*	11	2	18
SP8 argiles silteuses	1.6	0.8	0.5	9.6	6.0	0.6	12	10	83
SP9 argiles silteuses	1.2	0.8	0.7	12.8	11.9	0.9	12	12	100
SP10 argiles silteuses	1.3	0.8	0.6	12.1	10.1	0.8	13	12	92

Tableau 1: Moyennes, écart-types et coefficients de variation obtenus pour les paramètres pressiométriques correspondant aux matériaux argilo-silteux, argilo-sablo-silteux et limono-argileux rencontrés sur le site du projet de la bourse de Moscou.

La classification des valeurs en fonction de la lithologie est réalisée selon la coupe établie par le sondeur sur le site. Précisons que seuls les essais jugés correctement conduits ont été retenus pour l'analyse (annexes 2 et 3).

Au regard des log lithologiques établis (annexe 4), nous avons choisi de considérer l'ensemble des individus relevés entre les matériaux sableux superficiels et le substratum calcaire reconnu plus en profondeur. Cette formation intermédiaire est notée, selon les forages, "argile silteuse", "argile sablo-silteuse" (forage SP7) ou "limon argileux" (forage SP1). D'un point de vue lithologique, dans le cadre d'une vision "tri-couche" du site ("sables", "argiles", "calcaires"), cet ensemble intermédiaire constitue une formation unique. Toutefois, il apparaît clairement que ce bloc intermédiaire des "argiles" pourrait être divisé suivant 3 sous-ensembles selon le degré de finesse envisagé.

L'examen du tableau 1 montre que :

- pour les argiles silteuses seules, à l'échelle du site, tant pour les pressions limites (p_l^*) que pour les modules pressiométriques (E), les valeurs des moyennes et coefficients de variation restent du même ordre de grandeur que celles obtenues en considérant la formation intermédiaire dans son ensemble.

Cela signifie qu'à l'échelle du site, un découpage lithologique plus sélectif, ne permet pas, pour ce cas d'étude, de réduire la variabilité des résultats pressiométriques.

- pour une formation donnée, une analyse à l'échelle du forage ne permet pas nécessairement de réduire la variance des résultats par rapport à une analyse à l'échelle

du site. En revanche, une étude à l'échelle du forage peut révéler des points singuliers par rapport à une approche plus globale.

En effet, à l'échelle du forage, les points de reconnaissance SP2 et SP8 correspondent aux forages pour lesquels en moyenne les pressions limites sont les plus basses (0.7 MPa en SP2) et les plus élevées (1.6 MPa en SP8). Les coefficients de variation 0.4 et 0.5 sont un peu moins importants qu'à l'échelle du site (0.6).

Pour les modules pressiométriques relevés au sein des argiles silteuses, la tendance suit celle des p_i^* , si ce n'est une particularité au niveau du forage SP8, qui présentait en moyenne les valeurs de p_i^* les plus élevées alors que la moyenne des valeurs de E est inférieure à la moyenne obtenue à l'échelle du site. Ceci peut s'expliquer par une sous-estimation vraisemblable du module pressiométrique. En effet, en SP8, le rapport E/pl des essais jugés corrects dans les argiles silteuses est en moyenne de 6, avec des valeurs extrêmes comprises entre 2 et 8, ce qui est peu élevé.

Les coefficients de variation et l'examen des log pressiométriques montrent qu'au sein d'une même entité lithologique (argile silteuse) et à l'échelle du forage, les plages de mesures peuvent être importantes et révéler :

- des niveaux plus ou moins résistants (forage SP10 entre 12.5 et 17 m de profondeur),
- une dérive importante des paramètres suivant la profondeur (forage SP4).

Face à cette réalité du terrain, on comprend que l'attribution d'une valeur représentative pour une formation considérée comme "homogène" et qui ne l'est manifestement pas pose d'importants problèmes de choix.

La problématique de l'homogénéité d'une formation est abordée par Deplagne et Bacconnet [Deplagne & al 96], qui étudient l'alternance de couches compactées au sein d'un matériau réputé "homogène". Ils concluent que l'hypothèse d'homogénéité peut être admise dans le cas d'un problème de tassement d'ensemble, mais cette même hypothèse doit être rejetée pour une analyse de stabilité mécanique sensible à des variations centimétriques des propriétés des matériaux. Ainsi, l'hétérogénéité d'une formation ne saurait être traitée sans se préoccuper des questions du géotechnicien.

Le problème de la reconnaissance de la variabilité spatiale d'un site se pose aujourd'hui de manière accrue, notamment en raison de l'extension des zones urbaines. L'intérêt des scientifiques pour le sol urbain, pour les friches industrielles est grandissant. Des conférences sont consacrées au sujet [SUITMA Conference 00], des groupes de travail développent des sujets de recherche ayant pour thème le sol urbain (GIS sol urbain) [Barles & al 99] et notamment le traitement des problèmes liés à l'hétérogénéité des sols et à l'importance des matériaux de remblai dans le comportement des ouvrages. La restructuration des centres villes, l'extension des agglomérations conduisent les

investisseurs à établir des bâtiments sur des sols remaniés ou sur des zones autrefois délaissées en raison de la moindre qualité des terrains.

Ces sites particuliers conduisent le plus souvent à la réalisation de fondations spéciales et à la mise en œuvre de mesures spécifiques quant à la construction des bâtis. L'édification de structures pérennes sur ces terrains demande une reconnaissance préalable des singularités du site, (zones de remblais, localisation de lentilles de tourbe ou de matériaux compressibles, d'argiles dites « sensibles » aux variations hydriques du milieu...par exemple). Aux points déjà cités s'ajoutent, plus particulièrement dans la région bordelaise, l'identification du cryptorelief³, très variable, du calcaire à « astéries » (calcaire du Stampien), le repérage de zones karstiques et la meilleure approche possible des variations de sa constitution (niveaux argileux ou sableux, poches de décalcification...). La connaissance des caractéristiques de ce substratum se révèle essentielle, notamment pour le dimensionnement des fondations profondes. En pratique, il est bien souvent délicat de définir une coupe type à prendre en compte pour l'ensemble du site, à partir de laquelle l'entreprise conceptrice des pieux pourra dimensionner les fondations. De plus, la détermination de la valeur de frottement latéral unitaire limite à prendre en compte dans le dimensionnement est très variable au sein de ces matériaux.

En outre, bien souvent, les matériaux de construction utilisés, ne tolèrent que de faibles déformations, et le seuil de tolérance des utilisateurs vis à vis de la fissuration des bâtiments est relativement faible.

Sans aborder les imperfections des modèles de prévision des tassements absolus et différentiels [Breysse 01], [Kastner & al. 97], il est avant tout nécessaire d'apprécier au mieux les hétérogénéités du sous-sol sous l'emprise des fondations du projet, afin de prendre les dispositions constructives conséquentes.

Dans le cadre d'une reconnaissance des sols d'un niveau budgétaire que nous qualifierons « d'usuel », les indispensables sondages ponctuels, restent peu nombreux. Ils constituent un échantillonnage du milieu, qui n'est pas nécessairement représentatif des caractéristiques lithologiques et mécaniques plus ou moins erratiques et imprévisibles du site.

Pour donner un ordre de grandeur du nombre de points de sondages préconisés, dans le cadre d'un projet de construction de trois bâtiments d'emprises au sol respectives (40x11)m², (16x13)m² et (21x12)m², soit environ 900 m², l'ensemble du site représentant une superficie de l'ordre de 3500 m², il sera réalisé trois sondages pressiométriques et trois essais de pénétration dynamique, ce qui représente trois points d'information lithologique et six points

³ Cryptorelief : relief "caché". Morphologie du toit du substratum recouvert des formations qui lui sont postérieures.

permettant de définir les caractéristiques mécaniques des matériaux investis, valeurs, qui seront étendues à la zone d'influence du projet.

Dans ce contexte, les hétérogénéités ne sont pas toujours localisées et le géotechnicien se trouve alors devant la difficulté d'attribuer des valeurs représentatives pour les matériaux investis et pour le site.

Les campagnes géophysiques apportent la possibilité de réaliser une reconnaissance du site en trois dimensions. Elles peuvent être mises en œuvre avant les sondages mécaniques, et leur sont complémentaires. En ce sens, elles permettent d'implanter judicieusement les forages, de repérer les hétérogénéités locales du sous-sol, d'optimiser le nombre et l'emplacement des sondages [Lagabrielle 92].

En pratique, l'utilisation des méthodes géophysiques pour les projets de construction de petite taille reste marginale en raison des budgets, souvent restreints, alloués à la campagne de reconnaissance et de l'accès limité au site. De plus, selon les procédés de reconnaissance géophysique, le praticien reste confronté à la non unicité de la solution, à l'interprétation parfois subjective des résultats et à des délais souvent très courts pour la réalisation des études [Panissod & al. 01]. En outre, leur utilisation reste qualitative et les résultats obtenus ne permettent pas l'obtention des valeurs de calcul indispensables au géotechnicien. De fait, les techniques géophysiques sont employées souvent en phase de reconnaissance de projets plus ambitieux ou de contrôle a posteriori, en particulier lorsque les désordres sont apparus ou menacent [Rahmani 98], [Frappa & al. 00].

2. Les conséquences d'une méconnaissance de la variabilité d'un site : Augmentation du risque

Il est évident que la construction d'édifices ou d'ouvrages sur un milieu hétérogène mal connu peut avoir des conséquences directes sur le comportement de l'ouvrage, des effets induits sur l'environnement et, à terme, sur les utilisateurs.

Les conséquences directes d'une reconnaissance géotechnique insuffisante, d'un manque de prise en compte de la configuration du site s'illustrent par une mauvaise adaptation au sol des fondations. Les dommages affectent la structure en raison d'un défaut de portance du sol, les essais géotechniques n'ayant, alors, pas permis de révéler les caractéristiques mécaniques moindres d'une anomalie (niveau argileux d'épaisseur décimétrique, présence de lentilles de tourbe ou de vase).

Le manque d'information concernant l'hétérogénéité (lithologie et/ou propriétés mécaniques), des matériaux d'assise peut conduire :

- à une mauvaise évaluation des tassements différentiels, préjudiciables à la structure du bâtiment.

- à une absence de prise en compte des risques "catastrophes naturelles" dans le choix des fondations, tant dans leur dimensionnement que dans les sujétions d'exécution. Nous citerons les risques d'effondrements de carrières souterraines, l'impact de la sécheresse sur les argiles en tant que matériau d'assise et les risques de glissements de terrain.

Selon les statistiques actuelles, l'observatoire Sycodés, à partir de l'analyse de 1689 dossiers de sinistres, établit qu'une majorité des dommages affectant essentiellement les fondations superficielles de maisons individuelles est liée à des tassements différentiels résultant de la sensibilité à l'eau des sols d'assise ou à des problèmes de portance. Plus précisément, la présence de sols sensibles aux variations hydriques du milieu a été constatée pour 68 % des dossiers étudiés et dans 49 % des cas, l'étude de sol réalisée après sinistre a révélé un problème de portance. L'établissement de fondations superficielles sur un sol hétérogène ou à une profondeur insuffisante représente 60% des sinistres. Notons que seuls 7% des dossiers recensés avait fait l'objet d'une reconnaissance géotechnique avant construction. [Sycodés n°67].

Il faut savoir, que depuis 1992, l'estimation du coût de prise en charge des sinistres par le régime CATNAT s'élève à 3.2 milliards d'euros et qu'en 2000, 3365 communes ont été déclarées sinistrées (chiffres issus de la caisse centrale de réassurance).

Ainsi, l'absence de prise en compte de la variabilité du sol ou d'une mauvaise estimation des hétérogénéités a des conséquences économiques non négligeables.

Les effets indirects d'une reconnaissance insuffisante concernent aussi l'environnement. En effet, les terrassements réalisés lors de la phase de travaux, l'implantation de nouveaux bâtiments, l'imperméabilisation des surfaces, l'établissement de talus instables non végétalisés, l'enlèvement de butée en pied de talus ou l'apport de surcharges non maîtrisées en tête de talus conduisent à des changements morphologiques du modelé paysager. Ces différents éléments peuvent être à l'origine, de modifications des écoulements des eaux de ruissellement et de glissements de terrains. Nous citerons également le cas des surcharges apportées à proximité des bâtiments entraînant des tassements et engendrant des désordres sur la construction nouvelle et/ou sur les avoisinants.

Lors des travaux d'exécution, à l'ouverture des fouilles, des événements non prévus par la reconnaissance géotechnique peuvent perturber le chantier et entraîner des retards, engendrer des frais supplémentaires (opération de pompage, purge de poches de matériaux remaniés, mètres cube de béton non pris en compte dans les devis).

Durant la phase d'exploitation des bâtiments, des désordres peuvent apparaître et faire l'objet d'une déclaration de sinistre auprès des assurances. Ces désordres peuvent compromettre le bon fonctionnement de l'ouvrage, poser des problèmes de sécurité pour les personnes, engendrer de possibles risques de pollution et nécessiteront des solutions confortatives le plus souvent très coûteuses, parfois supérieures à la valeur matérielle du bien sinistré.

Il ressort que la sécurité attachée à un projet (absence de désordres sur le bâti, les avoisinants et l'environnement) est d'autant plus grande que la connaissance du site est complète, que les imprévus sont peu nombreux, que les effets induits par les modifications du site sont pris en compte.

Une diminution de la sécurité s'accompagne d'une augmentation des coûts pendant la phase des travaux et durant la phase d'exploitation. L'augmentation des risques liés à une méconnaissance du sol n'est pas sans conséquences financières significatives.

L'objectif de cette étude est de proposer une nouvelle approche visant à obtenir le meilleur compromis entre sécurité et coût associés à un projet de construction, sachant que le coût des sondages complémentaires reste dérisoire face aux surcoûts des travaux et aux coûts engendrés par un sinistre.

3. Les objectifs de la reconnaissance géotechnique

3.1. Les missions géotechniques

Sous l'impulsion de l'Union Syndicale Géotechnique (USG), les campagnes de reconnaissances géotechniques sont réalisées suivant des missions bien définies. Aujourd'hui, celles-ci font l'objet de la norme française NFP 94 -500 éditée en juin 2000 [NFP 94-500].

Chaque mission définit les devoirs et les responsabilités du bureau d'études géotechniques vis à vis du maître d'ouvrage ou du constructeur, son client, et des assurances en cas de sinistre. En effet, pour une mission déterminée, le bureau d'ingénierie fournit les éléments d'information correspondant à la mission demandée par le maître d'ouvrage. Si dans le cadre de son rapport, le géotechnicien sort de la mission initiale et répond par exemple à des objectifs appartenant à une mission géotechnique « plus ambitieuse », (G12 au lieu de G11 par exemple), il engage automatiquement sa responsabilité en cas de sinistre. Ces missions géotechniques permettent donc de définir les limites de travail de l'ingénieur.

Dans le cadre d'un projet de construction, l'enchaînement idéal pour une campagne de reconnaissance géotechnique peut se dérouler de la manière suivante :

Dans un premier temps, le projet n'est pas entièrement défini et le maître d'ouvrage désire connaître pour le site d'étude,

- Le ou les principes de fondation qui pourront être envisagés (fondations superficielles, semi-profondes ou profondes).
- Quelles seront les préconisations de mise en œuvre relatives à la configuration du site?

- Quels seront les risques naturels à prendre en compte (sismicité du site, inondations, glissements de terrain, matériaux sensibles au retrait / gonflement)?
- Quels seront alors les impacts possibles sur la construction future et comment en limiter les effets?

A ce stade préliminaire de la reconnaissance, le géotechnicien répond à une mission de type (G0+G11). Concrètement et de façon synthétique, la mission G0 comprend la réalisation des essais in situ et au laboratoire. Le maître d'ouvrage est destinataire des résultats obtenus. Ceux-ci sont livrés tels quels et ne font l'objet d'aucune interprétation de la part du géotechnicien.

L'ensemble des missions (G0+G11) permet au géotechnicien d'examiner l'adaptation de l'ouvrage au site, éventuellement de définir pour l'ouvrage une implantation préférentielle, de discuter de l'opportunité de création de sous-sol, de fournir à son client le ou les principes de fondation, qui pourront être mis en œuvre sur le site étudié, ainsi que les premières préconisations d'exécution relatives à la configuration du site et les dispositifs permettant de se prémunir des risques naturels.

Dans le cadre d'une telle mission, le géotechnicien n'est pas en mesure de fournir au maître d'ouvrage la valeur de portance du sol nécessaire au dimensionnement des fondations. Il convient, dans le rapport d'étude préliminaire de faisabilité, d'identifier les incertitudes et aléas qui subsistent après cette mission G11 et les risques encourus, de proposer les investigations complémentaires jugées nécessaires afin de réduire ces incertitudes et de préciser les missions qui permettront la poursuite du projet et sa réalisation.

C'est dans une seconde phase de reconnaissance, étude de faisabilité des ouvrages géotechniques, répondant aux missions (G0+G12 phase 2), orientée vers le système de fondation qui s'impose, que les calculs de contrainte ultime, contrainte de calcul, contrainte à l'état limite de service et estimation des tassements seront réalisés à partir d'essais complémentaires. Le bureau d'études structures pourra alors dimensionner les fondations de l'ouvrage en conséquence.

En pratique, malheureusement, la phase préliminaire de reconnaissance (G0+G11), permettant par exemple, par un certain nombre de sondages à la pelle ou mise en œuvre de méthodes géophysiques, d'apprécier l'hétérogénéité latérale du site, est encore trop souvent négligée. Le maître d'ouvrage, dans le cadre d'un projet de dimension modeste, lorsqu'il fait appel au géotechnicien, alors que bien souvent il ne connaît pas encore les descentes de charge, souhaite connaître, sans passer par une reconnaissance préliminaire, la portance du sol à prendre en compte pour le dimensionnement des fondations de son projet.

Pour mémoire, nous rappellerons que les missions géotechniques sont au nombre de six et permettent au géotechnicien d'accompagner le maître d'ouvrage tout au long de la conception de son projet de construction ou dans le diagnostic d'ouvrages existants. Nous citerons en complément les missions de type G5, qui concernent le diagnostic géotechnique regroupant les missions (G0+G51) applicables avant, pendant et après la construction d'un ouvrage sans sinistre et les missions (G0+G52), qui ont pour but de rechercher les causes géotechniques des désordres observés sur un ouvrage et orienter les remèdes envisageables. (annexes 5 et 6).

Pour ce travail d'étude, nous nous placerons essentiellement dans le cadre des missions (G0+G11) et (G0+G12), étude préliminaire de faisabilité géotechnique et étude de faisabilité des ouvrages géotechniques.

3.2. Définition d'une campagne de reconnaissance

Aujourd'hui, la planification d'une campagne de reconnaissance géotechnique repose essentiellement sur l'expérience du géotechnicien. Celui-ci prend généralement et essentiellement en compte les paramètres suivants :

- **Le type de mission géotechnique auquel il doit répondre.**

En ce sens, une reconnaissance géotechnique menée dans le cadre des missions (G0+G11), qui devra définir le système de fondation adapté, sera orientée différemment d'une campagne préconisée pour des missions (G0+G12), permettant le dimensionnement des fondations. De plus, l'estimation des tassements nécessitera la réalisation d'essais spécifiques recommandés par les documents de référence tels que les essais œdométriques ou essais pressiométriques.

- **Les caractéristiques lithologiques et mécaniques présumées du site.**

La recherche spécifique de zones d'anomalies (épaisseurs variables de remblais, de lentilles de tourbe, recherche de cavités...) nécessitent l'exécution de forages plus nombreux et relativement rapprochés. De plus, la nature présumée des matériaux est déterminante dans le choix des essais à réaliser. En effet, tous les essais ne sont pas adaptés à tous les matériaux. Par exemple, les essais de pénétration dynamique sont déconseillés pour la reconnaissance de matériaux sableux et plus particulièrement sous le niveau piézométrique. Ils ne permettent pas non plus d'appréhender les caractéristiques mécaniques de matériaux rocheux ou très compacts. De même, les prélèvements d'échantillons intacts par carottage se révèlent particulièrement délicats au sein de matériaux peu cohésifs (sables et graviers par exemple).

- **L'importance du projet, le système présumé des fondations et les règlements qui s'y rapportent.**

Le nombre de points d'investigation dépendra essentiellement de la superficie du projet, la profondeur des sondages sera, elle, fonction des charges appliquées et du type de fondations pressenti par le géotechnicien. Par exemple, afin d'être conforme au document technique unifié DTU 13.2 de septembre 1992 relatif aux fondations profondes, [DTU 13.2], il conviendra de reconnaître le sous-sol sous la base estimée du pieu sur une profondeur correspondant à 7 fois le diamètre du pieu avec un minimum de 5 mètres. Ainsi, selon les charges appliquées par l'ouvrage, l'exécution de pieux Ø500mm de 20 m de longueur nécessitera la réalisation d'un forage de reconnaissance jusqu'à 25 m de profondeur au minimum. La difficulté est qu'à ce stade, la longueur des pieux ne peut être estimée que par l'expérience du géotechnicien sur des sites comparables.

- **L'accessibilité des machines au site.**

Ce facteur pratique conditionne également la nature et l'implantation des essais. En effet, les essais de pénétration statique nécessitent l'utilisation d'un camion de 10 tonnes, ce qui n'est pas toujours possible en sites urbains exigus ou sites marécageux ne permettant pas la traficabilité d'un tel engin.

- **La concurrence.**

Même si les critères géotechniques restent prépondérants, la contrainte économique fait partie des facteurs influents la campagne de reconnaissance. Pour les projets où les bureaux d'études sont mis en concurrence, la loi du marché impose un coût de campagne raisonnable, en accord avec la taille du projet. Ainsi, un nombre important de sondages ou une multiplication des essais est réservée à des études très spécifiques.

Afin de fixer des ordres de grandeur, dans la région bordelaise, dans le cadre d'un projet de maison individuelle d'environ 150 m² d'emprise au sol sur un terrain ne présentant pas, en apparence, de risques majeurs (glissements de terrain), le coût de l'étude géotechnique sera de l'ordre de 1550 Euros (environ 10 000 F). Pour un projet de hangar agricole ou bâtiment industriel d'emprise au sol d'environ 1000 m², le coût de l'étude pourra être de l'ordre de 4000 Euros (26 000 F).

Compte tenu de ces facteurs influençant le type et le nombre des essais préconisés, nous voyons là le rôle essentiel de l'expérience du géotechnicien, qui doit anticiper la nature du sous-sol et, si nécessaire, adapter la reconnaissance en cours de campagne. De plus, il doit connaître le marché dans lequel il évolue. Il ressort donc que la planification des campagnes de reconnaissance géotechniques est traditionnellement suggérée par l'expérience des praticiens, les normes. Elle demeure une pratique largement qualitative et empirique.

3.3. Détermination d'une valeur de calcul représentative

La réalisation d'une étude de sol s'appuie sur l'étude de cartes et documents bibliographiques concernant le site ou des voisins proches, la réalisation d'un nombre limité de sondages in situ et d'essais de laboratoire.

Au sein d'une même formation, les mesures des caractéristiques mécaniques couvrent une plage de valeurs plus ou moins étendue en fonction de la variabilité du matériau, du nombre de mesures et de la qualité des essais géotechniques réalisés. De la synthèse de ces différentes sources d'information et de son "savoir-faire", le géotechnicien extrait une valeur de calcul, qui doit être :

- **Représentative** des matériaux affectés par la future structure. Elle tient compte :
 - **de la variabilité naturelle des matériaux** au sein d'une même formation (sable plus ou moins argileux selon les sondages),

- **de la qualité des essais réalisés** (modification des propriétés mécaniques des matériaux ne correspondant pas à la réalité, les écarts entre les mesures pouvant être amplifiés par du bruit lié au simple processus de mesure),
- **de la sensibilité des appareils de mesures** (effet intégrateur des dispositifs de mesure) [Denis & al. 97]. Plus le pas de mesure est important, plus le volume de sol auquel est attribuée la valeur est grand, plus les caractéristiques mesurées sont "lissées", les fortes valeurs compensées par les faibles valeurs. Les variations inférieures au pas de mesure ne sont donc pas perçues.

Ce concept de réduction de la variance en fonction du volume de sol pris en compte se traduit par le fait que, pour des grandeurs aléatoires indépendantes, la variance de la moyenne de n valeurs est n fois plus petite que la variance de chaque valeur (*équation 1*) [Favre 00].

$$\text{var}[\bar{Z}] = \frac{1}{n} \text{var}[Z]$$

avec

équation 1

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$$

Pour le cas de variables régionalisées, qui servent à définir des fonctions de l'espace dont la valeur varie d'un point à l'autre avec une certaine continuité, sans qu'il soit possible d'en représenter la variation par une loi mathématique extrapolable. La définition du semi-variogramme permet alors de préciser la distance à partir de laquelle deux mesures deviennent indépendantes [Matheron 70], [Guillaume 77]. Cet aspect géostatistique du traitement des données sera abordé ultérieurement dans ce chapitre.

- **Raisonnement sécuritaire.** Afin de tenir compte de l'hétérogénéité du site, qu'il ne connaît que partiellement, l'ingénieur prendra une valeur "raisonnablement" prudente [Delage & al. 99]. Toute quantification de ce degré "raisonnable" est extrêmement ardue, l'élimination de valeurs aberrantes ne suit aucune procédure normalisée et ne s'enseigne dans aucune école ou université.
- **Non pénalisante pour le projet.** Le choix d'une valeur trop faible engendrerait des coûts superflus et pourrait aboutir à la non réalisation du projet.

L'expérience du géotechnicien est, encore une fois, déterminante dans le subtil dosage "représentativité de la valeur", "raisonnablement sécuritaire" et "non pénalisante".

Kovarik et Cassan [Kovarik & al. 00], [Cassan 00] proposent d'utiliser les outils statistiques pour que le géotechnicien détermine, à partir d'un ensemble de mesures, les valeurs caractéristiques correspondant aux matériaux investis.

Ces approches considèrent les valeurs mesurées comme un échantillon d'une population inconnue. Les outils statistiques permettent alors de replacer la mesure, réalisée en un point donné, par rapport à l'ensemble de la population (le site). Toutefois, l'utilisation de ces pratiques et l'obtention de résultats fiables, à partir desquels le géotechnicien engagera sa responsabilité reste limitée à des chantiers pour lesquels le nombre de mesures est suffisant. La représentativité des moyennes et écart-type des mesures n'est jugée significative que pour des échantillons composés d'au moins une vingtaine d'individus. De plus, elle suppose le caractère homogène de la population et ne traite pas d'éventuels "accidents" locaux.

3.4. Exemple d'un cas réel - Etude d'un système de fondation

Pour illustrer notre propos, voyons l'exemple d'une reconnaissance géotechnique menée dans le cadre d'un projet de type "bâtiments agricoles". Le site appartient à la commune de Potensac, près de Lesparre Médoc en Gironde. [Rap. D01/B039]. Ce cas réel permet de montrer, que l'utilisation des statistiques ou géostatistiques n'est pas toujours applicable à un projet de niveau usuel et que la valeur prise en compte dans les calculs peut dépendre des choix et décisions pris par le géotechnicien. Les éléments concernant le projet de construction et les résultats des essais de la campagne sont reportés en annexe 7.

Pour cette étude, le choix d'un système de fondation tient compte :

- de la présence de matériaux de remblais ou contenant de la matière végétale sur des épaisseurs variables et jusqu'à 1.10 m de profondeur (26.5 NGF) par rapport au terrain naturel en SP1.
- sous jacent, un substratum hétérogène caractérisé par une alternance de calcaire altéré, argile calcaire et marne.
- des bonnes caractéristiques des matériaux investis, avec cependant des valeurs moindres et surtout variables en surface au sein des matériaux argileux ou calcaires argileux altérés.
- du niveau piézométrique, relevé entre 1.40 et 3.00 m de profondeur par rapport au terrain naturel, soit entre 23.8 NGF en SP2 et 24.5 NGF en SP1
- des caractéristiques du projet et de la destination des différents bâtiments.
 - Cotes prévues des dallages à 24.45 NGF et 28.10 NGF
 - Etablissement d'un sous-sol partiel
 - Structure métallique et murs de remplissage maçonnés
 - Locaux à usage de garage pour des engins agricoles et implantation d'une citerne à gasoil.
- de la configuration du site : dénivelé à prendre en compte dans la réalisation des terrassements.
- de l'existence de bâtiments mitoyens.

Au regard de ces différents éléments, nous avons retenu :

- une solution de fondations superficielles de type semelles filantes pour l'ensemble des bâtiments. En effet, la réalisation de semelles isolées n'est ici pas souhaitable en raison de l'hétérogénéité latérale du site. Un système de fondation par puits ne permet pas d'assurer comme les semelles filantes une certaine raideur pour la structure,
- la mise en œuvre d'un radier sous l'emprise de la cuve à gasoil, les murs périphériques étant quant à eux fondés par semelles filantes.

3.4.1. Choix du niveau d'assise

Pour le bâtiment implanté au sud du terrain le niveau d'assise sera porté :

- à 0.50 m de profondeur par rapport à la côte des terrassements
 - pour les parties dont la côte du dallage est prévue à 24.45 NGF, ainsi que
 - pour les semelles mitoyennes de la partie terrassée pour l'établissement du sous-sol. Notons que pour les semelles situées à proximité des bâtiments existants, le niveau d'assise pourra être remonté, il devra cependant se situer au-delà des remblais (1.10 environ en SP1).

Pour les bâtiments établis au nord du site, le niveau d'assise sera porté à 1.00 m de profondeur par rapport à la côte des terrassements.

3.4.2. Calcul des contraintes ultime, de calcul et à l'état limite de service

La contrainte ultime q_u est calculée selon les recommandations du DTU 13.2 de mars 1988 relatif aux fondations superficielles.

A partir des essais pressiométriques, q_u suit l'équation 2 pour une semelle de largeur B, de longueur L et d'encastrement D.

$$q_u = k_p \cdot p_{l_e}^* \cdot i_{\delta\beta} + \gamma D \quad \text{équation 2}$$

où :

k_p = facteur de portance, dépendant des dimensions de la fondation, de son encastrement relatif et de la nature du sol (annexe 8).

$p_{l_e}^*$ = pression limite nette équivalente calculée comme la valeur moyenne des pressions limites nettes p_l^* existant sur une profondeur égale à 1.5 B située sous la base des fondations. Les pressions limites nettes étant plafonnées toutefois à 1.5 fois leur valeur minimale sur la profondeur envisagée.

$i_{\delta\beta}$ = facteur permettant de prendre en compte l'inclinaison de la charge et du talus. Pour une charge verticale centrée, $i_{\delta\beta} = 1$.

γ = poids volumique du sol, déjàugé partiellement le cas échéant

A partir des essais de pénétration dynamique, q_u suit l'équation 3 pour une semelle soumise à une charge verticale centrée.

$$q_u = \frac{q_d}{5 \text{ à } 7} \quad \text{équation 3}$$

q_d = « résistance dynamique ».

La contrainte de calcul (q_{ELU}) à comparer à l'action estimée aux états limites ultimes (ELU), est obtenue en divisant par 2 la contrainte ultime calculée précédemment. (équation 4)

$$q_{ELU} = \frac{q_u}{2} \quad \text{équation 4}$$

La contrainte aux états limites de service (q_{ELS}) est obtenue suivant l'équation 5 :

$$q_{ELS} = \gamma \cdot D + \frac{q_u - \gamma \cdot D}{3} \quad \text{équation 5}$$

A partir des essais pressiométriques :

Si l'on reporte sur les log pressiométriques les niveaux d'assise préconisés, les pressions limites mises en jeu, soit jusqu'à 1.5 B de profondeur sous la fondation (B, largeur de la semelle, est estimée à 0.60 m), prennent les valeurs 0.8 MPa, 1.1 MPa et 3.3 MPa selon les points de sondage.

Le géotechnicien responsable de l'étude choisira ici $p_{le}^* = 0.8 \text{ MPa}$

Si l'on pose $k_p = 0.8$, alors $q_u = 0.6 \text{ MPa}$, $q_{ELU} = 0.3 \text{ MPa}$ et **$q_{ELS} = 0.2 \text{ MPa}$** .

A partir des profils pénétrométriques :

Cependant, au droit de l'essai PD2, au niveau d'assise, les valeurs de résistance dynamiques (q_d) sont de l'ordre de 2.0 MPa. Les contraintes q_{ELU} et q_{ELS} sont donc limitées, q_{ELU} à 0.15 MPa et **q_{ELS} à 0.1 MPa**. Ce qui correspond à la moitié de la valeur calculée à partir des essais pressiométriques.

La prudence du géotechnicien le conduit à limiter volontairement les contraintes pour bien sûr tenir compte des essais de pénétration, mais aussi pour tenter de limiter l'amplitude des

tassements différentiels et pallier l'importante hétérogénéité des matériaux d'assise, qui n'est que partiellement appréhendée.

Notons que pour le bâtiment établi au nord du site, la contrainte q_{ELS} préconisée aurait cependant pu être un peu plus importante, de l'ordre de 0.15 MPa (au lieu de 0.1 MPa), mais en pratique, il est préférable de ne pas compliquer le problème et la valeur préconisée ici sera identique pour l'ensemble des bâtiments, si bien sûr, ceci n'est pas pénalisant pour le projet. Il est bien évident, qu'au-delà du rapport, des aménagements peuvent être envisagés en concertation avec le bureau d'études béton.

Nous rappelons que l'estimation des tassements est dans ce cas réalisée à partir des essais pressiométriques et des règles de calcul fournies dans le DTU 13.12. Le mode de calcul relatif à une fondation superficielle est reportée en annexe 9.

Dans le cas de semelles filantes, le tassement absolu estimé au droit de chaque point de sondage est inférieur au centimètre (annexe 10). En fait, au droit des trois sondages pressiométriques, pour une contrainte $q_{ELS} = 0.1$ MPa et un coefficient α de 0.66, le tassement final aux trois points est estimé à 0.1 cm. Il passe à 0.4 cm en SP1, et 0.2 cm en SP2 et SP3 pour une contrainte de 0.2 MPa. Ainsi même sous une contrainte de 0.2 MPa, les tassements estimés paraissent acceptables.

Pour la solution radier, compte tenu des charges effectivement apportées, la contrainte ne devrait pas dépasser 0.01 MPa (annexe 11). Sous cette très faible contrainte et compte tenu des modules pressiométriques obtenus en SP3, l'estimation des tassements suivant l'équation 6 ne serait pas significative.

$$s = \frac{\alpha(z).I_{\sigma}\sigma(z)}{E(z)}.d(z) \quad \text{équation 6}$$

Dans le cadre de l'utilisation de l'équation permettant d'estimer les tassements sous radier, la contrainte σ varie suivant la profondeur, elle est pondérée par les facteurs m et n lus sur l'abaque reporté en annexe 12. Le tassement est alors estimé sous un angle du quart du radier. Pour obtenir l'estimation du tassement au centre du radier il convient de multiplier par quatre la valeur de s obtenue via l'équation 6 [Frank 99].

Pour cette étude, nous ne présenterons pas ici les conditions d'établissement des dallages ni les sujétions concernant notamment la récupération des eaux de ruissellement, la reconnaissance des fondations des mitoyens et l'adaptation du niveau d'assise en conséquence, la réalisation de joints de dilatation et les préconisations d'exécution des fondations compte tenu de la présence de la nappe phréatique....Ces éléments restent toutefois indispensables à la complétude des missions géotechniques (G0+G12), mais n'apportent pas d'éléments nouveaux dans notre propos, qui visait à illustrer la démarche et les choix faits par le géotechnicien dans la détermination du niveau d'assise, de la portance du sol et des tassements.

Pour cet exemple concret typique d'un projet de petite taille, l'application des méthodes statistiques dans l'évaluation de la contrainte à prendre en compte dans le dimensionnement

des fondations n'est pas envisageable. En effet, pour le bâtiment projeté le plus au sud du terrain seul deux sondages pressiométriques sont concernés et quatre valeurs pressiométriques ont été mesurées sur la tranche de sol correspondant à 1.5 B sous le niveau d'assise envisagé. Les valeurs de p_i^* retenues sont égales, en SP1, à 1.8 MPa et 1.2 MPa, en SP2, 0.8 et 4.1 MPa. De plus, sur ces quatre mesures seules trois d'entre elles peuvent être considérées comme appartenant à la même formation.

Kovarik propose pour le calcul de la valeur caractéristique q_k (au risque de 5%, soit $p = 5\%$), avec $p = \text{prob}(X < \mu - u_p \cdot \sigma)$

et $q_k = m - u_p \cdot \text{sd}$

$u_p = 2.63$ ($\alpha = 50\%$, $N = 4$ valeurs) avec $\alpha =$ probabilité que la valeur caractéristique ainsi estimée soit inférieure au fractile de loi théorique, (ici la loi théorique est supposée être une loi normale)

Dans ce cas, l'estimation d'une moyenne (m) et d'un écart-type (sd), tant pour les valeurs de p_i^* que de contrainte n'est pas réalisable.

3.5. Variabilité et incertitudes

3.5.1. De la réalité à la mesure

A partir d'un nombre très limité de points de reconnaissance, le géotechnicien a dû appréhender l'hétérogénéité du site et estimer, de façon intuitive, les risques liés à la variabilité lithologique et mécanique des matériaux intéressés par la fondation. Au vu des résultats obtenus et de son expérience, il a volontairement limité la contrainte à prendre en compte dans le dimensionnement des fondations afin d'aller dans le sens de la sécurité, qu'il ne sait pas évaluer. L'utilisation des méthodes statistiques permettant de définir une valeur caractéristique de la contrainte q_k (chapitre I - § 3.4.2) n'a pas pu être appliquée compte tenu du petit nombre de valeurs disponibles dans les calculs.

En pratique, nous savons que la nature du sous-sol et les caractéristiques mécaniques d'un site ne peuvent être mesurées en tous points. De plus, la mesure n'est qu'une estimation de la réalité inconnue et inaccessible. L'écart entre la réalité et la mesure correspond à l'erreur de mesure, qui peut être systématique (biais) ou aléatoire (incertitude). Ces écarts dépendent d'une infinité de petites causes, Favre répertorie [Favre 00] :

- **Les erreurs de mesure** liées à l'appareil et à l'opérateur. Nous étendons cette notion aux observations faites par le sondeur ou le géotechnicien lors de l'établissement des coupes lithologiques. Les erreurs peuvent concerner des données qualitatives et quantitatives. Lors de la réalisation des sondages à la tarière par exemple ou forages destructifs, les profondeurs sont données avec une certaine incertitude compte tenu du matériel de prélèvement et selon les compétences du sondeur. De plus, la description des matériaux peut varier d'un opérateur à l'autre, elle est fonction de l'appréciation de chacun et de la qualité des échantillons rapportés.

- **Les erreurs de représentativité**, qui traduisent la transformation de la valeur physique. L'interprétation de la mesure repose en général sur un modèle physico-mécanique (état de contraintes, comportement drainé ou non drainé, isotropie ...) qui peut être approché et peu représentatif des phénomènes mis en jeu lorsque l'ouvrage sollicitera le massif. C'est typiquement le cas si l'on utilise les valeurs de résistance dynamique pour apprécier la portance du sol pour une semelle, les mécanismes impliqués et les volumes de sol concernés diffèrent sensiblement pour l'essai et pour l'ouvrage. Cet outil n'est d'ailleurs pas réglementaire, il ne doit être utilisé que pour donner un ordre de grandeur de la contrainte ultime.
- **Les erreurs de l'instant**, qui proviennent des modifications des propriétés physiques du sol au cours du temps.
- **Les erreurs d'enquête** proprement dites, les mesures réalisées ne sont pas représentatives du problème. Les essais ne sont pas adaptés au sol, à la mesure recherchée.
- **Les erreurs d'échantillonnage**. Il ne s'agit pas réellement d'erreurs au sens commun du terme. En effet, même si les mesures étaient parfaites, la variabilité naturelle des propriétés du sol est modélisée comme une variable aléatoire dont les caractéristiques sont estimées à partir d'un échantillon de taille limitée par des intervalles de confiance. Ainsi, la moyenne de la propriété considérée a une probabilité de 95% d'être comprise entre telle et telle valeur. Il y a donc un risque d'erreur dans l'estimation.

Bæcher adopte une présentation légèrement différente des causes d'incertitude liées à la connaissance des propriétés du sol [Bæcher 98]. Il relève **les sources d'incertitude relatives aux données** : variation spatiale des propriétés du sol, bruits de mesure, et **les incertitudes apportées par la modélisation** : biais contenus dans les modèles de calcul et erreurs statistiques (erreurs d'échantillonnage précitées).

La variabilité spatiale réelle du sol n'est pas aléatoire, dans le sens où elle peut être caractérisée par une variable régionalisée. Elle montre deux aspects complémentaires, l'un aléatoire (localement), l'autre structuré (globalement). La variabilité spatiale réelle du sol représente les variations vraies des propriétés des matériaux d'un point à un autre de l'espace, si l'on excepte les facteurs d'imprécision (biais systématiques et bruits de mesure indépendants d'une mesure à l'autre).

3.5.2. Exemple de la variabilité des mesures

La comparaison de 4 profils pressiométriques obtenus sur une zone restreinte (zone SP7) du site expérimental de IUT de Génie Civil de Bordeaux I (Talence) permet d'apprécier l'impact des erreurs liées à la mesure et la variabilité naturelle du sol (Figure 2). Les données acquises sur ce site feront l'objet d'un exposé détaillé en partie III. Nous nous bornerons ici à évaluer la variabilité des propriétés mesurées sur des forages exécutés dans une zone d'étendue limitée. Les indicateurs statistiques, essentiellement moyenne, écart-type et coefficient de variation, sont comparés à ceux obtenus à l'échelle du site pour deux groupes d'individus distincts (les individus pour lesquels pression de fluage $pf^* < 1$ MPa et ceux pour lesquels $pf^* > 1$ MPa) (Tableau 2). Ces deux groupes établis sur la valeur de pf^* résultent d'une analyse de l'ensemble des résultats pressiométriques mesurés sur le site.

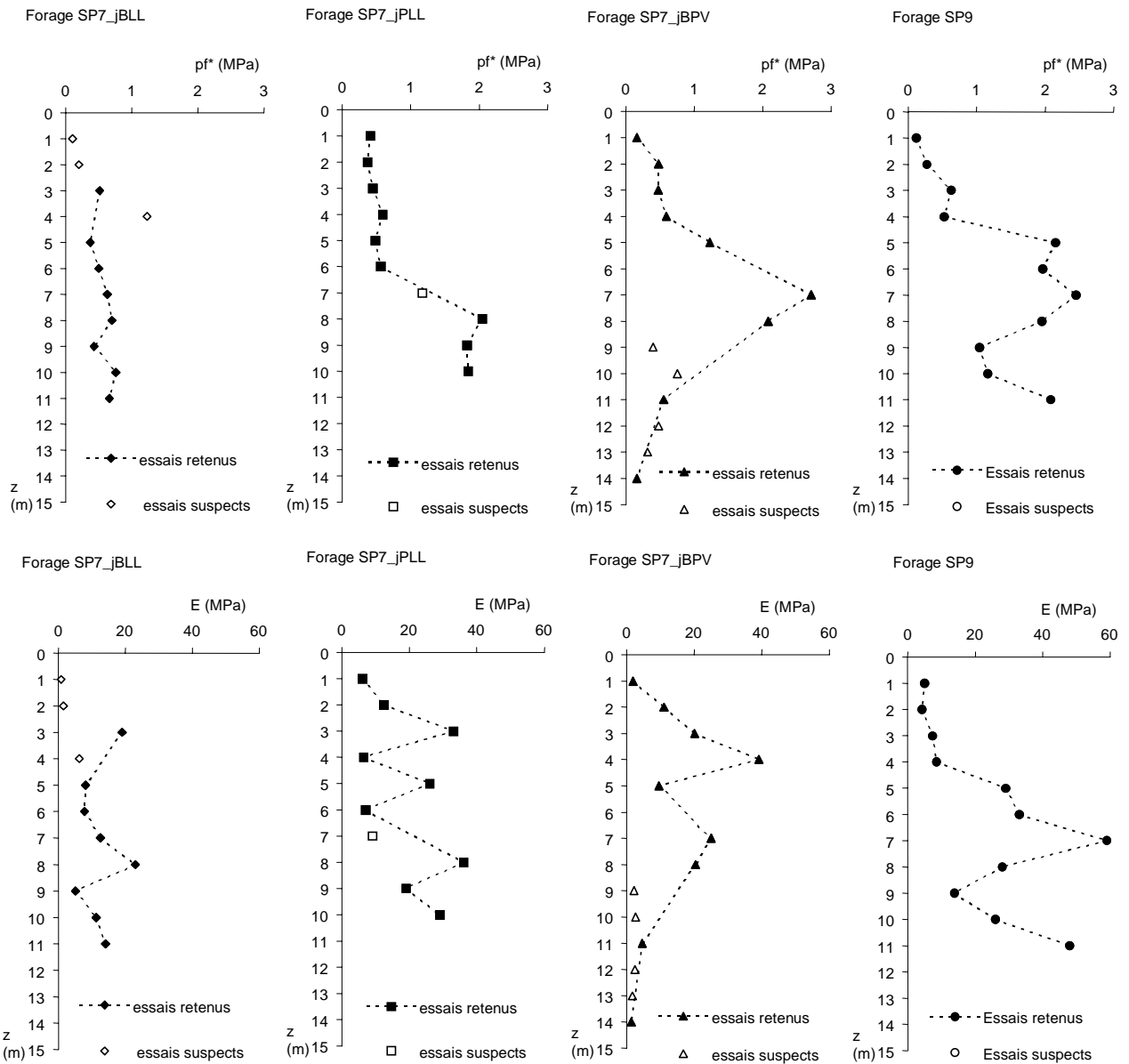
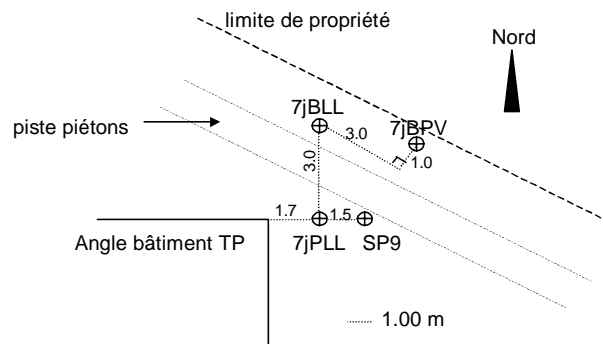


Figure 2 : Profils pressiométriques obtenus sur une zone restreinte (Zone SP7) - Site de l'IUT de Génie Civil Bordeaux I

Echelle du site (sans zone SP7)	p _f [*]		E _m	
	p _f [*] <1MPa	p _f [*] >1 MPa	p _f [*] <1MPa	p _f [*] >1 MPa
min (MPa)	0.1	1.1	1.2	9.0
max (MPa)	1.0	3.3	23.6	87.0
moyenne (MPa)	0.6	1.9	8.7	33.0
ecart-type (MPa)	0.2	0.6	5.0	20.5
coef. de variation	0.4	0.3	0.6	0.6
N	40	27	40	27

Zone SP7	p _f [*]		E _m	
	p _f [*] <1MPa	p _f [*] >1MPa	p _f [*] <1MPa	p _f [*] >1MPa
min (MPa)	0.1	1.0	1.4	9.6
max (MPa)	0.8	2.7	39.1	59.0
moyenne (MPa)	0.5	1.9	12.3	28.9
ecart-type (MPa)	0.2	0.5	9.6	12.8
coef. de variation	0.3	0.2	0.8	0.4
N	24	13	24	13

Implantation schématique des sondages de la zone SP7



Echelle du site (sans zone SP7)

Nb essais réalisés	Nb essais retenus	% essais retenus
91	67	74

Zone SP7

Nb essais réalisés	Nb essais retenus	% essais retenus
45	37	82

Tableau 2 : Valeurs statistiques repères obtenues sur les pressions de fluage et modules pressiométriques des forages d'une zone restreinte du site de l'IUT.

La synthèse des indicateurs statistiques et l'examen des profils pressiométriques amènent les remarques suivantes :

- Au vu des valeurs des moyennes et écart-types obtenues pour les paramètres p_f^{*} (pression de fluage nette) et E (module pressiométrique) pour les deux groupes d'individus considérés (p_f^{*}<1 MPa et p_f^{*}>1 MPa), les caractéristiques relevées au niveau de la zone SP7 ne diffèrent pas de manière significative de celles obtenues pour le reste du site.
- Les coefficients de variation calculés à l'échelle du site sont compris entre 0.3 et 0.4 pour p_f^{*} et sont beaucoup plus importants, de l'ordre de 0.6, pour E. A l'échelle de la zone SP7, les variations sont moins importantes pour les valeurs de p_f^{*} (coefficients de variation compris entre 0.2 et 0.3), en revanche, pour les modules pressiométriques le coefficient de variation au sein des matériaux pour lesquels p_f^{*}<1MPa est de 0.8 et 0.4 pour les individus où p_f^{*}>1MPa.
- Ainsi le module pressiométrique, très sensible à la qualité d'exécution du forage, est un paramètre très variable compte tenu des erreurs liées à sa mesure comme le confirme le caractère très erratique des profils mesurés. La variabilité de la mesure de la pression limite est moins importante au niveau d'une zone restreinte (Zone SP7) qu'à l'échelle du forage. Toutefois, la comparaison des log pressiométriques obtenus au niveau de la zone SP7 fait ressortir la problématique de la répétabilité de la mesure.

Jusqu'à 9 m de profondeur environ, les log de p_f^{*} des forages SP7jBPV et SP9 sont très cohérents et permettraient, à partir des valeurs pressiométriques, de proposer un découpage du forage similaire. Au-delà de 9.00 m de profondeur, les différences de

profils entre les deux forages sont importantes mais compréhensibles compte tenu de l'altération particulière du substratum carbonaté localisée par un sondage carotté C2 (passées sableuses, poches de décalcification ponctuelles et discontinues). En revanche, le forage SP7JPLL rend compte d'une modification des propriétés pressiométriques à environ 6.5 m de profondeur au lieu de 4.5 m en SP9 et SP7jBPV. Quant au forage SP7jBLL, il ne permet pas au regard des résultats pressiométriques de repérer une limite entre les formations de couverture et le toit du substratum calcaire.

Au niveau de la zone SP7, la variabilité des mesures pressiométriques, plus importante pour les modules que pour les pressions de fluage reflète :

- l'existence d'une réelle hétérogénéité des propriétés du sol même sur une zone restreinte
- les "bruits de mesure", c'est à dire l'incertitude attachée à la détermination expérimentale des grandeurs pressiométriques et notamment du module, ou très vraisemblablement une combinaison des deux.

3.5.3. Les solutions apportées par certains auteurs

Comme nous l'avons vu dans la présentation de l'étude géotechnique d'un cas d'étude réel, le géotechnicien doit donc synthétiser l'ensemble des résultats issus de la campagne de reconnaissance. Il est confronté aux mesures affectées par une part plus ou moins importante des erreurs précitées, aux informations provenant d'essais de natures différentes, mettant en jeu des volumes de mesure variables. Ces informations sont qualitatives, (lithologie), ou quantitatives (mesures des propriétés physiques des matériaux).

A partir de cet ensemble de données disparates dont il aura extrait les mesures douteuses, le praticien devra prendre des décisions, qui influenceront le rapport risque / coût lié à l'étude. Toute prise de décision, toute valeur de calcul est associée à un risque, que le géotechnicien n'est pas véritablement en mesure de quantifier autrement que par son propre jugement ou en concertation avec ses collègues, autrement dit par l'expérience.

Certains travaux mettent en avant des méthodes permettant de prendre en compte le risque lié au coût des ouvrages et à la densité de reconnaissance. Subrahmanyam et Ng proposent une approche quantitative et objective permettant de planifier les investigations géotechniques. Pour une formation donnée et à partir du degré de variabilité des caractéristiques mécaniques du sol, la méthodologie permet d'établir, l'espacement entre les forages, la distance verticale d'échantillonnage et enfin le nombre minimal de tests et de forages requis pour un niveau économique, sécuritaire et fiable donné. Cependant l'approche reste confrontée au problème de l'estimation du niveau de variabilité des caractéristiques du sous-sol et à la définition de la lithologie [Subrahmanyam & *al.* 00].

Lassing et Colle étudient une nouvelle approche du dimensionnement des digues prenant en compte la probabilité de débordement de l'ouvrage. Ils souhaitent optimiser la conception de la digue en fonction du degré d'avancement du projet et de la connaissance plus ou moins fine de l'hétérogénéité du sol afin d'aboutir à un coût optimal pour le projet à un niveau de

risque donné. Le comportement de l'ouvrage au cours du temps, et donc les risques de débordement sont en partie liés à l'hétérogénéité du niveau d'assise.

Ainsi, une meilleure appréciation de la variabilité des sols d'assise permet de mettre les moyens constructifs conséquents afin de limiter les tassements différentiels, à l'origine d'une part importante des dommages observés. Les auteurs avancent le fait que certains éléments structuraux de la digue peuvent être minimisés en réduisant les incertitudes liées au sol (hétérogénéité lithologique et variation des caractéristiques mécaniques). La réduction de ces incertitudes peut résulter de l'augmentation du nombre de forages, d'essais et de la réévaluation des paramètres par rétro-analyse des comportements observés. L'optimisation du nombre de points de reconnaissance est obtenue par l'utilisation des probabilités conditionnelles.

Afin de satisfaire les critères de sécurité en vigueur, la probabilité de débordement de la digue sachant que l'on a la formation O1 ou O2 doit être inférieure à 10^{-5} . La plus-value correspondant aux investigations complémentaires peut dans un certain domaine être largement compensée par les économies réalisées lors de la construction de l'ouvrage, qui ne sera pas inutilement surdimensionné sur les portions où la lithologie, connue avec précision, ne nécessite pas la mise en œuvre de dispositions particulières. La réduction des coûts est également obtenue en proposant des investigations ciblées au niveau des portions de la digue, qui seront renforcées en raison du contexte lithologique. Enfin, au cours de la construction, l'observation du comportement de la digue permet de réajuster, si nécessaire, les paramètres statistiques estimés (tassements observés supérieurs à ceux estimés). [Lassing & al. 00]).

Si la démarche est intéressante pour les ouvrages de génie civil, celle -ci ne nous paraît pas applicable aux projets de construction de bâtiments de petite dimension, aux études géotechniques, que nous qualifierons "d'usuelles".

4. Mesure et estimation de l'hétérogénéité du sous-sol : l'expérience acquise

4.1. Multiplicité de l'information

A travers les exemples présentés chapitre1 § 1et § 3.4 , l'hétérogénéité du sous-sol peut être appréhendée : au sein d'un forage, entre plusieurs sondages et à différentes échelles d'observation, au sens où l'observateur tient compte des variations de l'information acquise selon un pas de mesure plus ou moins fin. L'hétérogénéité verticale du sous-sol est perceptible à partir de différentes informations. Celles-ci peuvent être qualitatives ou quantitatives, issues de l'observation des mesures et essais menés in situ ou en laboratoire par différents intervenants (sondeur, géologue, géotechnicien, laborantin...).

La première information permettant d'apprécier l'hétérogénéité du sous-sol au sein d'un forage est qualitative. Il s'agit de la coupe lithologique établie par le sondeur, le géologue ou le géotechnicien. La précision de la coupe établie par le sondeur est fonction du mode de forage mis en œuvre: carottages, sondages à la tarière hélicoïdale, sondages destructifs. Le

géologue ou le géotechnicien pourra éventuellement corriger cette première lithologie en fonction des échantillons prélevés et de sa connaissance du site. Notons que pour les sondages menés à la tarière, les échantillons prélevés ne sont pas toujours facilement identifiables. C'est le cas des matériaux prélevés sous la nappe, très remaniés. Il en est de même pour les forages destructifs, selon la nature du fluide de forage et le mode de destruction (percussion, rotation ou roto-percussion), les cuttings sont rarement utilisables. Ainsi, les corrections apportées par le géologue ou le géotechnicien portent essentiellement sur la nature des matériaux qu'il peut préciser lorsque la qualité des échantillons le lui permet, mais rarement sur les limites de formation que seul le sondeur peut relever lors du forage.

Les informations quantitatives concernent tous les résultats d'essais in situ ou d'essais de laboratoire (essais pressiométriques, diagrammes des pénétrations dynamiques ou statiques, enregistrements de paramètres de forage, profils hydriques, profils des cohésions et angles de frottement suivant la profondeur...). Chaque profil permet un découpage plausible du milieu traversé. En ce sens, l'ingénieur, à partir d'informations de natures différentes, découpe le milieu sondé suivant des critères lithologiques et mécaniques. Il apparaît que le découpage finalement retenu est fonction des données traitées, du pas d'acquisition de l'information et de l'ingénieur, l'expérience et la connaissance du site, entrant pour une bonne part dans l'interprétation des données.

Un découpage réalisé à partir des profils de résistance de pointe ne correspond pas forcément à la coupe lithologique établie par le sondeur. De même, selon le pas de mesure des données, celles-ci révéleront un profil plus ou moins régulier permettant ou non de mettre en avant les « petites » variations du sol.

L'expérience du géotechnicien sera capitale dans la synthèse des informations, celle-ci lui permettant notamment de relever les valeurs suspectes et de privilégier le découpage le plus pertinent, en accord avec la géologie et sa connaissance du terrain. Elle conditionnera également la finesse de description retenue. Prise en considération de minces couches de propriétés différentes ou, au contraire, définition d'une couche composite, "homogène en moyenne".

Dans la recherche de la caractérisation de l'hétérogénéité du sous-sol, on peut distinguer deux enjeux majeurs :

- tout d'abord, à partir d'un critère lithologique, l'individualisation des différentes couches,
- puis la détermination des propriétés mécaniques de chaque entité lithologique.

Les deux points sont a priori couplés [Ferry 96] et selon les sources d'information, le découpage obtenu peut être variable. Une combinaison des méthodes de reconnaissance est donc toujours profitable [Zerdazi 96].

4.2. Passage de l'échantillon à la population

Les caractéristiques géométriques, physiques et mécaniques des terrains ne sont, au mieux, mesurées qu'en quelques points (sondages ponctuels) et avec incertitude ("bruit de mesure"). Les méthodes géophysiques, lorsqu'elles sont mises en œuvre, permettent, en principe, de fournir une image plus globale du site offrant la possibilité de recalculer les valeurs des mesures ponctuelles, de préciser les limites de formations et de bien distinguer les anomalies.

En pratique le recours aux méthodes géophysiques reste limité à des cas particuliers et le passage des résultats obtenus à partir d'un nombre limité de mesures à l'échelle du site demeure très délicat compte tenu du faible nombre de points d'investigation. L'évaluation des caractéristiques mécaniques et / ou lithologiques pour l'ensemble du site se révèle délicate et nécessite l'expérience du praticien.

A partir d'un ensemble de mesures réalisées in situ les praticiens traitent les données suivant :

- une approche statistique et probabiliste, avec l'établissement de relations entre paramètres. Pour les premières réflexions, il s'agissait essentiellement d'établir des corrélations entre paramètres afin de faciliter les études géotechniques pour le dimensionnement des ouvrages.

Cassan [Cassan 88] et Magnan [Magnan 93] synthétisent un grand nombre de corrélations établies entre essais in situ, essais in situ et essais de laboratoire et essais de laboratoire. Ces relations empiriques, qu'il n'est possible de caractériser que de façon statistique, s'expliquent par le fait que l'ensemble des propriétés d'un sol évolue de façon cohérente traduisant un comportement général pour chaque grande classe de sol.

Cependant il est bien établi que de nombreuses corrélations incluent non seulement la relation réelle entre le paramètre explicatif et le paramètre expliqué, mais sont également affectées par la variabilité spatiale des données et des incertitudes liées aux mesures. Ainsi, la corrélation établie à partir de points voisins sera plus importante que celle construite à partir de points très éloignés. De plus, la qualité de la relation statistique établie peut dépendre également du volume de sol concerné pour les différents essais. En outre, l'utilisation des corrélations doit respecter le domaine de validité dans lequel elles ont été établies. Habituellement, la validité des relations empiriques est limitée à la classe de sol étudiée, voire à un site spécifique (relations établies entre l'indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène, relations entre résistances de pointe obtenues au pénétromètre statique et résistance dynamique, entre résistance de pointe et pression limite).

L'étude statistique des données vise à exploiter les mesures par les lois de distribution théoriques, qui par l'intermédiaire de l'écart-type prennent en compte la dispersion des paramètres du sol [Abdul Baki 92]. A partir des lois théoriques, le praticien simule des valeurs pour la variable d'intérêt, définit des valeurs caractéristiques à un niveau de signification donné [Magnan 96].

En pratique, le nombre de mesures souvent trop faible limite l'application de la méthode et la répartition des individus selon différents groupes peut toujours être discutée. De

plus, ces méthodes ne tiennent pas compte de la localisation des points de mesure et ne considère pas les relations existant entre deux points de mesures relativement proches, soit le caractère structuré des variables caractérisant le sol.

- une approche géostatistique

C'est sur ce point que Matheron [Matheron 70], a développé le premier l'étude géostatistique des données permettant de résoudre le problème de l'estimation de variables spatialement corrélées et présentant un comportement, en apparence, erratique. Ces variables, caractérisant un phénomène se déployant dans l'espace (et/ou dans le temps) en y manifestant une certaine structure, sont appelées variables régionalisées.

L'outil mathématique permettant l'étude des variables régionalisées est le semi-variogramme, improprement appelé variogramme. Il permet d'apprécier la structure spatiale de la variable d'étude, de préciser la distance au-delà de laquelle les propriétés en deux points de mesure sont indépendantes (portée du variogramme) et d'en modéliser la variabilité dans l'espace à partir des données expérimentales, krigeage et simulation conditionnelle étant les méthodes d'estimation les plus courantes [Antoinet 95].

Pour l'analyse variographique, la variable régionalisée, définie en tout point de l'espace, est supposée être la réalisation particulière $z(x)$ d'une fonction aléatoire $Z(x)$. Elle doit également satisfaire l'hypothèse de stationnarité d'ordre 1 et 2. Ce qui signifie que les accroissements de la moyenne et la variance de $Z(x)$ sont indépendants de x , la covariance entre deux points x et $(x+h)$ ne dépend pas de leur localisation x , mais de l'intervalle de distance h .

Le semi-variogramme expérimental est obtenu suivant l'équation 7

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad \text{équation 7}$$

avec :

$\gamma(h)$ = semi-variogramme

$N(h)$ = nombre de couples de points distants de h

$Z(x_i)$ = variable étudiée

De nombreuses applications ont été présentées, en hydrogéologie, [Delhomme 78], dans l'établissement de carte de pollution et dans l'estimation des volumes de sol pollué à extraire [de Fouquet 93]. Dans le domaine de la géotechnique [Vanmarcke 83], [Azzouz & al. 88], [Jaksa 95], [Deplagne & al. 93], [Lepetit & al. 00], entre autres, appliquent les principes de la géostatistique aux données issues des essais de pénétration statique et dynamique. Le but est de déterminer les caractéristiques des matériaux entre deux points de pénétration et de

présenter, grâce aux estimations réalisées par krigeage une carte des résistances de pointe d'un site, d'une région donnée, d'apprécier les distances de corrélation entre points de mesure et de définir ainsi des zones homogènes. Cafaro [Cafaro & al. 00] utilise les outils géostatistiques pour décrire la variabilité d'un matériau argileux. Les dernières recherches de A. Bolle [Bolle 93] et [Bolle 00] portent sur les modèles de fonctions d'auto-corrélation ou de variogramme afin de rendre les modèles plus proches des fonctions expérimentales et d'affiner ainsi les estimations par krigeage ou simulation conditionnelle.

Rosenbaum [Rosembaum & al. 97] compare les résultats obtenus pour différents processus d'estimation. Les estimations des variables d'intérêt obtenues par krigeage et probabilités conditionnelles sont comparées à des simulations de données issues de tirages aléatoires simples.

La technique riche d'enseignement est applicable, sous réserve d'un maillage régulier des points de mesure (bien que l'application de la technique puisse dans certains cas être transposée à une implantation irrégulière des données) et d'un nombre suffisant de mesures (minimum de 20 points), ce qui reste, malheureusement, dans le cadre d'une reconnaissance géotechnique de niveau usuel très peu courant.

Semaan [Semaan & al. 99] met à profit les développements de la théorie des ensembles flous ("fuzzy logic") afin de prendre en compte l'incomplétude et l'incertitude des données recueillies lors d'une étude géotechnique. L'idée est que la complexité du monde naturel est telle qu'il est impossible de rendre compte de toutes ses composantes et qu'il est préférable de passer par des descriptions approximatives. La théorie initiée par Goguen et mise en œuvre dans les années 1950 par Zadeh permet un traitement souple des connaissances. Les limites entre les classes sont définies de façon imprécise. Une variable, la température, par exemple, est caractérisée par des variables linguistiques et un ensemble de modificateurs (très fort, fort, assez fort, faible). Un individu peut appartenir partiellement à plusieurs catégories, puisque les énoncés sont partiellement vrais, les connaissances étant imparfaites.

La logique floue est le cadre du raisonnement humain et l'utilisation de quantificateurs flous (fonctions d'appartenance) permet de décrire des situations intermédiaires, propose une quantification linguistique de la probabilité. Ainsi, même les règles de déduction peuvent n'être que partiellement vraies. Elle est bien adaptée aux domaines pour lesquels les décisions d'experts ne suivent pas des logiques algorithmiques.

L'interpolation des caractéristiques mécaniques d'un site suivant deux ou trois dimensions peut également être appréhendée par les réseaux de neurones. Aujourd'hui, les dernières tentatives permettant d'apprécier au mieux le milieu mettent en avant des techniques mixtes associant réseaux de neurones et logique floue [Kumar & al. 00].

Dans tous les cas, l'obtention de résultats fiables est conditionnée par la qualité et la quantité de l'information de départ, ainsi que par la localisation des points de mesure pour les méthodes géostatistiques. En pratique, dans le cadre d'une reconnaissance usuelle concernant un projet de petite taille, ces méthodes ne sont pas directement applicables. L'approche des données par logique floue paraît mieux adaptée, mais nécessite une analyse experte des données.

Chapitre II -

Moyens de reconnaissance retenus : les essais pressiométriques et les enregistrements de paramètres de forage

1. Les essais pressiométriques

Le tableau récapitulatif (Tableau 3) recense les essais in situ les plus couramment utilisés par les bureaux d'études géotechniques. Il indique s'ils fournissent une information continue ou discontinue et si les résultats acquis permettent d'obtenir des valeurs utilisables dans les calculs géotechniques recommandés dans les documents techniques de référence (estimation de la portance du sol, des tassements, calcul des coefficients de sécurité...).

Mode d'investigation	Information continue	Information discontinue	Valeur de calcul
Sondages à la tarière	X		non
Essais de pénétration dynamique		X	oui
Essais de pénétration statique		X	oui
Sondages pressiométriques		X	oui
Diagraphies instantanées (enregistrements de paramètres de forage)	X		non
Diagraphies différées	X		non
Méthodes géophysiques	X	X	non

Tableau 3 : modes d'investigation les plus courants, caractère continu ou non de l'information, obtention d'une valeur de calcul.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi de privilégier les essais pressiométriques et les diagraphies instantanées ou enregistrements de paramètres de forage, soit la combinaison d'informations discontinue et continue, l'une permettant la détermination d'une valeur de calcul, l'autre pas. Le principe et l'interprétation des essais pressiométriques est

reporté en annexe 13, les enregistrements de paramètres de forage sont présentés dans cette même partie, chapitre II § 2.

Le choix des essais pressiométriques repose sur, outre, leur caractère courant, le fait que de nombreux développements ont permis, en France, d'en justifier la conduite par leur aptitude à appréhender finement les caractéristiques mécaniques du sol, aussi bien dans le domaine usuel de fonctionnement qu'à la rupture, et que les résultats de ces essais sont naturellement utilisés pour dimensionner les fondations superficielles et profondes (annexe 14).

1.1. Quelle fiabilité pour le modèle de calcul ?

Les formules, très classiques, utilisées dans le dimensionnement des fondations superficielles et profondes, l'estimation des tassements, n'ont pour objet que de montrer comment les résultats pressiométriques sont utilisés par les géotechniciens.

Nous remarquerons le caractère empirique des calculs. En ce sens, l'ensemble des équations établies s'appuie sur des abaques, des tableaux donnant des facteurs de correction obtenus par l'expérience. En effet, pour le calcul des tassements, le choix du coefficient α est fonction de la nature du matériau et de la valeur du rapport E/pl , qui est relatif à l'état de consolidation du matériau.

En outre, le sol est découpé en "tranches" sous le niveau d'assise des fondations, le calcul du module pressiométrique du sol "équivalent" E , utilisé dans le calcul de S_d (tassement dans le domaine déviatorique - annexe 9), est proportionnel à la moyenne harmonique des modules pressiométriques mesurés dans chaque tranche de sol. Dans le cas d'un sol hétérogène, le choix de α pourrait être multiple. En pratique l'ingénieur choisira la valeur la plus défavorable ou celle qui lui paraîtra la plus représentative.

Les facteurs k_p et k intervenant respectivement tant dans le calcul de la contrainte ultime pour une fondation superficielle et dans le calcul du terme de pointe pour une fondation profonde sont fonction de la nature du matériau, du type de fondation considéré, de l'encastrement de la fondation et des valeurs de pression limite pour k .

Remarquons que les modes de classification de la nature des matériaux selon 3 catégories diffèrent selon que l'on se trouve dans le cas de fondations superficielles ou profondes. En effet, pour une fondation superficielle, la catégorie I correspond aux argiles et limons, alors que la catégorie 1 définie pour les fondations profondes fait état de matériaux présentant une pression limite inférieure à 0.7 – 0.8 MPa, soit des argiles molles, limon et craie molle, sable argileux et limoneux ou vasards lâches. Interviennent donc à plusieurs étapes du calcul des éléments de justification empiriques. Ceux-ci reposant sur l'exploitation experte des résultats expérimentaux permettant d'aboutir à un résultat final (valeur de Q_n par exemple), dont trente années d'expérience ont montré qu'il assure un degré satisfaisant de sécurité pour les fondations correctement dimensionnées.

Le problème est qu'aucun moyen n'existe aujourd'hui pour quantifier cette sécurité. Le mélange intime de règles mécaniques et de paramètres empiriques, souvent à valeurs discontinues, et qu'il n'est pas toujours facile de relier aux valeurs des propriétés physiques mesurées sur le sol, se prête mal à des études fiabilistes.

1.2. Les atouts et limites de l'essai

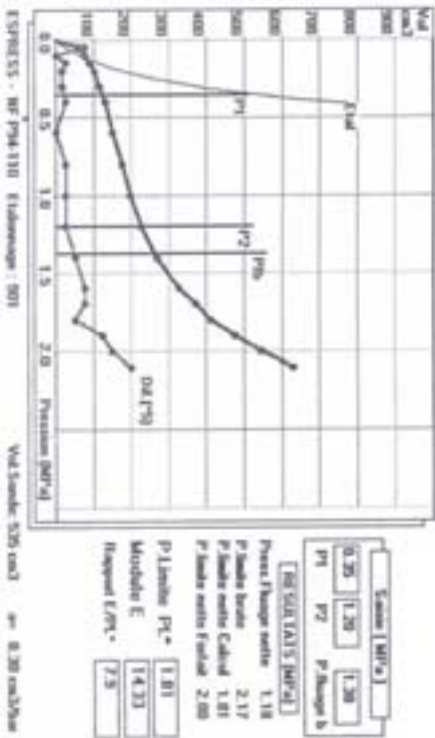
D'autres inconvénients de la procédure relèvent de l'essai lui-même. En France, de nombreuses études géotechniques prévoient la réalisation de sondages pressiométriques. Contrairement aux essais de pénétration statique pour lesquels le refus de l'appareil est obtenu au sein de matériaux ne permettant pas le fonçage du train de tiges, les essais pressiométriques présentent l'avantage de reconnaître les matériaux même compacts ou rocheux, étant entendu cependant que les caractéristiques obtenues dans le rocher sont affectées d'une plus grande incertitude en raison de la faible déformation des matériaux.

Menés au sein d'un forage destructif, les essais pressiométriques permettent donc de rester conforme aux règles du DTU relatif aux fondations profondes et de reconnaître quelle que soit leur nature, les matériaux jusqu'à un minimum de 5 m sous la base du pieu.

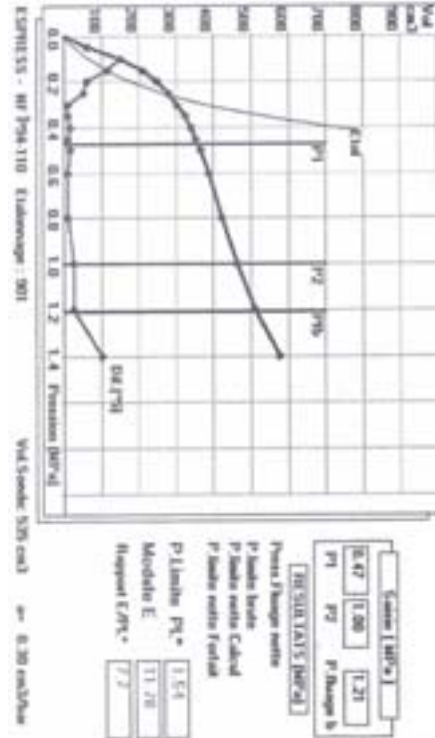
D'autre part, les essais pressiométriques présentent le grand avantage d'apprécier, en partie, la représentativité des mesures. En effet, les essais pressiométriques qui ne fournissent pas une valeur représentative des matériaux investis pour des raisons diverses (qualité médiocre du forage, diamètre inadapté, remaniement important des matériaux, une défaillance du matériel de mesure, une erreur de lecture...) peuvent être facilement identifiés à partir de l'étude des courbes de déformation de la sonde en fonction des pressions appliquées.

Les courbes pressiométriques d'un essai ne présentant pas de défaut majeur et le résultat d'un essai réalisé au sein d'un forage dont la qualité d'exécution n'est manifestement pas satisfaisante sont reportées (Figure 3).

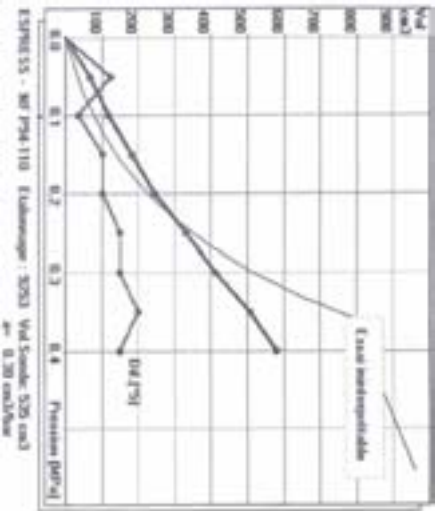
Courbe A



Courbe B



Courbe C



Courbe D

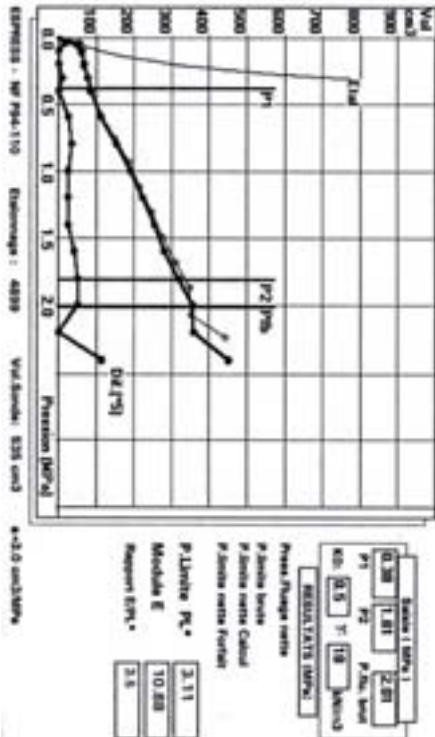


Figure 3: Courbes pressiométriques d'essais correspondant aux critères d'acceptabilité selon la norme NFP 94-110 et essais présentant des anomalies.

La première courbe (a) est tout à fait conforme à la courbe théorique définie par la norme pressiométrique et permet une détermination correcte des paramètres pressiométriques.

En revanche, la courbe (b) témoigne d'un diamètre de forage trop important impliquant une sous évaluation du module pressiométrique. Le volume d'eau injecté pour atteindre la phase des déformations élastiques est trop élevé.

La courbe (c) proche de la courbe d'étalonnage ne peut être dépouillée et ne permet pas de déterminer de valeurs pressiométriques significatives.

Enfin, la courbe (d) est une courbe pour laquelle le rapport E/p_i^* obtenu est de 3.5. La faible valeur du rapport E/p_i^* traduit vraisemblablement une importante sous estimation du module pressiométrique, certainement pour des raisons de remaniement trop important des parois du forage.

2. Les diagraphies instantanées

2.1. Principe et signification des paramètres enregistrés

Il existe différents types de machines de forage (mécaniques, pneumatiques et hydrauliques, mais les foreuses instrumentées pour les enregistrements de paramètres de forages, sont les foreuses hydrauliques, aujourd'hui les plus couramment utilisées en génie civil. Un schéma de la foreuse BE2030 est présenté ci-après (Figure 4).

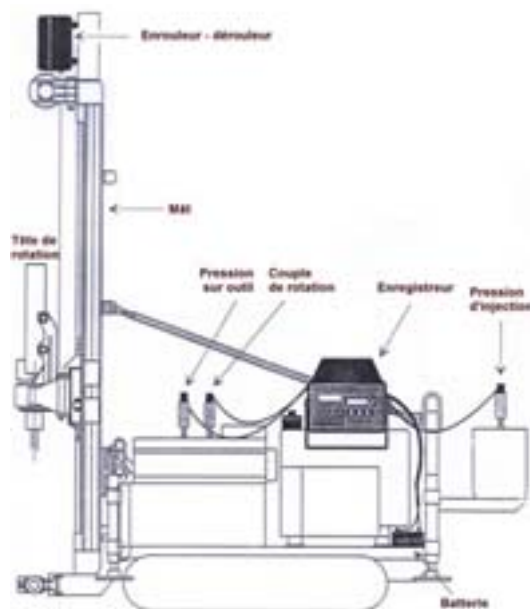


Figure 4 : Schéma de principe d'une foreuse (Exemple de la BE2030)

Sur le mât de la foreuse, la tête de forage suit un mouvement de rotation et/ou un mouvement de translation vertical descendant et ascendant entraînant le train de tiges équipé à son extrémité d'un outil de forage. Les principaux modes de forage sont :

- la percussion : la destruction du terrain se fait par frappe sur l'outil, soit en fond de trou, soit hors trou,
- la rotation : l'outil fore les matériaux par rotation et poussée sur l'outil,
- la roto-percussion, combinant la frappe et la rotation.

Les diagraphies instantanées ou enregistrements de paramètres de forages correspondent aux enregistrements de divers paramètres au cours du processus d'un forage destructif,.

Via des capteurs de pressions hydrauliques branchés en différents points du circuit hydraulique de la machine et un enregistreur numérique de paramètres, les variables suivantes sont mesurées :

- **la pression exercée sur l'outil (Po)**, est mesurée en amont du moteur ou du vérin hydraulique. Le terme est impropre car le paramètre brut, exprimée en MPa, est une pression hydraulique qui, à partir des caractéristiques de la machine fournies par le constructeur peut être transformée en pression sur outil exprimée en tonnes.
- **la pression de retenue (P.ret)**, mesurée à l'aval du moteur ou du vérin hydraulique en MPa. Tout comme la pression sur outil c'est avant tout un paramètre hydraulique, qui suivant une règle de proportionnalité entre la pression hydraulique enregistrée et les caractéristiques de la foreuse permet d'obtenir la pression de retenue exprimée en tonnes.

Ces deux paramètres permettent d'appréhender la poussée effective (P_e) sur l'outil, qui peut être exprimée suivant l'équation 11.

La poussée effective est souvent mal évaluée, car son calcul dépend des pressions maximales données par le constructeur, variant selon les machines. Pour les BE2030, en poussée comme en traction, une pression hydraulique mesurée de 17,5 MPa correspond à une poussée ou une traction de 16 kN (1.6 tonne). Ainsi à titre d'exemple, une mesure (paramètre hydraulique) de 10 MPa en poussée correspond à une poussée de

$$(16 \times 10) / 17.5 = 9.1 \text{ kN (0.91 tonne)}$$

Dès 1985, Girard [Girard 85] montre que l'interprétation des paramètres de forage demande de conserver une poussée constante lors de la foration. Cette condition n'est malheureusement pas compatible avec la réalité du chantier, le sondeur étant soumis à une certaine rentabilité. A moins de contraintes fortes, il ne maintiendra pas la poussée constante, au passage de bancs compacts, le foreur augmentera naturellement la poussée sur outil afin d'assurer la traversée des matériaux résistants en un minimum de temps. De plus, en pratique, il est seulement possible d'imposer la pression hydraulique en amont du moteur (P_o), soit un seul paramètre du calcul de la pression effective.

- **la pression d'injection (Pi) (MPa)** est un facteur à mettre en relation avec la nature des matériaux forés: la pression d'injection est élevée dans les matériaux argileux et faible

dans les matériaux sableux ou dans les zones karstiques. Pour faciliter son interprétation, le débit de la pompe d'injection doit être aussi constant que possible.

- **la pression de rotation (CR) (MPa)**, mesurée en amont du moteur hydraulique entraînant la rotation de la tête de rotation, est à mettre en relation avec la résistance du matériau à la rotation de l'outil. Elle est également fonction des conditions de pilotage de la machine.

A ces paramètres hydrauliques peuvent s'ajouter d'autres paramètres tels que :

- **la vitesse d'avance (VA) (m/h)**. Les profondeurs de forage sont enregistrées grâce à un enrouleur - dérouleur fixé sur le mât de la machine, l'extrémité du cordon suit les mouvements de la tête de forage au cours du processus de foration. Les remontées du train de tige n'étant pas comptabilisées, seuls les mouvements descendants de la tête sont enregistrés.

L'acquisition de l'heure, par une horloge interne permet d'obtenir automatiquement la vitesse d'avance du processus de forage, qui correspond au rapport de deux profondeurs consécutives par la différence des temps correspondants. Les horloges internes des enregistreurs de paramètres de forage sont relativement fiables, la précision de la mesure dépendant essentiellement de la fixation de l'extrémité de l'enrouleur - dérouleur sur le mât de la machine, le filin devant être le plus vertical possible et ne pas frotter sur un quelconque élément de la machine.

Les pas de mesure varient suivant les dispositifs d'acquisition, de quelques millimètres à quelques centimètres. (l'Explofor de la société Apagéo, qui équipait notre machine de forage, propose un pas d'enregistrement tous les centimètres).

- **la vitesse de rotation du train de tiges (VR) (tour/min)**. Pour les machines BE 2030, elle est enregistrée à l'aide d'un capteur placé sur un élément fixe de la tête de la foreuse, celui-ci compte le nombre de tours de la tête de rotation. La vitesse de rotation est exprimée en tours par minute. Nous attirons l'attention sur la fragilité d'un tel capteur, qui pourra être arraché en cours de forage et donc priver l'utilisateur de l'information et d'un grand nombre de paramètres combinés.
- **l'énergie réfléchie (Er)**, mesurée lors d'un forage utilisant la percussion et au sein des matériaux rocheux, correspond à l'énergie non utilisée pour la destruction des matériaux.
- **le temps de foration (tps)**, ajouté au temps de manœuvre, il constitue le temps de forage.
- **la profondeur (Z)**, est mesurée grâce à l'enrouleur - dérouleur installé sur le mât de la machine.

A ces paramètres mesurés en cours de forage s'ajoutent des facteurs non enregistrés caractérisant le mode de forage et les facteurs parasites tels que :

- **le type d'outil utilisé et son usure**. A boutons, à plaquettes, à molettes ou autre, l'outil détermine les réponses diagraphiques et notamment celles de la vitesse d'avancement et de la pression d'injection, car il traduit l'adaptation de l'outil à la nature du terrain foré.

Le choix de l'outil reste délicat, car le plus souvent, au cours d'un forage, il y a alternance de différentes natures de matériaux et il n'est pas envisageable de changer d'outil à chaque changement de formation. Pour les forages destructifs réalisés avec enregistrements de paramètres de forage (D.E.P), les tricones ou taillants à plaquettes (*Figure 5*), (*Figure 6*) présentent les gammes d'utilisation les plus larges. Cependant un outil à boutons en roto-percussion permettra d'obtenir des contrastes plus marqués dans une alternance marnes-argiles.

Afin de limiter l'usure de l'outil et d'affecter dans une moindre mesure la courbe de la vitesse d'avance, il est recommandé d'adopter un outil adapté aux terrains les plus durs [Mazier 90].



Figure 5: Taillant à plaquettes



Figure 6: Tricone

Sans conteste, l'usure d'un outil est un facteur affectant de façon significative la réponse diagraphique. Sur la base de relations empiriques établies par les pétroliers, dans un terrain homogène et en considérant une usure irrégulière, Lossy [Mazier 90] rappelle les travaux de Girard (1985) montrant que pour un outil à dents, une usure de 50% entraînerait un facteur correcteur de 2 sur la vitesse d'avancement. Il conviendrait donc en théorie de mesurer, en début et en fin de forage, la hauteur des dents de l'outil à l'aide d'une jauge d'évaluation et de poser comme hypothèse l'usure régulière de l'outil tout au long du forage afin de corriger la vitesse d'avance en conséquence.

Toutefois, compte tenu de la succession de matériaux plus ou moins tendres une telle correction paraît illusoire. De plus, l'influence de l'usure de l'outil sur la vitesse d'avancement et également fonction de la forme de l'usure. En effet, si au cours du forage les dents s'usent de façon irrégulière, leur taille diminue mais elles restent agressives (auto-affutage), l'impact de l'usure sur les résultats diagraphiques est alors moindre. Dans des cas extrêmes, l'usure est régulière, les dents de l'outil s'aplatissent et perdent de leur efficacité au cours du processus de forage (*Figure 7*).

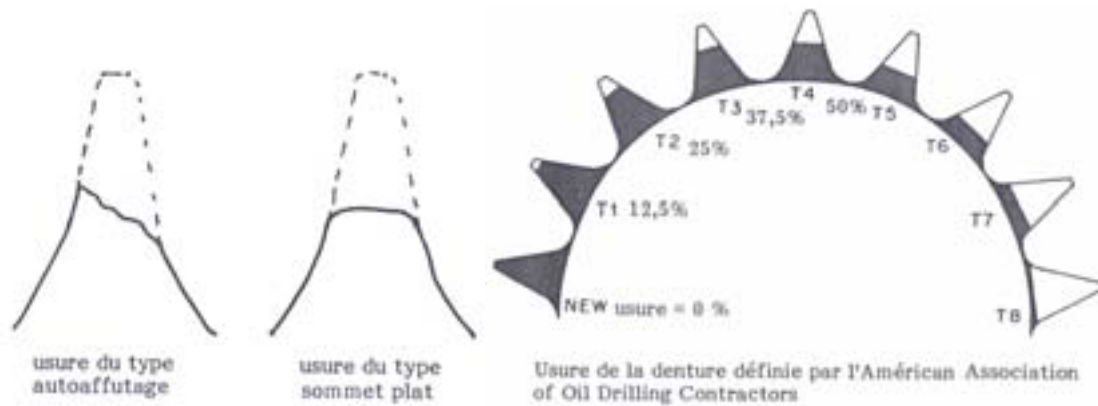


Figure 7: Usure des dents d'outil de forage par l'American association of Oil Drilling Contractors (d'après Mazier 90).

En pratique, dans le cadre de reconnaissances géotechniques classiques, ce facteur n'est pas mesuré et n'est donc pas pris en compte.

- **Le volume de sol effectivement détruit par l'outil.** Le volume de sol intéressé par le processus destructif est fonction du diamètre de l'outil mais surtout de la manière de travailler de l'outil. Un outil à boutons travaillera un peu comme une ponceuse alors qu'un outil à molettes pénétrera dans le matériau modifiant le volume de sol intéressé par le processus de forage. En ce sens, pour un même diamètre de sondage, le volume intéressé par le forage sera variable selon le mode d'action de l'outil et la réponse diagraphique variable.
- **la nature et les variations du fluide d'injection** (eau, bentonite, GSP, air). Il convient de garder à l'esprit que la résistance des matériaux au forage est fonction de la nature du fluide d'injection. Un forage réalisé à la bentonite et un forage réalisé à l'eau ne donneront pas les mêmes profils diagraphiques [Mazier 90].

De plus, pour un fluide d'injection donné, les variations de sa composition engendrent une modification de la pression d'injection dans le circuit de distribution, variation bien sûr indépendante de la nature des matériaux traversés, ce qui constitue un bruit de mesure. En outre, selon la nature des matériaux traversés la préparation d'une bentonite plus dense selon les passes permettra une meilleure tenue des parois du forage.

L'enregistrement des paramètres de forage témoigne des conditions de pilotage et du fonctionnement de la machine (essentiellement via les paramètres P_o , P_{ret} et VR). Les paramètres (essentiellement VA , P_i et CR) varient selon la nature et les caractéristiques des matériaux traversés. Toute la complexité de l'interprétation de ces signaux vient de leur interconnexion, toute variation de l'un ayant des répercussions sur la réponse des autres.

2.2. Combinaison de paramètres de forage

Afin de prendre en compte l'interdépendance des paramètres de forage et dégager les informations permettant de mettre en évidence les variations lithologiques des matériaux, les modifications de leur résistance au processus du forage et les changements de perméabilité, les travaux issus des recherches pétrolières et plus tard dans le domaine du génie civil ont conduit à de multiples paramètres composés, les paramètres composés les plus couramment utilisés sont reportés dans le document fourni par la société Solétanche [doc.Solétanche] et la lettre Mazier [Mazier 90] (annexe 15).

Pour notre étude, la défaillance du capteur de vitesse de rotation et le manque de données quant à la pression de retenue ne nous ont pas permis d'utiliser les paramètres composés comme variable d'étude. Compte tenu des contraintes de chantier, nous avons du nous contenter les paramètres de base VA, Pi, Po et CR.

En principe, l'utilisation de paramètres combinés dérivant de considérations physiques ou expérimentales a pour but de minimiser, dans l'interprétation du signal, la part de la machine et des conditions de pilotage. Le choix des combinaisons à exploiter est fonction des caractéristiques du site et doit permettre un meilleur contraste entre les différentes couches traversées en synthétisant l'information sous une forme plus accessible.

Cependant, la multiplicité des paramètres combinés peut créer un certain sentiment d'impuissance. Elle révèle la complexité du processus de foration, qui combine les propriétés mécaniques des terrains que l'on cherche à identifier et d'autres facteurs liés à la machine et à son système d'asservissement, à l'outil, aux options choisies par le foreur...

De toute évidence, les signaux enregistrés portent une information potentielle, mais la meilleure méthode pour révéler cette information n'est pas évidente. Au regard du nombre de paramètres parasites non contrôlés lors du processus de forage, le nombre limité de paramètres exploitables pour notre étude ne nous paraît pas nécessairement pénalisante.

2.3. Interprétation du signal diagraphique : Identification des limites de couches au sein d'un forage

2.3.1. L'entropie du signal

Le traitement des variations de propriétés relevées au sein d'un sondage concerne essentiellement les enregistrements de paramètres de forage (ou diagraphies instantanées) et l'application de la théorie du signal aux données diagraphiques.

Les diagraphies fournissent en effet des séries de données à faible pas d'échantillonnage, qui au contraire des essais de laboratoire ou des essais pressiométriques, se prêtent bien à l'étude des signaux.

Ce thème est étudié depuis de nombreuses années au CDGA⁴ de l'Université de Bordeaux I et a fait l'objet de plusieurs thèses menées en collaboration notamment avec le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux, l'ANDRA, Lutz, Bachy-Solétanche et le Cemagref. Plus récemment, la même problématique a été abordée pour les forages horizontaux [Denis & al. 98].

K. Amokrane [Amokrane 88] a mis en évidence le caractère très erratique des enregistrements de paramètres de forage réalisés en milieu naturel et a proposé par l'analyse statistique des données le découpage des profils en zones statistiquement homogènes. Ce travail est à mettre en relation avec celui J.M. Duchamps [Duchamps 88], qui propose d'utiliser l'entropie ($L(z)$) du signal, qui caractérise l'agitation de ce signal, dans le but de définir la limite entre deux couches de sol successives. L'entropie du signal $d(z)$ suit l'équation 8.

$$L(z) = \sum_{z_0}^z |d(z_{i+1}) - d(z_i)| \quad \text{équation 8}$$

Le diagramme de l'entropie suivant la profondeur z , se présente comme une fonction croissante, constituée d'une succession de paliers de pente P (équation 9). Plus le signal est agité plus la pente est grande.

$$P = \frac{dL(z)}{dz} \quad \text{équation 9}$$

Si l'on note σ l'écart-type des données constituant chaque palier d'entropie, Morlier [Morlier & al. 89] montre que le rapport $\frac{\sigma}{P}$ est caractéristique des terrains traversés et proportionnel à la portée du variogramme du signal, soit la distance au-delà de laquelle deux points ne sont plus corrélés entre eux. Il définit ainsi une distance caractéristique $DC = \alpha \frac{\sigma}{P}$ avec α voisin de 4.

Ces résultats ont été exploités par M. Bourget, [Bourget 93], qui met au point un processus de recherche semi-automatique des zones statistiquement homogènes au sein d'un forage, minimisant ainsi la part de subjectivité de l'expert. Après régularisation des données diagraphiques (suppression des valeurs aberrantes et filtrage du bruit), le diagramme d'entropie correspondant au signal diagraphique traité permet le découpage en zones statistiquement homogènes. La limite entre deux formations étant matérialisée par une rupture de pente du profil d'entropie.

F. Crémoux [Crémoux & al. 91], propose la lecture du signal d'entropie par une méthode de reconnaissance de formes par réseau neuronal mettant en évidence les concavités essentielles du signal d'entropie. Celles-ci sont retenues comme limites de formation.

4 Centre de Développement de Géosciences Appliquées

Le découpage automatique de la courbe d'entropie est lié à la dimension caractéristique [Morlier & al 89] et dépend de la fenêtre d'observation du signal. Il se justifie dans les structures emboîtées révélées par le variogramme (Figure 8). L'ensemble du processus fait l'objet du logiciel Scanner mis en œuvre au CDGA.

Les applications du logiciel ont été testées sur un signal réel de la vitesse d'avance (VA) contrasté. La coupe établie par le sondeur rend compte d'environ 2.0 m de matériaux de remblais argileux, 1.7 m de matériaux calcaires altérés à passées argileuses surmontant le substratum calcaire compact.

La première étape du processus consiste à filtrer le signal diagraphique brut. Le logiciel procède à une analyse en fréquences du signal mettant ainsi en évidence le comportement du signal dans les domaines des basses et hautes fréquences. C'est dans le domaine des hautes fréquences que la fonction présente les caractéristiques d'une fonction aléatoire, typique d'un bruit responsable du caractère erratique des signaux diagraphiques. L'utilisateur peut intervenir à ce niveau et imposer la limite séparant les deux domaines fréquentiels fixant ainsi l'intensité du lissage. Le calcul de l'entropie du signal filtré sert de base au découpage du signal en zones statistiquement homogènes. Chaque pente d'entropie étant caractéristique d'une couche.

Bien qu'à l'échelle du forage, la vitesse d'avance ne réponde pas aux hypothèses permettant l'application de la théorie des variables régionalisées (chapitre I - § 4.2), il est admis [Bourget & al. 95] que l'hypothèse intrinsèque (moyenne et variance des accroissements sont stationnaires) peut être considérée comme vraie à l'échelle locale, c'est à dire au sein d'une couche "homogène".

Le variogramme de VA fait ressortir une structure emboîtée, marquant la présence de structures distinctes. Au-delà de 2.5 m, le comportement du variogramme marque une dérive linéaire témoin de la non stationnarité du signal à l'échelle du forage. La finesse du découpage obtenu est fonction du choix de la portée du variogramme privilégiant la structure des données à petite ou à plus grande échelle. En effet, la portée du variogramme du signal liée à la dimension caractéristique définie à partir de l'entropie permet de préciser l'échelle de découpage⁵.

Ici, le découpage obtenu rend compte des principales unités lithologiques identifiées par le foreur, à 1.9 m et 3.8 m de profondeur, et propose d'autres limites, témoins de variations locales du signal.

Ainsi, si l'entropie permet de placer la limite entre deux couches successives, elle marque également les hétérogénéités relevées au sein d'une formation composite ou les variations locales du paramètre de forage considéré. Celles-ci apparaîtront alors comme une succession de plusieurs couches de faible amplitude.

Le rôle de l'utilisateur expert reste essentiel :

5 la portée du variogramme traduit la distance au-delà de laquelle la valeur d'un échantillon au point x n'apporte plus d'information à l'échantillon placé en $(x+h)$.

- (1) lors de la consolidation des données, pour éliminer les valeurs aberrantes et définir le seuil entre la partie du signal porteuse d'information et le bruit, défini comme la variabilité spatiale des mesures inférieures à l'échelle d'observation,
- (2) dans la définition de la portée du variogramme, selon l'échelle retenue, le découpage proposé sera plus ou moins fin.

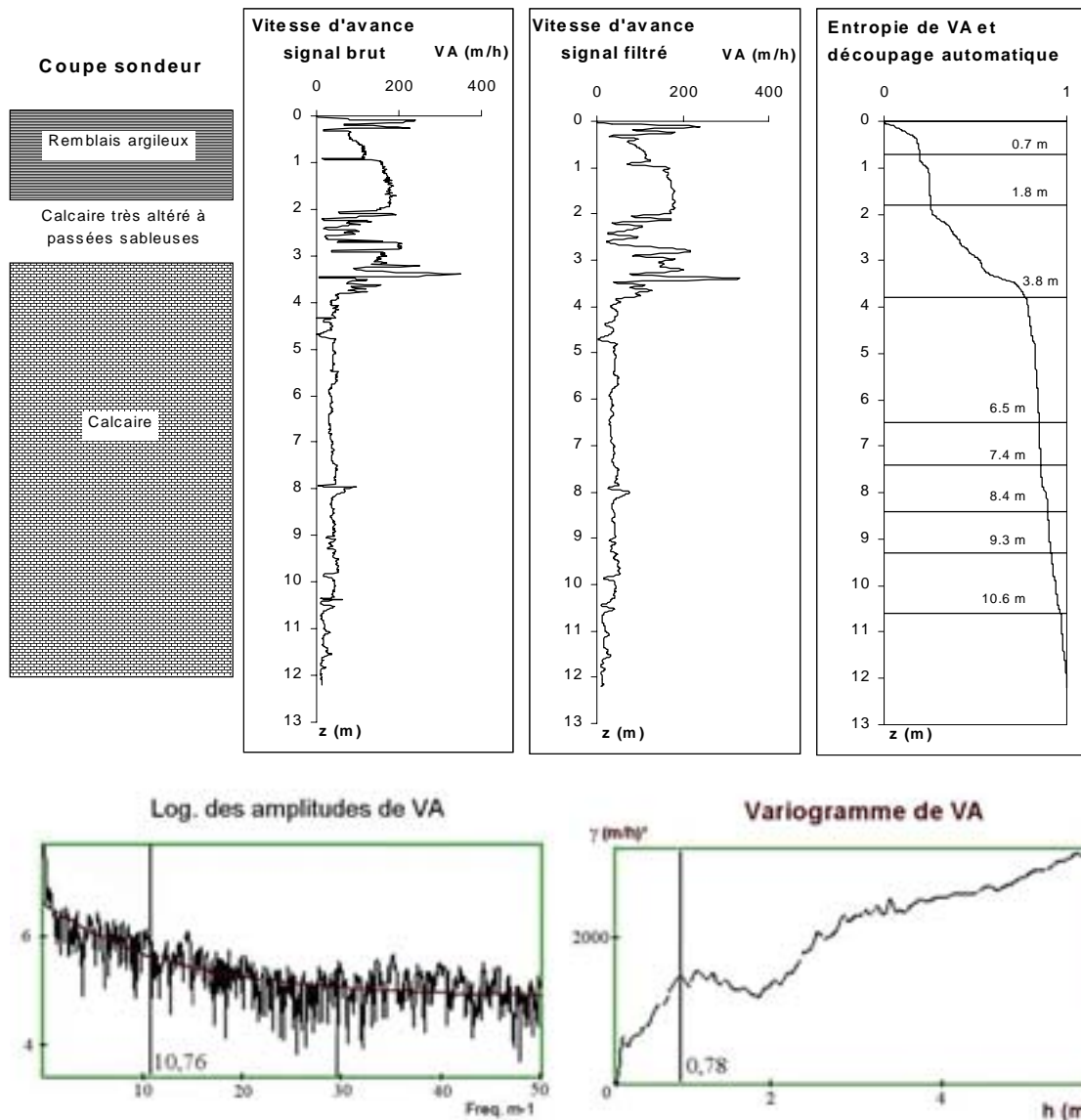


Figure 8 : Traitement et découpage de profils diagraphiques (vitesse d'avance) par le programme Scanner

2.3.2. L'apport de paramètres élaborés dans le découpage du signal

L'application de la technique de découpage des signaux diagraphiques dans le domaine du génie civil est, notamment, présentée par Denis [Denis & al 98]. Les paramètres de pilotage d'un tunnelier, l'étude du paramètre composé correspondant à la "forabilité" (R_f) (MPa) des matériaux mis en avant par H. Girard [Girard 85] (équation 10), le découpage de l'entropie en plusieurs segments selon l'échelle d'observation et le calcul d'un indice d'homogénéité (I_h) (équation 14), permettent de préciser la coupe lithologique des terrains excavés et les zones de facilité ou de difficulté d'excavation.

$$R_f = \frac{k \cdot P_e \cdot \omega}{V \cdot D} \quad \text{équation 10}$$

P_e = Poussée effective (t),

avec :

$$P_e = P - R + P_{\text{tête rotation}} + P_{\text{tiges}} \quad \text{équation 11} \quad [\text{Mazier 90}]$$

où : P = poussée sur outil (t)

R = retenue (t)

$P_{\text{tête rotation}}$ = Masse de la tête de rotation (t)

P_{tiges} = Masse des tiges (t)

ω = vitesse de rotation (tours/min), V = vitesse d'avance (m/h), D = diamètre de l'outil (m)

k = coefficient d'étalonnage permettant d'obtenir $R_f = R_c$ (résistance à la compression simple du matériau foré).

Notons que, dans le cas de l'étude des paramètres de pilotage d'un tunnelier, Denis propose une expression plus complète de la forabilité permettant de prendre en compte la géométrie des outils de forage et des hypothèses sur le comportement mécanique des terrains excavés (équation 12).

$$R_f = \frac{K^\alpha \cdot \omega^\alpha \cdot P_e}{D^{2\alpha} V^\alpha} \quad \text{équation 12}$$

avec :

$$K = \frac{2\sqrt{2}}{3\pi} \left(\frac{\cos(\beta)}{a} \right)^{1/2} \cdot \frac{m}{n^{1/\alpha} \cdot k} \quad \text{équation 13}$$

et

$$\alpha = 2/3$$

Dans l'équation 13, les variables, a et k regroupent les données concernant la géométrie de l'outil de forage, les variables m et n prennent en compte le nombre de molettes actives.

L'indice d'homogénéité I_h s'exprime :

$$I_h = 1 - \frac{a' \cdot p}{a \cdot p_{\max}} \quad \text{équation 14}$$

Notons que le calcul de l'indice homogénéité nécessite de prendre comme référence une zone particulièrement hétérogène où la pente d'entropie (p_{\max}) est très importante et la portée du variogramme pour cette zone est notée (a'). I_h est calculé pour chaque segment de la courbe d'entropie, (p) étant la pente d'entropie du segment étudié et (a) la portée du variogramme correspondant.

Cette approche constitue alors un outil pour les entreprises devant justifier auprès du maître d'œuvre des baisses de rendements dans le creusement du tunnel.

2.4. Les atouts et limites des diagraphies instantanées

L'atout majeur des forages destructifs avec enregistrement de paramètres est d'ordre économique. En effet, la réalisation d'un tel sondage est rapide et peu cher. Dans le tableau suivant nous avons reporté les coûts relatifs à un sondage pressiométrique de 10 m de profondeur comprenant 9 essais et un forage destructif de 10 m également avec enregistrements de quatre paramètres (ces prix s'entendent sans l'amenée et repli du matériel et ne constituent que des ordres de grandeur).

	Coût approximatif
Forage pressiométrique (10ml, 9 essais)	900 € (6000 F)
Diagraphie instantanée (10ml, 4 paramètres)	400 € (2 600 F)

De plus, l'enregistrement des paramètres permet de rendre compte des profondeurs de forage atteintes et offre au maître d'œuvre un outil de contrôle, de justification des coûts.

Bien souvent, les diagraphies instantanées ne sont pas valorisées et ne sont mises en œuvre que dans le but de vérifier la bonne exécution du forage.

La limite majeure des forages destructifs est qu'ils ne permettent pas d'établir une coupe fiable du milieu traversé en raison de la remontée différée des « cuttings » par rapport au changement effectif de formation. Ainsi, ils doivent être associés à des sondages à la tarière ou mieux encore à des sondages carottés. Mais une fois encore, le problème du coût et de la bonne exécution selon la nature des matériaux est posé.

Ils ne permettent pas non plus d'acquérir des données directement utilisables dans les calculs géotechniques. En l'absence d'expressions reliant paramètres hydrauliques et grandeurs physiques utilisables en géotechnique, il est impossible de passer de l'une à l'autre sans employer des paramètres composés complexes, souvent incalculables sans émettre de nombreuses hypothèses de constance de certains paramètres de fonctionnement de la machine et négliger de nombreux facteurs non maîtrisés (usure de l'outil notamment). Pour une campagne géotechnique donnée, ils ne peuvent être exploités qu'en combinaison à d'autres essais permettant d'évaluer le comportement mécanique du sol [Ferry 96].

La principale limite dans la valorisation des diagraphies instantanées réside dans le fait que les processus de forage ne font aujourd'hui l'objet d'aucune normalisation. Les conditions de forage varient d'un chantier à l'autre et souvent sur un même chantier et l'utilisation de paramètres composés ne permet pas d'éliminer les bruits liés aux variations de paramètres de conduite du forage.

En effet, nous avons vu que l'ensemble des paramètres composés nécessite l'utilisation de nombreux facteurs, le plus souvent inconnus ou du moins très imparfaitement. Dans le calcul de la poussée effective intervient l'enregistrement de la pression de retenue, dont le capteur n'est pas systématiquement installé sur les machines de forage. La vitesse de rotation est également un paramètre très souvent utilisé dans les formulations de paramètres composés, mais celle-ci n'est que rarement enregistrée, la robustesse de certains capteurs n'étant pas suffisante au regard des contraintes de terrain.

<p>Il ressort donc que les paramètres composés ne sont généralement pas utilisés dans le cadre de reconnaissances géotechniques usuelles pour lesquelles seuls VA, Po, Pi et CR sont mesurés. L'interprétation des résultats est donc rendue difficile et d'autant plus incertaine que l'influence des paramètres parasites (usure de l'outil, variation de composition du fluide de forage) n'est pas maîtrisée.</p>

En conséquence, si l'on réalise un forage dans des conditions usuelles de chantier, l'ensemble des corrections apportées ultérieurement ne permettra jamais l'obtention d'enregistrements diagraphiques de même qualité que si l'on avait maintenu un maximum de paramètres constants.

2.5. Applications pratiques des diagraphies instantanées et utilisation combinée de différents modes de reconnaissance

Dans le cadre de reconnaissances géotechniques réelles et malgré les inconvénients mis en avant précédemment, l'utilisation des diagraphies instantanées s'est révélée utile à plusieurs reprises. Nous citerons en exemples :

2.5.1. La localisation du toit du substratum rocheux.

Dans le cas de l'étude géotechnique menée sur le barrage du Cheliff (Algérie) par la société Coyne et Bellier [Flepp & al. 83]. Le site retenu comportait un remplissage composé principalement d'alluvions fines sablo-silto-argileuses surmontant un substratum marno-gréseux. Les auteurs présentent essentiellement les corrélations établies entre les paramètres de forages et les autres essais mis en œuvre sur le site. S'il apparaît que les relations doivent être établies pour chacune des formations, les résultats obtenus, à partir des profils diagraphiques lissés, relient :

- dans les sables, la vitesse d'avance (VA) et la résistance de pointe mesurée au pénétromètre statique q_c .
$$VA = 210.8 - 41.4 \ln (q_c) \quad (r = 0.94) \quad N = 15$$
- dans les argiles, la vitesse d'avance VA et la pression limite p_l^*
$$p_l = 4.56 - 0.73 \ln (VA) \quad (r = - 0.81) \quad N = 24$$

La vitesse d'avancement a également permis de classer les sols selon leur consistance, les alluvions de recouvrement présentant des vitesses d'avance supérieures 50 m/h, ce qui représentait un élément d'information permettant de délimiter l'interface entre le substratum et les alluvions. Précisons que lors de l'exécution des sondages, la pression sur l'outil avait été maintenue aussi constante que possible (1MPa).

2.5.2. Le contrôle du renforcement des sols.

Les forages destructifs avec enregistrements de paramètres de forage associés aux essais pressiométriques sont utilisés dans le contrôle du traitement des sols compressibles par compactage statique horizontal. Deux chantiers typiques (Rieme en Belgique et Monaco Fontvielle zone D) sont présentés par Gambin [Gambin 89].

La technique permet de traiter des couches compressibles en profondeur surmontées de formations plus denses ou d'enrochements. Le procédé consiste à injecter, suivant un maillage de plots, des volumes de coulis prédéterminés en fonction des densités relatives initiales et visées des terrains à traiter.

En plus des essais de laboratoire et autres essais in situ (scissomètre, pénétromètre, essais sismiques entre forage...), les forages destructifs avec enregistrements de paramètres et

essais pressiométriques interviennent lors de l'analyse des matériaux à traiter, afin d'obtenir les plages de valeurs caractéristiques des ces matériaux et après réalisation des injections, afin d'apprécier le gain apporté par l'injection du coulis. Les valeurs de référence sont établies sur des plots d'essai. Là encore, la constance des paramètres de pilotage est exigée.

2.5.3. Le repérage de valeurs pressiométriques suspectes et l'estimation de valeurs compatibles avec les enregistrements de paramètres de forage. [Cassan & al 99]

Sur la ligne nouvelle TGV Méditerranée, l'exploitation des enregistrements de paramètres de forage a permis :

- d'éliminer de la base de données des valeurs de module pressiométrique non plausibles au vu des enregistrements diagraphiques,
- d'estimer des valeurs de module à partir de corrélations établies, pour le site et dépendants de la nature des matériaux, entre le module pressiométrique du sol et la vitesse spécifique (VA/P_e).

Les auteurs confirment que, compte tenu de la très complexe interaction des différents paramètres, de l'impact de la machine, de l'outil et du foreur, il paraît difficile de comparer des résultats issus de différentes conditions de forage et de différents chantiers.

2.5.4. La Localisation d'une zone hétérogène très fracturée avec joints argileux. [Cassan 99]

Toujours lors de la reconnaissance géotechnique du tracé du TGV Méditerranée au niveau des viaducs d'Avignon, la comparaison des profils de la vitesse d'avance et de la pression sur outil pour deux sondages a permis de localiser, dans le calcaire barrémien, une zone d'anomalie, qui s'est révélée après carottage être une portion très fragmentée de calcaire avec des joints argileux, expliquant une vitesse d'avance plus élevée pour une pression sur outil plus faible.

Ici les forages destructifs avec enregistrements de paramètres de forage ont permis d'implanter un sondage carotté au droit d'une anomalie afin d'étudier le traitement le mieux adapté.

3. Nos objectifs et les étapes de notre démarche

Le principal objectif de notre recherche est de mieux maîtriser le risque global en combinant des informations issues de techniques complémentaires. Il s'agit d'aider l'expert à réduire les incertitudes et de mieux justifier ses choix vis à vis du maître d'ouvrage.

Nous avons montré qu'une connaissance insuffisante de l'hétérogénéité du sous-sol peut entraîner à court terme des surcoûts lors de la construction et à plus ou moins long terme des coûts liés aux dommages affectant la structure du bâtiment et leurs effets induits sur l'environnement.

Le géotechnicien, conscient que l'hétérogénéité du milieu naturel ne saurait être complètement reconnue par des sondages ponctuels et que les mesures réalisées au laboratoire ou in situ sont erronées, doit faire des choix, basés sur son expérience et le bon sens afin de définir les valeurs géotechniques applicables dans les règles de calcul établies.

La question est de savoir si la valeur qu'il considère est représentative des formations reconnues et du sol affecté par l'édifice projeté. Son choix doit être raisonnablement sécuritaire afin de limiter les risques de dommages sans pour autant pénaliser trop sévèrement le projet. Dans ce subtil dosage, le géotechnicien ne dispose pas aujourd'hui d'outils simples lui permettant d'estimer le risque lié à ses choix. Il n'est pas, non plus, en mesure de définir en amont quel serait le nombre minimum de sondages permettant de viser un certain niveau de risque.

Pour tenter de mieux cerner ces questions, nous proposons une méthodologie mettant en œuvre l'exploitation combinée des enregistrements de paramètres de forage et des essais pressiométriques, deux techniques habituellement distinctes, afin d'acquérir une meilleure reconnaissance de l'hétérogénéité du sol pour un coût équivalent à celui d'une investigation réalisée dans le cadre d'un projet de taille "normale", de type petit collectif.

Nous proposons par l'exploitation des informations disponibles (lithologie établie par le sondeur, signaux diagraphiques et log pressiométriques) :

- de définir une coupe lithologique éclairée
- d'estimer des valeurs pressiométriques complémentaires à partir des enregistrements de paramètres de forage
- d'estimer le degré de sécurité pour une fondation et un niveau d'assise donné.

Le travail repose sur les résultats obtenus sur un site expérimental mis en œuvre à l'IUT de Génie Civil de Bordeaux I. Les données issues des enregistrements de paramètres de forage et les essais pressiométriques sont traités à plusieurs échelles (forage, site, formation) afin d'identifier les distributions statistiques et corrélations les plus pertinentes. Ces relations seront utilisées pour enrichir progressivement l'image du site.

Tout en respectant les contraintes techniques citées précédemment, nous avons aussi mis à profit la disponibilité de ce site pour en compléter la reconnaissance et disposer d'informations permettant d'apporter des informations complémentaires.

Ainsi, nous avons procédé

- à une campagne de mesures géophysiques par méthode électrique pour replacer les mesures ponctuelles dans un contexte plus large et aider à construire une image globale du site,
- à des forages carottés et à des essais de caractérisation physique et mécanique au laboratoire pour mieux éclairer les corrélations,
- à un nombre de forages beaucoup plus élevé que celui auquel on procède dans sur un tel site, pour mieux identifier les forces et les faiblesses de ces mêmes relations statistiques. Il s'agit de forages destructifs avec enregistrements de paramètres au sein desquels ont été réalisés des essais pressiométriques suivant la norme NFP 94 110.

Afin de respecter des conditions de chantier usuelles et permettre la mise au point d'une méthodologie robuste, l'ensemble du travail sera mené en respectant le contexte professionnel et économique des campagnes actuelles. Nous n'imposerons donc pas de contraintes spécifiques, dont le respect, hors du champ d'étude, semble difficile.

En conséquence, nous ne disposerons que des paramètres de forage les plus courants et la conduite du forage sera effectuée selon les habitudes du foreur. Les outils de forage, bien qu'adaptés aux matériaux pourront varier et le degré d'usure n'en sera pas systématiquement contrôlé. De plus, plusieurs ateliers de forage interviendront sur le site.

L'étude des limites de la démarche permettra de définir les points à améliorer afin d'obtenir des résultats plus fiables et de progresser dans la caractérisation de la variabilité du sol.

Partie II

La mise au point des outils

INTRODUCTION : La stratégie suivie

Compte tenu de notre incapacité à reconnaître le sol avec exactitude en tout point, de l'absence d'évaluation du risque attaché à toute valeur géotechnique et des contraintes économiques limitant le nombre d'essais, et particulièrement dans le cadre d'une campagne de reconnaissance usuelle, nous proposons de compléter l'information pressiométrique en exploitant les enregistrements de paramètres de forages acquis lors de la réalisation du forage préalable aux essais pressiométriques.

L'idée consiste à coupler les paramètres pressiométriques, témoins des caractéristiques mécaniques "lissées" du sous-sol, les essais étant réalisés tous les mètres, et les paramètres de forage, pouvant donner une image de l'hétérogénéité du milieu suivant une échelle d'observation très fine (pas de mesure centimétrique) et à moindre coût.

Cette démarche s'inscrit dans la recherche d'un accroissement de la qualité de l'étude géotechnique par une meilleure prise en compte de la notion de variabilité des données et permet d'estimer le risque attaché une valeur de calcul. Notre objectif est de développer un outil utilisable par le géotechnicien, lui permettant d'estimer les qualités mécaniques du sol à partir des signaux d'enregistrement de paramètres de forage en combinant de façon cohérente des résultats issus de deux techniques habituellement disjointes.

L'objet de cette section est :

- de suivre les étapes de la méthodologie mise en œuvre, le but étant d'estimer le risque attaché à la portance du sol définie par le géotechnicien pour une fondation et un site donnés
- de voir comment, pour un site donné, le nombre optimal de sondages peut être estimé via une fonction « coût global » intégrant le coût de la reconnaissance, le coût des travaux de fondation et celui des dommages ?

Cette partie est destinée à la mise en place de l'ensemble des outils utilisés. A cette fin et pour illustrer le propos, nous présenterons les résultats obtenus à partir de plusieurs jeux de données provenant de différents sites ou de signaux synthétiques. La troisième partie de ce document mettra en application les différents outils, présentés ici, sur un site expérimental et sur un chantier réel.

Les données de base de notre travail sont issues de multiples campagnes de reconnaissance comprenant des forages destructifs avec enregistrements de paramètres au sein desquels ont été réalisés des essais pressiométriques et des coupes lithologiques établies par le sondeur.

L'utilisateur étant le géotechnicien, notre souci est de travailler sur des grandeurs pressiométriques utilisables dans des règles courantes de pré-dimensionnement des fondations (DTU 13.12 et DTU 13.2) et de valoriser l'expérience des acteurs (coupe établie par le sondeur, expérience du géotechnicien).

Le pari est que les enregistrements de paramètres de forages portent de l'information pertinente et qu'ils peuvent être corrélés aux résultats pressiométriques.

Les contraintes de l'étude sont liées au caractère très bruité des diagraphies instantanées, et, dans le cadre de reconnaissances usuelles, à un nombre d'essais pressiométriques peu élevé.

La démarche consiste, à partir de corrélations établies entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage, pour un niveau d'observation donné, à estimer, à partir des signaux diagraphiques, un intervalle de valeurs pressiométriques pour un niveau de risque donné. Ce premier niveau permet d'obtenir les distributions statistiques, habituellement inaccessibles, des paramètres pressiométriques pour le site étudié.

A un second niveau, l'utilisation des règles de calcul imposées dans les DTU sur des profils pressiométriques virtuels particuliers, permet de proposer, pour un ouvrage donné, la distribution statistique de la portance du sol et d'évaluer ainsi le risque attaché à toute valeur de calculée par le géotechnicien.

Le schéma simplifié ci-après synthétise les points majeurs de notre raisonnement (Figure 9).

La méthodologie proposée se décomposera en quatre étapes majeures :

1. Etablissement de relations statistiques entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage. Elles permettront à partir de forages destructifs avec enregistrement de paramètres de générer des valeurs pressiométriques représentatives du site d'étude.

Nous verrons que ces relations sont fonction du site, des conditions de chantier et de la nature des matériaux.

2. Les relations entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage étant fonction de la lithologie, nous présenterons un processus algorithmique permettant d'enrichir la coupe établie par le sondeur ou le géotechnicien par la prise en compte de l'information lithologique portée par les signaux diagraphiques.

A partir d'une lithologie initiale définie a priori, l'algorithme proposera une lithologie probable à l'échelle du forage, plus conforme à l'information diagraphique.

En pratique, le processus construit un log. de probabilités pour chacune des formations i envisagées. Ce qui signifie que pour chaque point constitutif du forage, nous calculons la probabilité d'appartenance de ce point à la formation 1, à la formation 2 à la formation

- i. Par exemple, pour un site constitué de 4 formations par exemple, (Argile, Sable, Calcaire, et Grave), la nature lithologique d'un point situé à la profondeur z est à 90% argileuse, 3.33% sableuse, 3.33% calcaire et 3.33% graveleuse.
3. Estimation d'un intervalle de confiance des profils pressiométriques, statistiquement représentatif du site étudié, permettant d'obtenir une image du milieu beaucoup plus complète que celle définie à partir des seuls points de sondages réalisés sur le site. L'estimation des paramètres pressiométriques à partir d'un signal diagraphique fera intervenir différentes équations de corrélation, leur influence étant pondérée par la probabilité d'appartenance aux formations i des matériaux traversés.
 4. La génération de profils pressiométriques virtuels particuliers permettra, tout en conservant les habitudes de travail du géotechnicien, d'appliquer les calculs géotechniques usuels sur les profils pressiométriques estimés, représentatifs des caractéristiques du sous-sol. Ainsi, les formules reportées dans les documents techniques unifiés concernant le calcul des fondations superficielles et fondations profondes, seront appliquées à une base de données beaucoup plus riche quantitativement et qualitativement, dans le sens où les données générées intégreront l'information diagraphique et les profils générés sont beaucoup plus nombreux que les profils mesurés.

Il sera alors possible de construire la fonction de répartition de la portance du sol pour une fondation et un site donnés, à partir de laquelle, l'outil élaboré permettra de déterminer le risque associé à toute valeur calculée par l'ingénieur et inversement de définir une valeur de calcul de référence pour un risque donné.

Les résultats peuvent être également exploités dans le but de définir le nombre de sondages à réaliser pour une campagne de reconnaissance, en faisant intervenir une fonction "coût" pour le projet et un niveau de risque donné.

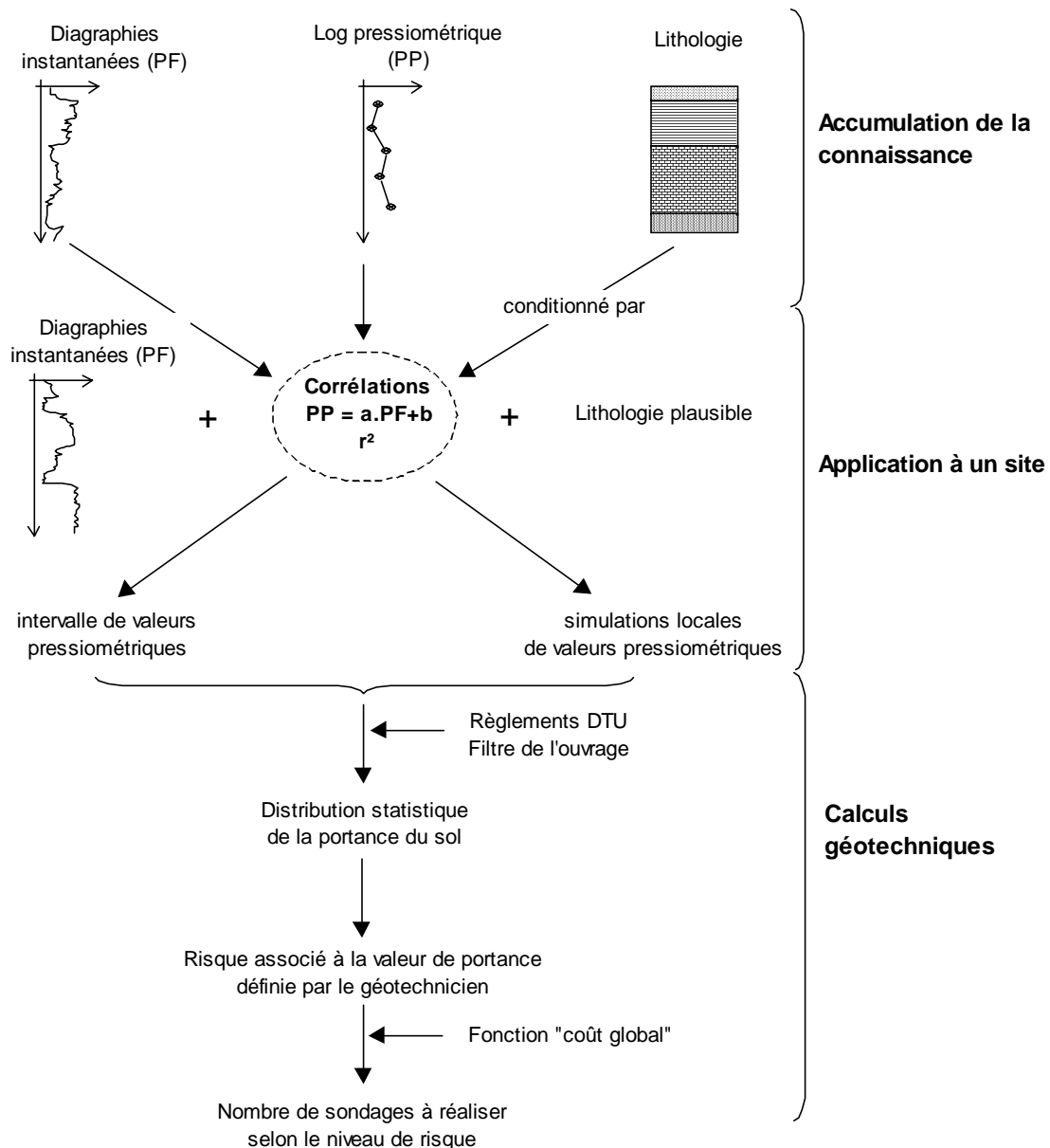


Figure 9 : Schéma simplifié du raisonnement suivi

Cette stratégie peut être adaptée principalement à deux niveaux selon le stade d'avancement de la campagne de reconnaissance géotechnique :

- **Niveau (a)** : Pour un site donné, plusieurs forages destructifs avec enregistrements de paramètres de forages et essais pressiométriques ont été réalisés. A partir de ces informations, le géotechnicien peut alors estimer les caractéristiques pressiométriques du sol en un point où, pour des raisons techniques ou économiques, seuls les signaux diagraphiques sont disponibles.

A ce niveau de précision les valeurs pressiométriques sont estimées à partir des corrélations établies pour le site et à partir d'une variable diagraphique choisie (variable explicative).

- Niveau (b) : A l'échelle d'un forage, pour lequel signaux diagraphiques et paramètres pressiométriques ont été réalisés, le géotechnicien veut estimer, au sein d'un forage les caractéristiques mécaniques du sol entre les points de mesures pressiométriques.

Nous développerons en détail la méthode proposée au niveau (a), son application sur des données réelles sera précisée dans la troisième partie de ce mémoire.

La mise en œuvre de la méthodologie et l'exploitation des données seront confrontées, selon les étapes, à de nombreuses difficultés qu'il faudra traiter et dont il faudra tenir compte, dans l'appréciation de la qualité des résultats obtenus.

En effet, les résultats seront grandement conditionnés par :

1. la qualité et la représentativité des relations statistiques établies entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage, les facteurs parasites provenant :

- de l'importante variabilité naturelle du sol. En effet, les individus de même nature lithologique, n'appartiennent pas nécessairement à la même population statistique.
- des bruits liés aux mesures (pressiométriques et diagraphiques).

Aux différents types d'erreurs de mesures (cf. 1^{er} partie, chapitre 1 § 3.5), il faut ajouter :

- l'influence des supports de mesure, différents pour les deux techniques utilisées. La taille de la cellule centrale de mesure de la sonde pressiométrique est de 0.20 m, alors que le pas d'enregistrement des données diagraphiques est réalisé tous les centimètres. Il conviendra donc de prendre en compte, dans l'établissement de la base de données, l'effet « intégrateur » de la sonde pressiométrique.
- le fait que les variables d'étude ne traduisent pas le même phénomène physique. L'essai pressiométrique mesure le comportement du sol dans le domaine des déformations pseudo-élastiques et donne la pression de rupture du sol. Les paramètres de forage traduisent indirectement la réponse vis-à-vis du processus de forage. Selon les foreurs et les outils utilisés, la traversée des matériaux s'opère par déchiquetage (outil tricône), découpage (outil à plaquettes), broyage du matériau (outil à boutons).
- des biais introduits par les conditions de forage non imposées dans ce travail. Il s'agissait de rester en conditions de chantier afin de pouvoir espérer appliquer la méthodologie à des cas réels (intervention de plusieurs machines, réponse diagraphique influencée par le type d'outil et le mode de pilotage).

2. le choix d'une lithologie de départ. Il faut bien comprendre qu'à partir des modes d'investigation utilisés (forages destructifs), la lithologie exacte du milieu est inconnue et peut être appréciée selon différentes échelles d'observation : à l'échelle du site, du forage et pour un découpage plus ou moins fin dépendant de la précision recherchée. Est-il utile de distinguer chaque lit sableux dans une argile à passées sableuses ou doit-

on considérer la formation dans son ensemble? La réponse est : cela dépend du problème posé.

De plus, pour une même échelle d'observation, le découpage sera variable selon les acteurs et selon les critères de découpage.

Il faudra également rendre possible le couplage « contre nature » des techniques statistiques et probabilistes et des règles de calcul géotechniques des DTU. Etablies à partir d'abaques et de tableaux issus de l'expérience, les méthodes préconisées dans les documents de référence ne sont pas conçues a priori pour traiter des profils continus.

Chapitre I -

Corrélations entre paramètres diagraphiques et pressiométriques : à quelle échelle travailler ?

1. Les outils statistiques utilisés

1.1. L'analyse en composantes principales

Dans le but d'observer p variables (paramètres pressiométriques et paramètres de forage) sur n individus et d'obtenir un descriptif des liaisons entre individus et entre variables, nous avons choisi, dans le cadre de notre étude, d'appliquer l'analyse en composantes principales (ACP) pour chercher à regrouper les variables ou les individus en sous nuages de points et apprécier les corrélations entre les variables.

Le but est d'obtenir une représentation spatiale continue des individus ou des variables pour chercher à les regrouper.

En pratique, les données sont présentées sous forme d'un tableau de valeurs, soit i l'ensemble des n individus et j l'ensemble des p variables, le tableau rectangulaire D comprend n lignes et p colonnes, il est de la forme :

$$\begin{array}{c} 1 \dots j \dots p \\ 1 \left[\begin{array}{ccc} & \cdot & \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ i & \dots & x_{ij} \\ \cdot & & \\ \cdot & & \\ n \end{array} \right] \end{array}$$

Pour notre application, les n individus, ont tous la même importance, ils ont un poids identique ($1/n$), la somme des poids étant égale à 1.

Les données sont centrées, ce qui revient à se positionner au centre de gravité du nuage de points (G), puis réduites, soit une normalisation des données qui permet de s'affranchir des

unités des différentes variables. Le terme courant de la matrice des données centrées réduites (matrice DCR) est de la forme :

$$\frac{(x_{ij} - \overline{x_j})}{\sigma_j}$$

avec : x_{ij} : terme courant du tableau de données

$\overline{x_j}$: moyenne de la variable - colonne j

σ_j : écart-type de la variable - colonne j

L'étape suivante consiste à calculer la matrice des corrélations (matrice R), c'est une matrice carrée à p lignes et p colonnes, elle est obtenue en faisant le produit de la matrice des données centrées réduites et de sa transposée. L'ensemble est divisé par 1/N.

Soit $R = (1/N) DCR^T \cdot DCR$

- Représentation des individus

La méthode permet d'obtenir, par projection, une représentation approchée du nuage des individus dans un sous-espace. L'espace de projection est choisi de telle sorte qu'il déforme le moins possible les distances entre les points. En conséquence, le sous espace recherché est tel que la moyenne des carrés des distances entre projections est la plus grande possible.

L'espace de projection solution est obtenu par rotation du système d'axes (GX1...Xp) qui conduit à un nouveau système d'axes (GF1...Fp) tel que la variance absorbée par l'axe F1 est supérieure à celle absorbée par l'axe F2, l'axe F2 est orthogonal à l'axe F1. La diagonalisation de la matrice des corrélations conduit à la détermination des vecteurs propres (u) (vecteurs unitaires des axes factoriels) et des valeurs propres (λ) permettant de calculer les coordonnées des individus dans les différents plans factoriels et les coordonnées des variables dans le cercle des corrélations.

Pour résumer, l'ACP revient à remplacer les variables $x_1, \dots, x_j, \dots, x_p$ qui sont corrélées, par de nouvelles variables, les composantes principales, combinaisons linéaires des x_j , non corrélés entre elles de variance maximale et les plus liées en un certain sens aux variables x_j de départ [Saporta 90].

Les coordonnées des individus sur les axes factoriels correspondent au produit de la matrice des données centrées réduites par la matrice des vecteurs propres.

- Représentation des variables

L'ACP étant réalisée sur des données centrées réduites, le cercle des corrélations est la projection de l'ensemble des variables centrées réduites sur le sous espace engendré par les composantes principales. Les variables sont sur la surface d'une sphère unité.

Les coordonnées des variables dans le cercle des corrélations sont obtenues en multipliant les vecteurs propres par la racine carrée des valeurs propres.

L'interprétation des proximités entre deux variables sera possible pour des points "variable" proches de la circonférence du cercle.

1.2. Liaison entre deux variables - Régression linéaire et corrélation

La recherche de corrélations permet de déceler l'existence d'une liaison entre deux grandeurs X et Y. Dans notre cas d'étude, une variable pressiométrique à expliquer (variable Y : pression de fluage nette ou module pressiométrique) et un paramètre de forage ou combinaison de paramètres, variable explicative X.

Cette recherche de corrélation entre grandeurs pressiométriques et paramètres de forage est légitime. En effet, même si les mécanismes mis en jeu sont très différents, les paramètres pressiométriques témoignent du comportement mécanique des matériaux testés et les paramètres de forage traduisent la réponse du sol vis-à-vis du processus de forage et donc sa capacité à résister à l'action de l'outil. Ainsi, de façon simpliste on peut dire que plus le matériau est résistant à la foration, plus ses caractéristiques pressiométriques sont élevées.

En pratique, les relations entre variables pressiométriques et paramètres de forage sont partiellement masquées notamment par les bruits de mesures liés à l'acquisition des données et les différences de processus mis en jeu dans la caractérisation mécanique du milieu. Les deux modes d'investigation n'excitent pas la même physique des matériaux (pseudo-élasticité et plasticité pour l'essai pressiométrique, déchiquetage, broyage des matériaux en forage destructif).

De plus, compte tenu de la taille des dispositifs de mesure, les volumes de sol mis en jeu ne sont pas identiques : la taille de la cellule centrale de mesure de la sonde pressiométrique est de 0.20m, l'acquisition des paramètres de forage est effectuée tous les centimètres, soit autant de facteurs qui affectent la qualité et la lisibilité des relations statistiques existantes.

En pratique, nous recherchons l'existence d'une régression linéaire entre les variables X et Y, suivant le modèle de l'équation 15.

$$Y = AX + B + \varepsilon(X) \qquad \text{équation 15}$$

B représente l'ordonnée à l'origine de la droite de régression, A, le coefficient de régression de Y en X. $\varepsilon(X)$ est une variable aléatoire de moyenne nulle, sa distribution est supposée normale. En effet, nous poserons comme hypothèse que les facteurs affectant la qualité de la régression sont additifs et indépendants.

$y' = ax' + b$ est une estimation de la droite réelle inconnue.

a et b étant les estimateurs des paramètres A et B recherchés. b est estimé en minimisant la somme des carrés des écarts entre les valeurs expérimentales y_i et les ordonnées y'_i correspondantes pour la droite estimée (Figure 10).

La droite de régression étant estimée par la méthode des moindres carrés, l'estimateur b (ordonnée à l'origine) satisfait l'équation 16 et a (pente de la droite) l'équation 17.

$$b = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - [\sum x_i]^2} \quad \text{équation 16}$$

N étant le nombre de couples (x_i, y_i)

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad \text{équation 17}$$

La droite de régression estimée passe par le centre de gravité du nuage de points formé par les couples de valeurs (x_i, y_i) , avec :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \text{ moyenne arithmétique des } N \text{ valeurs de } y_i \text{ et}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \text{ moyenne arithmétique des } N \text{ valeurs de } x_i.$$

Le coefficient de corrélation ρ caractérise la liaison entre les variables X et Y,

$$\rho = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

avec $Cov(X, Y)$, covariance entre les variables X et Y.

$$Cov(X, Y) = E[(X - m_x)(Y - m_y)]$$

m_x et m_y étant, respectivement, les espérances des variables X et Y, σ_x et σ_y leurs écarts types respectifs.

Le coefficient de corrélation est nul ($\rho = 0$) si les variables X et Y sont indépendantes, mais attention la réciproque est fautive et le coefficient de corrélation peut être nul, même s'il existe une relation fonctionnelle entre les variables d'étude.

Le coefficient de corrélation ($\rho = -1$ ou $+1$), si Y est une fonction linéaire de X avec $Y = AX+B$, la réciproque est vraie.

Le coefficient de corrélation ρ sera estimé par r suivant l' équation 18

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{équation 18}$$

ou encore
$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

En pratique, pour les échantillons de moins de 50 individus, l'indépendance des variables X et Y se vérifiera en calculant la quantité u (équation 19)

$$u = z\sqrt{N-3} \quad \text{avec} \quad z = \frac{1}{2}[\ln(1+r) - \ln(1-r)] \quad \text{équation 19}$$

Lorsque les variables X et Y sont indépendantes, u suit une loi normale réduite, on admettra donc que les variables X et Y ne sont pas indépendantes, au niveau de confiance $(1-\alpha)$, si la valeur absolue de u est supérieure à la limite $u_{1-\alpha/2}$ donnée par la table de la loi normale. Autrement dit, il faut admettre l'existence d'une liaison entre X et Y, au niveau de probabilité $(1-\alpha)$, si $|u| > u_{1-\alpha/2}$ [Masson *ed.* 78].

Pour les valeurs individuelles il est possible de calculer une zone de tolérance ou de prédiction (notée Interv. Proba. (IP) sur l'exemple présenté Figure 12), il s'agit des limites de confiance des observations individuelles encore appelée limites de prédiction [Dagnelie. 98]. Pour les données issues de matériaux sableux du chantier de Moscou, pour une valeur obtenue de $\ln(VA/Po)$ de 3.2, il faut s'attendre à une valeur de $\ln(pf^*)$ comprise entre - 1.49 et - 0.11, soit une valeur de pf^* comprise entre 0.22 et 0.89 MPa.

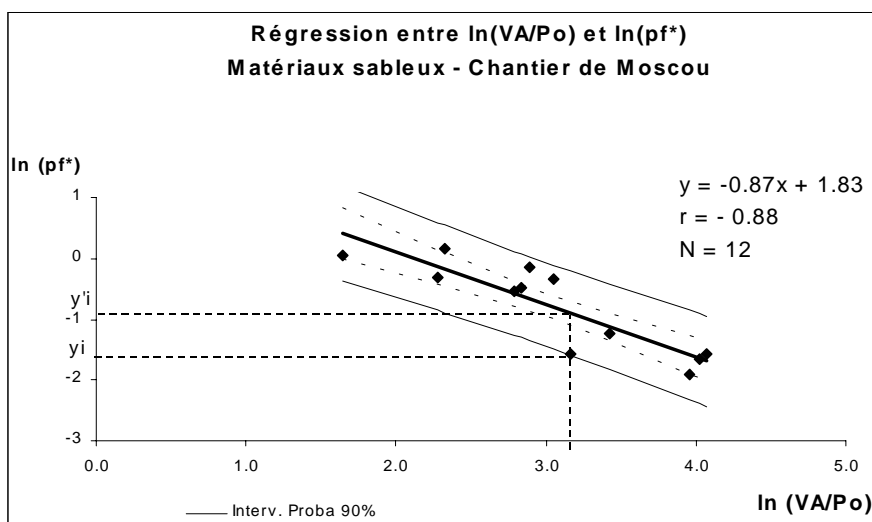


Figure 10 : Exemple de relation obtenue entre le logarithme népérien de la pression de fluage ($\ln(pf^*)$) et celui de la combinaison de paramètre vitesse d'avance sur pression sur outil ($\ln(VA/Po)$) pour les matériaux dits "sableux" du chantier de la Bourse de Moscou.

2. Application aux variables diagraphiques et pressiométriques

2.1. Méthode

La question posée est de savoir quelles sont les relations que l'on peut attendre entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage. Pour répondre à cette inconnue, nous tester la manière de traiter les données, dans leur globalité, suivant la lithologie, selon les conditions d'acquisition, ou bien par site....

Dans le cadre de notre travail, nous avons eu la possibilité de traiter plusieurs chantiers regroupant paramètres pressiométriques et paramètres diagraphiques, pour lesquels nous avons pu établir, sous certaines conditions, quelques relations fonctionnelles significatives. Cependant, les nuages de points considérés mettent, bien souvent, en évidence la piètre qualité des relations.

Les données dont nous disposons et à partir desquelles nous avons travaillé proviennent :

- du chantier A, site expérimental de l'IUT de Bordeaux I, qui sera traité en détail au chapitre 3. A ce stade de l'étude, 5 forages ont été considérés (SP1, SP2, SP5, SP7jBPV et SP8).
- du chantier B, site de la bourse de Moscou (1^{ère} partie). A ce niveau les forages SP2, SP4, SP5 et SP7 ont été pris en compte.
- du chantier C, reconnaissance menée en Belgique sur le tracé du TGV, portion Walhorn - Welkenraedt. La banque de données prend en compte les forages (9242,

9250 à 9253, 9304, 9324, 9342, 9342, 9352, 9360, 9364, 9380, 9382, 9388 et 9390).
(annexe 16).

La recherche de relations entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage est réalisée dans le but d'estimer des valeurs pressiométriques à partir du signal diagraphique explicatif du paramètre pressiométrique d'intérêt. Afin de ne pas simuler de valeurs négatives du paramètre pressiométrique, ce qui n'aurait pas de sens physique, nous nous attacherons à l'établissement de relations entre les logarithmes népériens des différents paramètres.

Les travaux déjà menés sur le sujet et des corrélations établies dans le cadre de divers chantiers (partie I - chapitre II - § 2.5) montrent que les relations liant paramètres pressiométriques et diagraphiques sont fonction de la nature des matériaux.

Les différents nuages de points obtenus à partir de données issues du chantier de Moscou confirment cet énoncé. Ils montrent qu'il y a, selon la nature des matériaux considérés, variation des paramètres de la droite de régression (pente de la droite et ordonnée à l'origine).

Pour l'ensemble des forages retenus dans cette étude, nous obtenons :

- dans les matériaux argileux

$$\ln(pf^*) = - 0.53 \ln(VA/Po) + 1.29 \quad r = - 0.64 \quad N = 30$$

- dans les matériaux sableux

$$\ln(pf^*) = - 0.89 \ln(VA/Po) + 1.93 \quad r = - 0.88 \quad N = 12$$

Dans les deux cas, les relations établies peuvent être considérées comme significatives pour un niveau de confiance de 0.99.

En revanche, dans les matériaux calcaires, compte tenu du petit nombre de points et de leur dispersion, aucune relation ne peut être considérée entre $\ln(VA/Po)$ et $\ln(pf^*)$ (Figure 11).

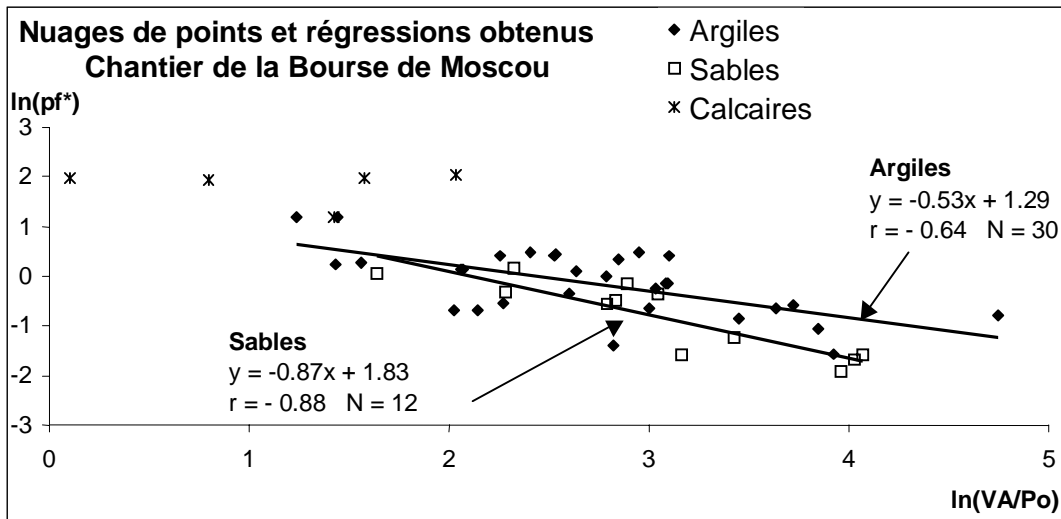


Figure 11: Nuages de points obtenus pour le chantier de la Bourse de Moscou, dans les sables, les argiles et dans les calcaires.

Sur le tracé du TGV belge, au sein des matériaux argileux, nous avons pu mettre en relation $\ln(pf^*)$ et $\ln(CR/Po)$ (Figure 12). Notons que la relation établie est très bruitée et que les écarts entre les mesures et le modèle sont importants.

Toutefois, compte tenu du nombre de points relativement importants ($N = 58$), la relation peut être admise pour un niveau de confiance de 0.99.

A la différence du chantier de Moscou, pour lequel le paramètre de forage explicatif correspondait au logarithme népérien de la vitesse relative, sur le tracé du TGV belge, c'est le logarithme népérien du couple unitaire qui est le meilleur paramètre explicatif de $\ln(pf^*)$.

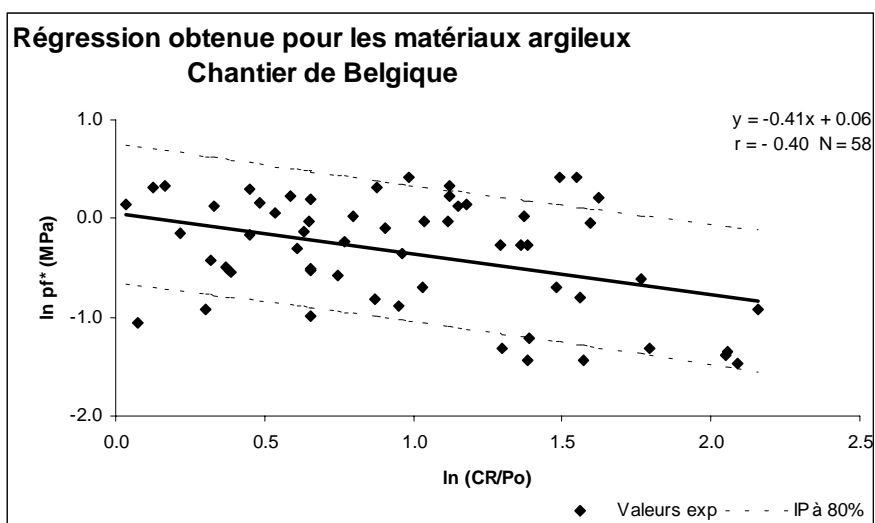


Figure 12 : Equation de régression obtenue sur le chantier du TGV belge au sein des matériaux argileux.

Selon la nature des matériaux, il y a modification des équations de régression et / ou modification du paramètre explicatif. Le paramètre de forage ou combinaison de paramètres à mettre en relation avec les caractéristiques pressiométriques n'est pas nécessairement identique d'une nature lithologique à l'autre ou même d'un site à l'autre.

Au vu des deux résultats précédents, mettant en évidence, pour une "même" nature de matériaux, les variations de paramètres de forage explicatifs selon le site étudié, l'idée de constituer une base de données permettant d'établir des équations de régression "universelles" régissant les relations entre paramètres de forage et paramètres pressiométriques, dans les remblais, les sables, les argiles, les matériaux rocheux sains et matériaux rocheux altérés ne semble pas réaliste ou du moins, sans l'utilisation de paramètres combinés complexes qui permettraient de gommer les variations liées aux conditions de forage, ce qui, en conditions de chantier n'est pas aujourd'hui réaliste dans le cadre d'un projet de reconnaissance de taille usuelle.

La constitution d'une base de données et l'établissement d'une relation pour les matériaux argileux des chantiers A, B et C se révélera particulièrement délicate compte tenu des biais introduits par les variations de conditions d'exécution des forages et des différences nature de matériaux que nous avons tout de même regroupés sous une même classe : "matériaux argileux".

2.2. Des corrélations universelles par classe de matériaux ?

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur les données recueillies au sein des matériaux dits "argileux" recensés pour trois chantiers exécutés par la société Alios Ingénierie dans des conditions de forage différentes.

Considérons les chantiers A (27 individus), B (23 individus) et C (58 individus), pour lesquels nous conservons les paramètres communs aux trois sites. L'analyse porte sur 6 variables, la vitesse d'avance **VA**, la pression d'injection **Pi**, la pression sur outil **Po**, la pression de rotation **CR**, la pression de fluage **pf*** et le module pressiométrique **E**. La pression limite (p_l^*) n'a pas été retenue car dans la majeure partie des cas, les essais n'ont pas été menés à terme et la pression limite non atteinte est estimée à partir de la pression de fluage.

Les individus ont été définis comme appartenant à la classe des matériaux argileux à partir des coupes lithologiques réalisées par les sondeurs.

Nous obtenons selon le plan factoriel F1 /F2 une ségrégation des trois chantiers (Figure 13).

L'axe F1, explicatif à 54 %, est essentiellement gouverné par la pression sur l'outil, la vitesse d'avance, le couple de rotation et le module pressiométrique. Compte tenu des valeurs moyennes calculées pour les différents paramètres pour chaque chantier, le chantier B (Bourse de Moscou) s'individualise sur les valeurs fortes de l'axe F1. A l'inverse, le chantier C (TGV belge) se positionne sur les valeurs plus faibles. L'axe F2, absorbant 20% de la variance, représente essentiellement la pression de fluage nette. L'individualisation des chantiers suivant F2 est moins visible.

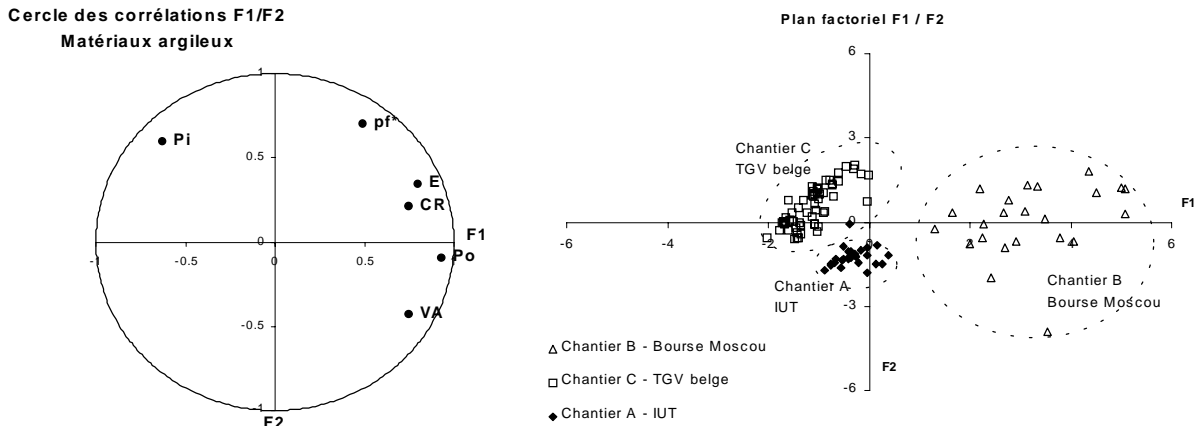


Figure 13 : Cercle de corrélation et espace des individus pour le plan factoriel F1/F2 pour une base de données considérant 3 chantiers A, B et C menés dans des conditions de forage différentes.

Il est important de relever les valeurs moyennes obtenues au sein des matériaux dits "argileux" pour chacun des trois chantiers considérés (Tableau 4). Chaque chantier a été conduit dans des conditions de forage spécifiques et recense des plages de valeurs diagrammiques et pressiométriques différentes.

IUT N = 27	VA	Pi	Po	CR	pf*	E	Chantier A
moyenne	54.03	0.45	2.23	1.53	0.65	10.88	
écart_type	28.75	0.44	1.44	0.40	0.17	7.40	
min	22.98	0.00	0.70	0.83	0.38	3.30	
max	144.55	1.35	4.70	2.35	1.23	39.10	
CV %	53%	99%	65%	26%	27%	68%	

Moscou N = 23	VA	Pi	Po	CR	pf*	E	Chantier B
moyenne	107.31	0.56	8.15	5.98	1.15	67.16	
écart_type	65.79	0.40	1.23	1.22	0.30	48.34	
min	30.38	0.08	7.21	3.64	0.30	2.80	
max	333.03	1.46	11.64	9.66	1.73	171.00	
CV %	61%	71%	15%	20%	26%	72%	

Belgique N = 58	VA	Pi	Po	CR	pf*	E	Chantier C
moyenne	17.65	6.42	0.94	2.74	0.81	12.69	
écart_type	11.85	1.03	0.28	1.50	0.39	6.55	
min	6.36	4.47	0.44	0.81	0.23	1.90	
max	70.36	9.53	1.50	9.10	1.52	30.30	
CV %	67%	16%	30%	55%	48%	52%	

Tableau 4 : Principales valeurs statistiques relatives aux chantiers A, B et C

Pour les paramètres de forage :

- La gamme des vitesses d'avance moyennes enregistrées au sein des matériaux argileux varie d'un facteur 6 entre le chantier A et les chantiers B et C.

Suivant un ordre croissant des vitesses d'avance moyennes, nous avons la configuration suivante :

chantier C (18 m/h) < chantier A (54 m/h) < chantier B (107 m/h)

- Les pressions d'injection acquises sur les chantiers B et A sont du même ordre de grandeur, (0.5 MPa), alors que celles enregistrées sur le chantier C sont 12 fois plus importantes (6 MPa).

Les pressions sur outil moyennes enregistrées passent de 1 à 8 MPa selon le chantier considéré.

Chantier C (1 MPa) < chantier A (2 MPa) < chantier B (8 MPa)

Remarquons que la hiérarchie décrite précédemment pour les vitesses d'avance est ici respectée. Et logiquement au sein des argiles, plus la pression sur outil est importante plus la vitesse d'avance est élevée. Notons toutefois, qu'à partir des valeurs moyennes la relation entre les deux facteurs n'est pas linéaire et suit, pour les trois points considérés une relation de forme exponentielle (Figure 14).

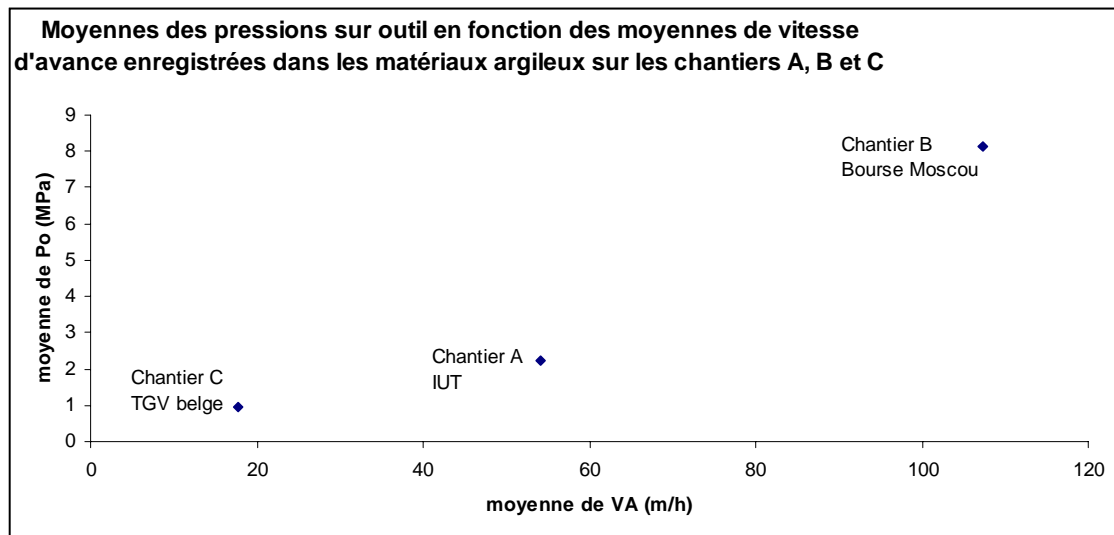


Figure 14: Moyennes de pressions sur outil et moyennes des vitesses d'avance pour les 3 chantiers (IUT, Moscou, TGV belge)

- Le couple de rotation enregistré appartient à une gamme de valeurs comprises entre 2 et 6 MPa.

Chantier A (2 MPa) < chantier C (3 MPa) < chantier B (6 MPa)

En ce qui concerne les paramètres pressiométriques.

- Les pressions de fluage déterminées au sein des matériaux argileux sont du même ordre de grandeur pour les trois chantiers. Pour les chantiers A et C, pf^* est comprise entre 0.6 et 0.8 MPa. Pour le chantier B, pf^* est peu différente de 1 MPa. Les coefficients de variation sont de l'ordre de 26% et 27% pour les chantiers A et B, proche de 50% pour le chantier C.
- Le module pressiométrique est beaucoup plus variable, comme en témoignent les coefficients de variation compris entre 52% et 72 %. E est de l'ordre de 13 MPa pour les chantiers A et C, de 68 MPa en moyenne sur le chantier C.

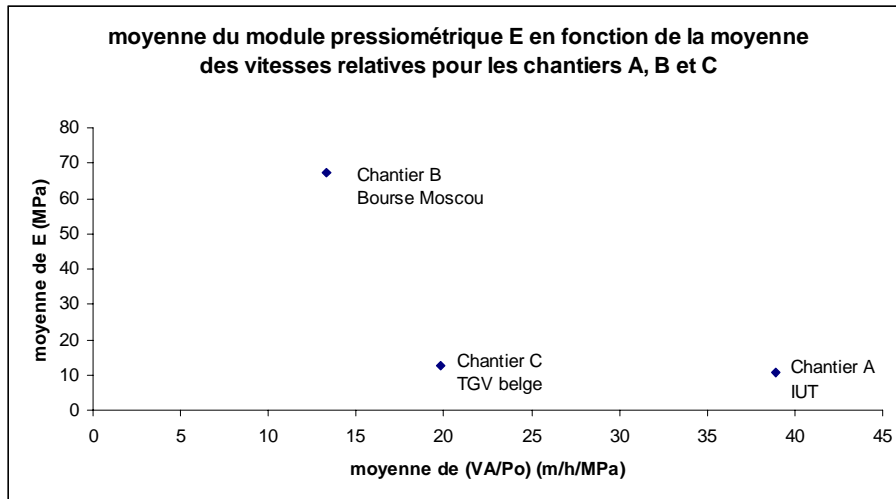


Figure 15 : Dispersion des moyennes de module pressiométrique en fonction des moyennes de vitesse d'avance relative pour les 3 chantiers (IUT, Moscou, TGV belge)

Même si les matériaux traversés lors des trois campagnes de sondages appartiennent à la classe des argiles d'un point de vue descriptif lithologique, ceux-ci sont très différents au regard de leurs conditions de mise en place, des contraintes tectoniques qu'ils ont subies au cours du temps. De plus, la composition minéralogique de ces argiles nous est inconnue, mais elle est très vraisemblablement différente d'un site à l'autre. En Belgique, les matériaux sont des argiles et limons noirs, issus de l'altération des schistes sous jacents, sur le site de l'IUT, les matériaux argilo-limoneux de couverture proviennent des dépôts fluviatiles du Quaternaire, des matériaux argileux sont également relevés en tête du substratum carbonaté et au sein de celui-ci sous forme de bancs ou de lentilles, il s'agit alors de matériaux issus de l'altération des calcaires.

Les argiles reconnues sur ces trois sites prennent les mêmes plages de valeurs d'un point de vue des p_r^* et au regard de ce critère elles sont "identiques". En revanche les caractéristiques de leur comportement dans le domaine pseudo-élastique ne sont pas similaires, l'argile échantillonnée pour le chantier B étant significativement plus raide.

D'un point de vue des paramètres de forage, les trois "argiles" n'offrent pas la même réponse vis à vis des processus de forage. Les différences sont explicables par les caractéristiques pressiométriques des matériaux, dans le sens où ils présentent des p_r^* du même ordre de grandeur et qu'à la moyenne des E la plus élevée correspond la moyenne des vitesses d'avance relatives la plus basse, ce qui est tout à fait cohérent (Figure 15).

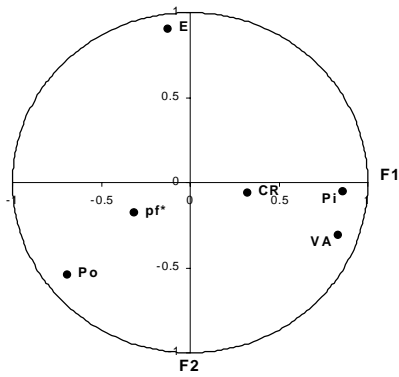
Cependant, les gammes de valeurs sont très étendues et le plan factoriel établi pour les trois sites (Figure 13) montre avant tout l'influence possible de la non uniformité des conditions de forage.

Cette approche globale des données (multisite) montre que l'utilisation de corrélations universelles entre paramètres de forage et paramètre pressiométriques n'est pas envisageable, du moins sans l'utilisation combinée des paramètres de forage, ce qui ne peut être réalisé dans le cadre d'une reconnaissance de taille usuelle.

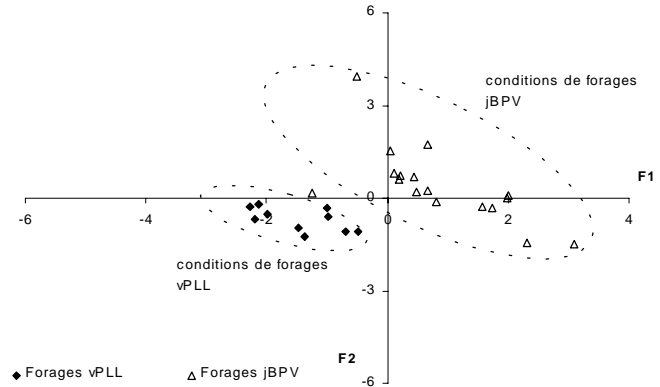
2.3. Des corrélations par site ?

Si l'on considère individuellement les trois sites, nous obtenons :

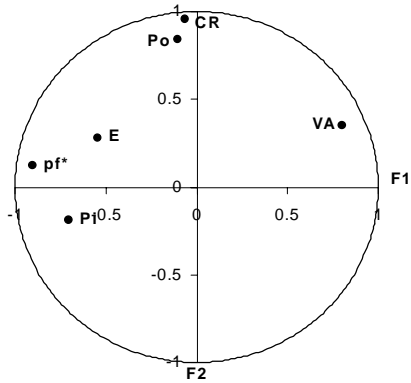
Cercle des corrélations F1/F2
Matériaux argileux - chantier A



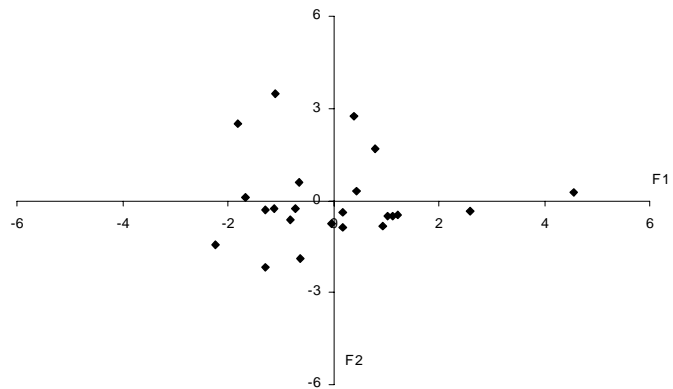
Plan factoriel F1 / F2



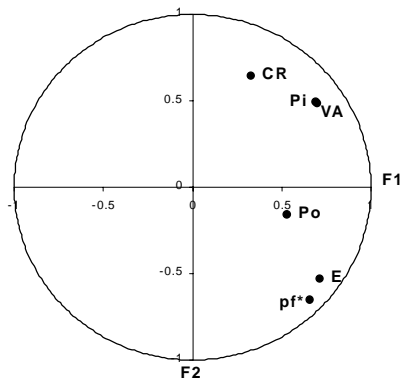
Cercle des corrélations F1/F2
Matériaux argileux - Chantier B



Plan factoriel F1 / F2



Cercle des corrélations F1/F2
Matériaux argileux - Chantier C



Plan factoriel F1 / F2

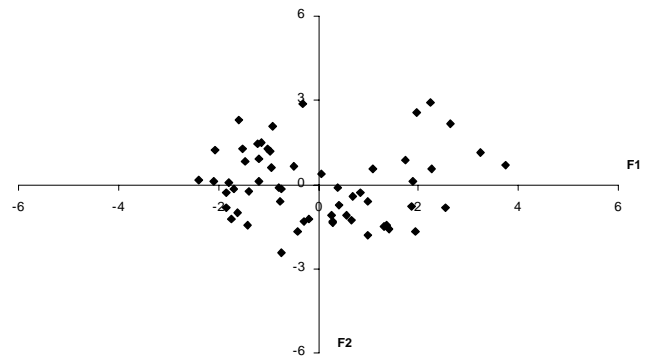


Figure 16 : Cercles de corrélation et plans factoriels F1/F2 obtenus pour chacun des sites A, B et C au sein des matériaux argileux

La comparaison des trois cercles de corrélation montre que la répartition des variables d'étude suivant les axes F1 et F2 diffère d'un chantier à l'autre. Les groupes de variables pressiométriques et diagraphiques s'agencent différemment d'un chantier à l'autre. Toutefois, dans tous les cas, nous observons l'opposition entre VA et p_f^* et pour deux sites sur trois l'opposition entre VA et E.

Pour le site de la bourse de Moscou (chantier B), couple de rotation et pression sur outil sont bien corrélés et évoluent dans le même sens, alors que VA et Pi ont un comportement antagoniste. Plus la vitesse d'avance est importante, moins la pression d'injection est élevée. Ces règles de comportement observées pour le site de Moscou ne sont pas vraies pour le chantier de l'IUT et celui de Belgique où VA et Pi évoluent dans le même sens.

Relevons en outre, pour les matériaux argileux du site de l'IUT et les sondages considérés dans cette phase, la mauvaise corrélation entre p_f^* et E ($\rho = 0.031$), contrairement à ce qui est attendu et ce que nous observons pour les deux autres sites (coefficient de corrélation entre p_f^* et E pour les chantiers B et C = 0.61 et 0.75). Ce qui révèle une certaine incohérence des données.

Il est donc difficile d'établir des règles générales concernant les relations entre variables. Il semble préférable de travailler à l'échelle d'un chantier spécifique. De plus, pour le site de l'IUT, où les données ont été acquises via plusieurs conditions de forage différentes, la séparation des nuages de points dans le plan factoriel F1/F2 selon les conditions d'acquisition montre que les relations doivent être établies séparément pour chaque groupe d'individus.

La troisième partie, qui reviendra sur l'étude détaillée du site de l'IUT permettra d'établir et d'utiliser les différentes relations obtenues pour ce site.

2.4. Corrélations et régressions par site

La recherche de relations fonctionnelles entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage pour les matériaux argileux du site C (TGV belge) s'est révélée décevante. Les nuages de points établis entre la pression de fluage nette et les différents paramètres de forage acquis sur le site montrent une importante dispersion des valeurs. (Figure 17).

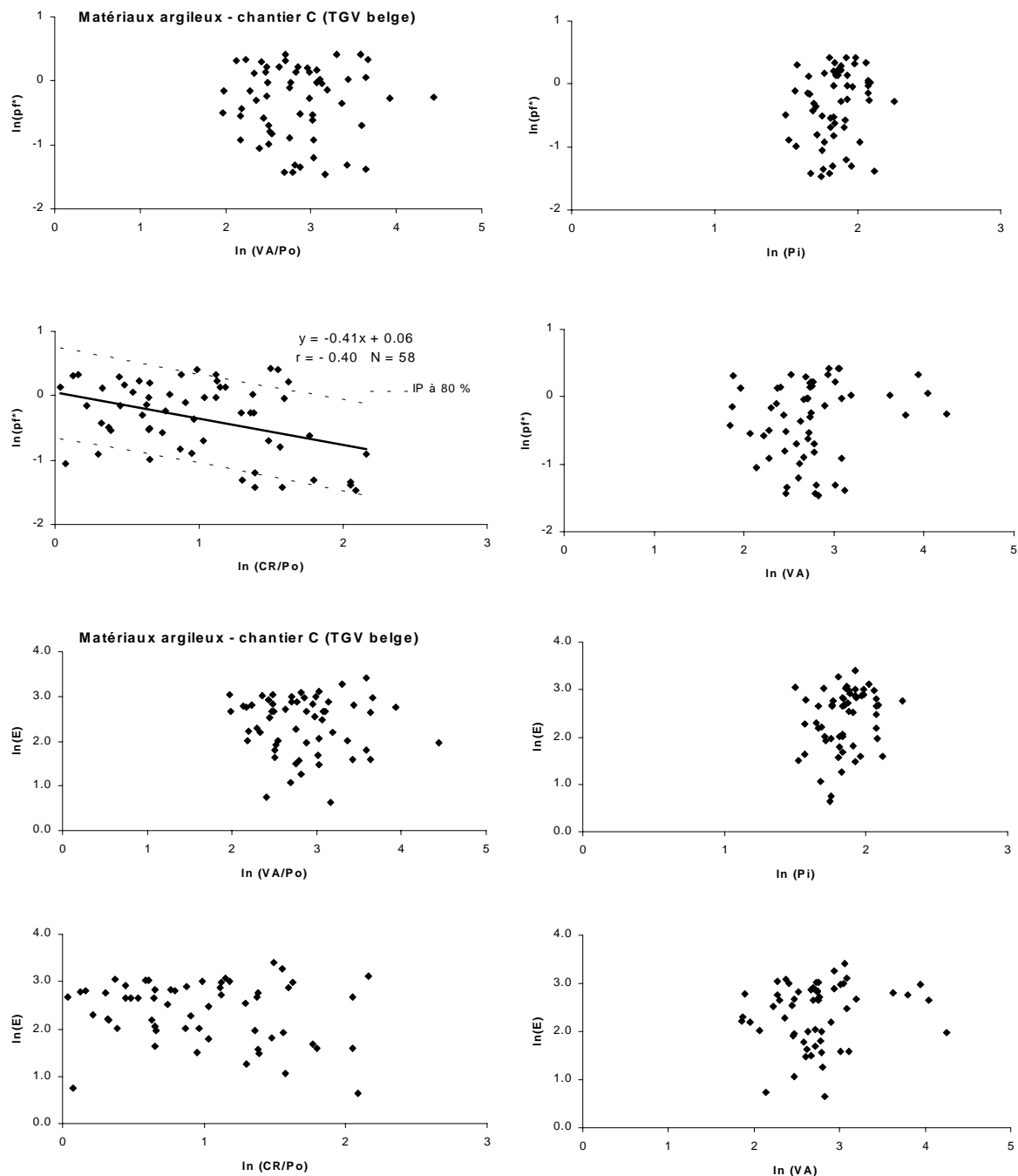


Figure 17 : Nuages de points obtenus entre la pression de fluage nette (respectivement le module pressiométrique) et les paramètres de forage acquis au sein des matériaux argileux sur le chantier du TGV belge (chantier C).

Pour le site de la bourse de Moscou (chantier B), à chaque essai pressiométrique est associée la moyenne arithmétique des mesures diagraphiques sur un intervalle de 0.40 m, soit 0.20 m de part et d'autre de la cote de l'essai pressiométrique considéré.

Nous obtenons :

- au sein des matériaux argileux, de meilleurs résultats que le chantier C (TGV Belge), les logarithmes népériens des pressions de fluage et du module pressiométrique sont

expliqués par les logarithmes népériens de la vitesse d'avance pondérée par la pression sur outil. Les coefficients de corrélation sont de l'ordre de - 0.65 pour 30 individus (Figure 18).

Nous retiendrons les relations suivantes :

$$\ln(pf^*) = - 0.53 \ln(VA/Po) + 1.29 \quad r = - 0.64 \quad N = 30$$

$$\ln(E) = - 0.85 \ln(VA/Po) + 4.30 \quad r = - 0.65 \quad N = 30$$

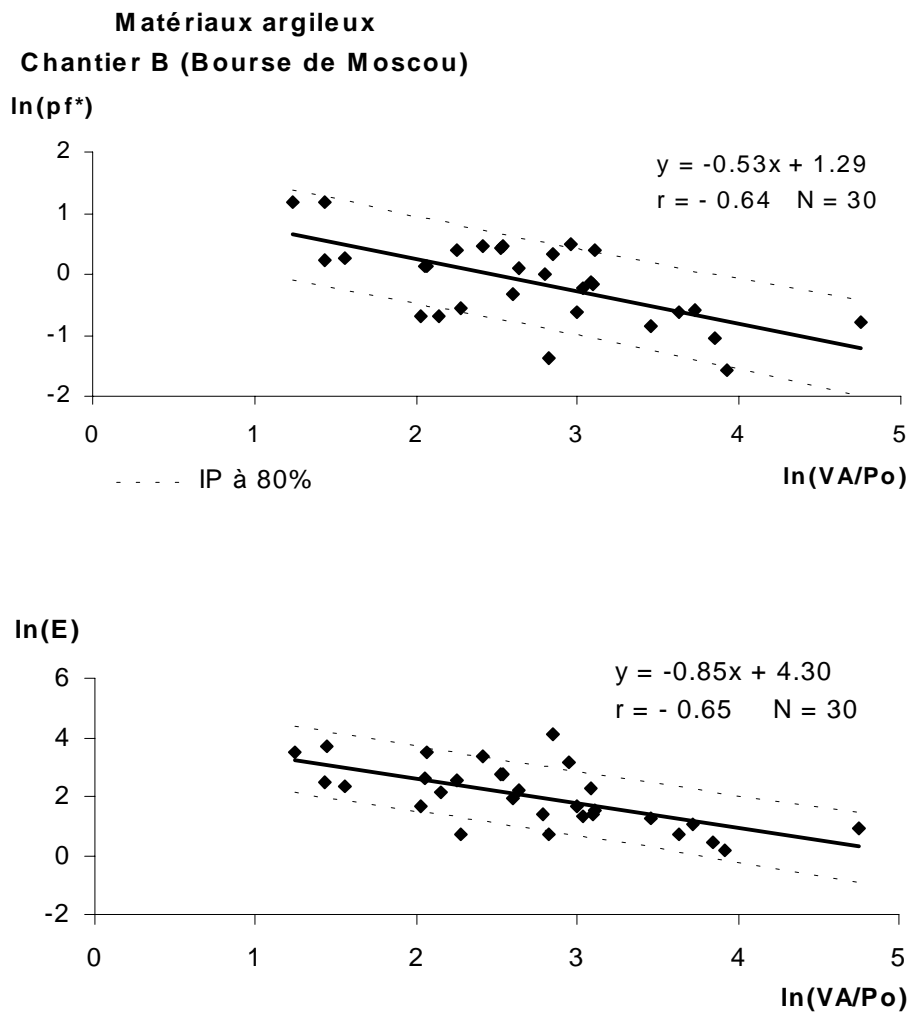


Figure 18 : Chantier B (Bourse de Moscou) Nuages de points et régressions obtenues au sein des matériaux argileux

- au sein des matériaux sableux (chantier B, Bourse de Moscou), la relation entre le logarithme népérien de la vitesse d'avance pondérée par la pression sur outil ($\ln(VA/Po)$) et le logarithme népérien de la pression de fluage nette ($\ln(p_f^*)$) est établi à partir de 12 couples de valeurs. (Figure 19).

Nous obtenons l'équation de régression suivante :

$$\ln(pf^*) = - 0.87 \ln(VA/Po) + 1.83 \quad \text{avec un coefficient de corrélation} \quad r = -0.88$$

Les relations obtenues sont tout à fait cohérentes. Plus le rapport VA/Po est élevé, en raison d'une vitesse d'avance VA importante ou d'une moindre pression sur outil plus la résistance du matériau au processus de foration est faible. Les caractéristiques mécaniques du matériau étant peu élevées, la pression de fluage est faible.

Compte tenu du nombre d'individus considérés et du coefficient de corrélation obtenu, le calcul de u (équation 5), aboutit à $u = - 4.127$. La valeur absolue de u est supérieure à la limite $u_{0.995} = 2.58$, il faut donc admettre l'existence d'une relation entre $\ln(VA/Po)$ et $\ln(pf^*)$, au niveau de probabilité 0.99 au sein des matériaux sableux reconnus pour ce site de Moscou.

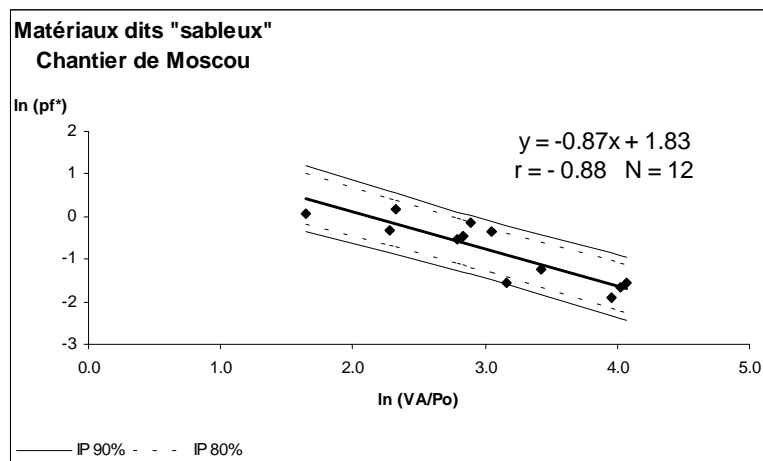


Figure 19 : Régression entre le logarithme népérien de la vitesse d'avance (VA) pondérée par la pression sur outil (Po) et le logarithme népérien de la pression de fluage nette (pf*)

L'utilisation des logarithmes des variables d'étude est dictée par la suite de la démarche, en effet, cet artifice évitera la génération ultérieure de valeurs pressiométriques négatives incompatibles avec la réalité des mesures in situ.

Notons que le test de Shapiro-Wilk mis en œuvre pour les échantillons de petite taille ($n \leq 50$) et réalisé sur les résidus obtenus dans les matériaux sableux, ne permet pas de rejeter l'hypothèse de normalité de ces résidus pour un niveau de probabilité de 98%. [Masson *ed.* 78].

L'établissement des corrélations entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage s'est donc révélé ardu et ce en raison des bruits de mesures importants, tant sur les valeurs pressiométriques que sur les données diagraphiques. Nous n'avons pas, à partir des données traitées, réussi à établir de corrélations universelles entre information pressiométrique et information diagraphique. Les relations fonctionnelles potentielles dépendent du site, des conditions de forage et de la lithologie. Elles doivent donc être établies en traitant distinctement les données selon ces trois ensembles distincts. La recherche de relations significatives entre paramètres pressiométrique et diagraphique doit être réalisée au cas par cas. En pratique, nous proposons, pour un site et des conditions de forage donnés, de scinder les données en plusieurs ensembles selon la coupe lithologique établie par le sondeur.

Chapitre II -

Etablissement d'une lithologie plausible

1. Objectifs et principe algorithmique

Notre objectif est d'estimer un intervalle de valeurs pressiométriques à partir de log diagraphiques en utilisant les corrélations établies pour des conditions de forage spécifiques et une lithologie donnée.

Le long d'un forage, la succession de formations de natures différentes fait que les relations fonctionnelles à mettre en jeu sont variables suivant la profondeur.

En pratique, plusieurs possibilités sont offertes au géotechnicien. Il peut considérer :

- **la coupe lithologique établie par le sondeur**. Celle-ci est réalisée à partir de l'examen visuel des « cuttings », qui remontent avec le fluide de forage, et de son expérience. Les variations de comportement de la machine de forage sont interprétées par le sondeur comme "des changements de sols". La coupe intègre donc une large part de subjectivité et dépend fortement de la qualification et de l'expérience du sondeur. Cette coupe est bien souvent modifiée ou du moins complétée par le géotechnicien, qui en fonction de ses connaissances du site ajuste la terminologie employée par le sondeur. C'est pour cette raison qu'un sondage carotté ou au minimum un sondage à la tarière mené à proximité d'un sondage destructif, se révèle nécessaire à l'établissement d'une coupe lithologique sérieuse. Malheureusement, les sondages carottés restent peu courants dans le cadre des reconnaissances les plus usuelles, en raison de leur coût et de leur difficulté de réalisation dans les terrains meubles ou peu cohérents.
- **la coupe établie par le géotechnicien** à partir de multiples critères, et notamment : sa connaissance du site, le résultat des essais pressiométriques, l'examen visuel des log diagraphiques, les résultats des essais de laboratoire. Cependant, les informations peuvent parfois paraître contradictoires et les volumes variables de sol concernés ne facilitent pas la synthèse des résultats.
- Pour notre démarche (Figure 9), notre choix s'est porté sur la détermination **d'une coupe lithologique probable issue d'une lithologie initiale postulée a priori puis enrichie par l'information diagraphique**. Cette étape vise à déterminer, pour chaque profondeur z , la lithologie la plus probable et ce en accord avec les enregistrements de paramètres de forage. Le résultat se présente sous la forme d'un log. de probabilités conditionnelles.

Il sera utilisé ultérieurement dans la génération des paramètres pressiométriques pour pondérer l'influence des différentes équations de régression tout au long du forage.

Le processus algorithmique présenté ci-après a pour objectif de faire évoluer la coupe lithologique de départ (coupe établie par le sondeur ou le géotechnicien selon sa connaissance du site) en intégrant l'information diagraphique afin de diminuer la part de subjectivité de l'opérateur. Nous avons, pour cela, choisi de travailler à l'échelle du forage et d'utiliser les probabilités conditionnelles.

L'algorithme mis en œuvre détermine, le long du forage traité, pour tout point x_n constitutif du forage, la probabilité d'appartenance de x_n aux formations i , $p(\text{form}_i)$, connaissant, en ce point x_n , la valeur mesurée pour le paramètre de forage D1 (équation 20).

$$p(\text{form}_i / D1) = \frac{p(D1 / \text{form}_i) \times p(\text{form}_i)}{p(D1)} \quad \text{équation 20}$$

avec, au sein du forage étudié pour chaque point x_n constitutif du forage :

$p(\text{form}_i / D1)$ = probabilité d'appartenance de x_n à la formation i connaissant la valeur v_n mesurée en ce point pour le paramètre diagraphique D1,

$p(D1 / \text{form}_i)$ = probabilité de rencontrer la valeur v_n mesurée pour le paramètre diagraphique D1 en x_n , sachant que x_n appartient à la formation i ,

$p(\text{form}_i)$ = probabilité d'appartenance du point considéré x_n à la formation i ,

$p(D1)$ = pour tout point x_n constitutif du forage, probabilité de rencontrer la valeur mesurée pour le paramètre diagraphique D1 au sein du forage étudié.

Dans l'état de développement de l'algorithme, le processus est écrit pour quatre formations au maximum, (i allant de 1 à 4).

En pratique, l'algorithme permet donc de calculer, le long d'un forage, pour tout point x_n constitutif du forage et suivant la profondeur z :

- la probabilité d'appartenance de x_n à la formation 1 sachant la valeur mesurée v_n pour le paramètre de forage D1, soit : $p(\text{form}_1/D_1)$
- la probabilité d'appartenance de x_n à la formation 2 sachant la valeur mesurée v_n pour le paramètre de forage D1, soit : $p(\text{form}_2/D_1)$
- la probabilité d'appartenance de x_n à la formation 3 sachant la valeur mesurée v_n pour le paramètre de forage D1, soit : $p(\text{form}_3/D_1)$

- la probabilité d'appartenance de x_n à la formation 4 sachant la valeur mesurée v_n pour le paramètre de forage $D1$, soit : $p(\text{form}4/D_1)$

En pratique, nous ne sommes donc pas "sûr" d'être dans telle ou telle formation, on va donc construire une coupe probable.

L'algorithme peut être décomposé en 5 sous-procédures (Figure 20), que nous allons détailler pas à pas suivant ce schéma.

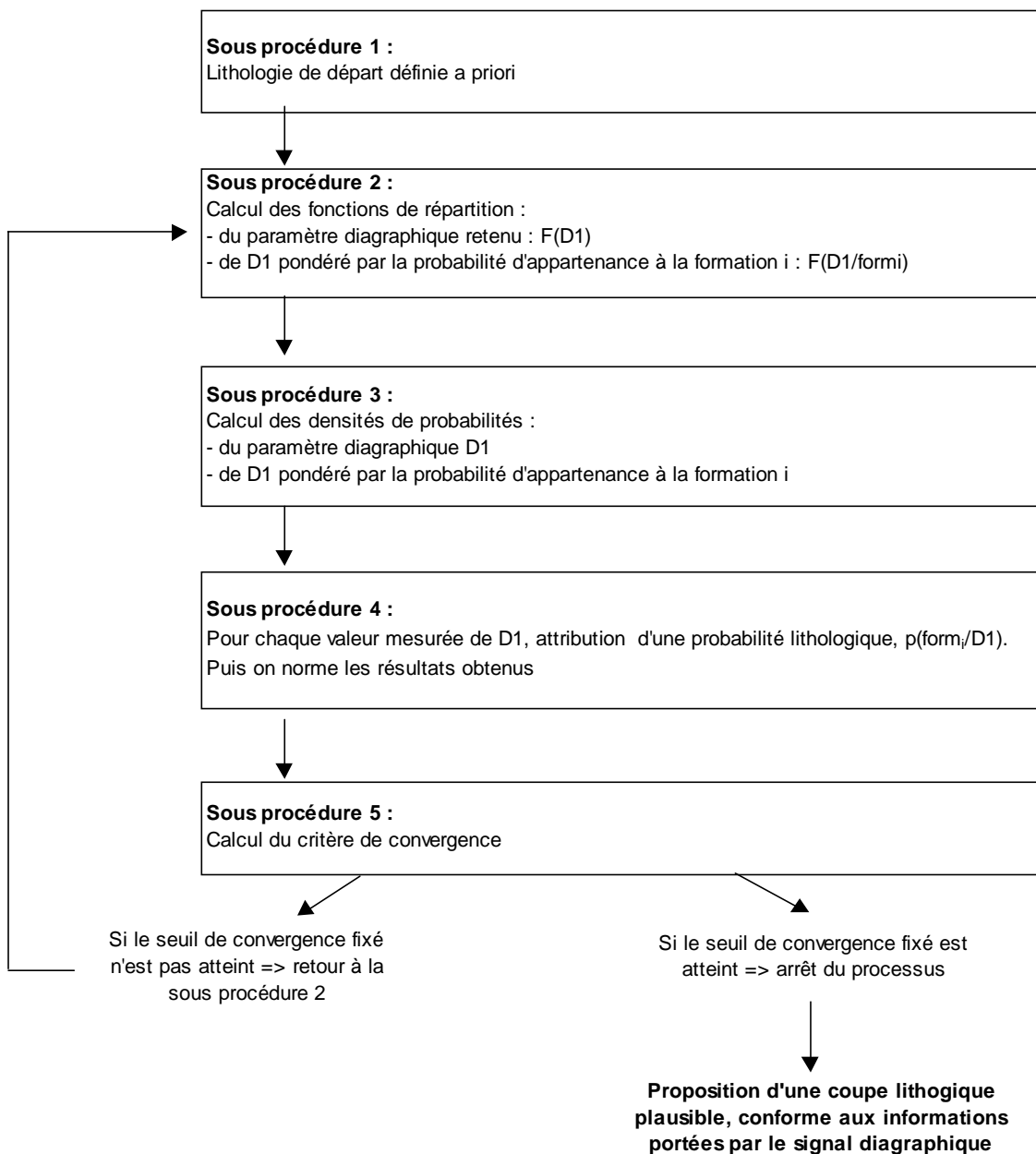


Figure 20 : Organigramme récapitulatif des étapes permettant l'établissement évolutif d'une lithologie probable à partir d'une lithologie initiale établie a priori.

2. Sous-procédure 1 : Mise sous forme d'un log. de probabilités de la lithologie de départ, proposée a priori par le géotechnicien.

Les paramètres d'entrée du processus itératif, sont donnés par le géotechnicien, il s'agit :

- du nombre de formations NF qu'il souhaite prendre en compte dans le découpage du forage considéré (NF = 4 au maximum),
- de la base supposée des différentes formations,
- d'une zone d'incertitude (Zinc) relative aux limites de couches. Cette bande d'épaisseur constante pour les différentes limites de couches est fixée par l'opérateur. Elle représente la plage de transition entre deux formations successives, elle est centrée sur les limites de couches posées comme paramètre d'entrée.

L'algorithme met alors en forme la coupe lithologique proposée a priori, qui constitue la base du processus itératif (Figure 21).

Pour le forage étudié, si l'utilisateur postule :

- de 0 à la profondeur z_1 , le forage traverse la formation $_1$,
- au-delà, le sondage reconnaît la formation $_2$ et la zone d'incertitude est de Zinc mètres.

Nous obtenons :

- Entre 0 et $(z_1 - \text{Zinc}/2)$ m de profondeur :

$$p(\text{form}_1) = p_sur \quad \text{et} \quad p(\text{form}_2) = \frac{(1 - p_sur)}{(NF - 1)}$$

où $p_sur = 0.95$. Entre 0 et $(z_1 - \text{Zinc}/2)$ m de profondeur, la probabilité d'appartenance à la formation 1 est très importante (0.95), mais n'atteint pas 1. En effet, en pratique le géotechnicien n'est jamais absolument certain de la lithologie et dans cette zone, le processus peut permettre l'évolution de la coupe lithologique proposée a priori en intégrant, grâce aux sous procédures suivantes, l'information portée par les paramètres de forage Dj.

- De $(z_1 + \text{Zinc}/2)$ m de profondeur jusqu'à la fin du forage:

$$p(\text{form}_1) = \frac{(1 - p_sur)}{(NF - 1)} \quad \text{et} \quad p(\text{form}_2) = p_sur$$

- Au niveau de la zone de transition, soit entre $(z_1 - \text{Zinc}/2)$ et $(z_1 + \text{Zinc}/2)$, $p(\text{form}_1)$ suit la droite d'équation $p(\text{form}_1) = a_1 \cdot z + b_1$

où z représente la profondeur à laquelle le processus calcule $p(\text{form}_1)$,

$$a_1 = \frac{(1 - NF \cdot p_{-sur})}{Zinc(NF - 1)} \quad \text{et} \quad b_1 = p_{-sur} - a_1 \left(z_1 - \frac{Zinc}{2} \right)$$

sur la même zone d'incertitude, $p(form_2)$ suit la relation,

$$p(form_2) = a_2 \cdot z + b_2 = 1 - p(form_1)$$

avec : $a_2 = -a_1$ et $b_2 = p_{-sur} - a_1 \left(z_1 + \frac{Zinc}{2} \right)$

Tout au long du forage, nous vérifions que la somme des probabilités de l'ensemble des formations considérées est égale à 1, soit $\sum_{i=1}^{NF} p(form_i) = 1$

Un exemple de signal diagraphique à partir duquel l'utilisateur propose d'établir le log des probabilités des formations 1, 2 et 3 est représenté sur la Figure 21. En regard de la vitesse d'avance (paramètre de forage D1), la lithologie proposée a priori par le géotechnicien s'appuie sur les notes de forage.

Les paramètres d'entrée proposent le découpage du signal diagraphique (ici la vitesse d'avance enregistrée au sein d'un forage mené dans la région bordelaise) suivant 3 formations, avec des limites hypothétiques de couches à 1.70 et 3.70 m de profondeur, la zone d'incertitude est de 1.0 m, soit 0.5 m de part et d'autre des murs⁶ supposés.

6 En géologie représente la base d'une formation

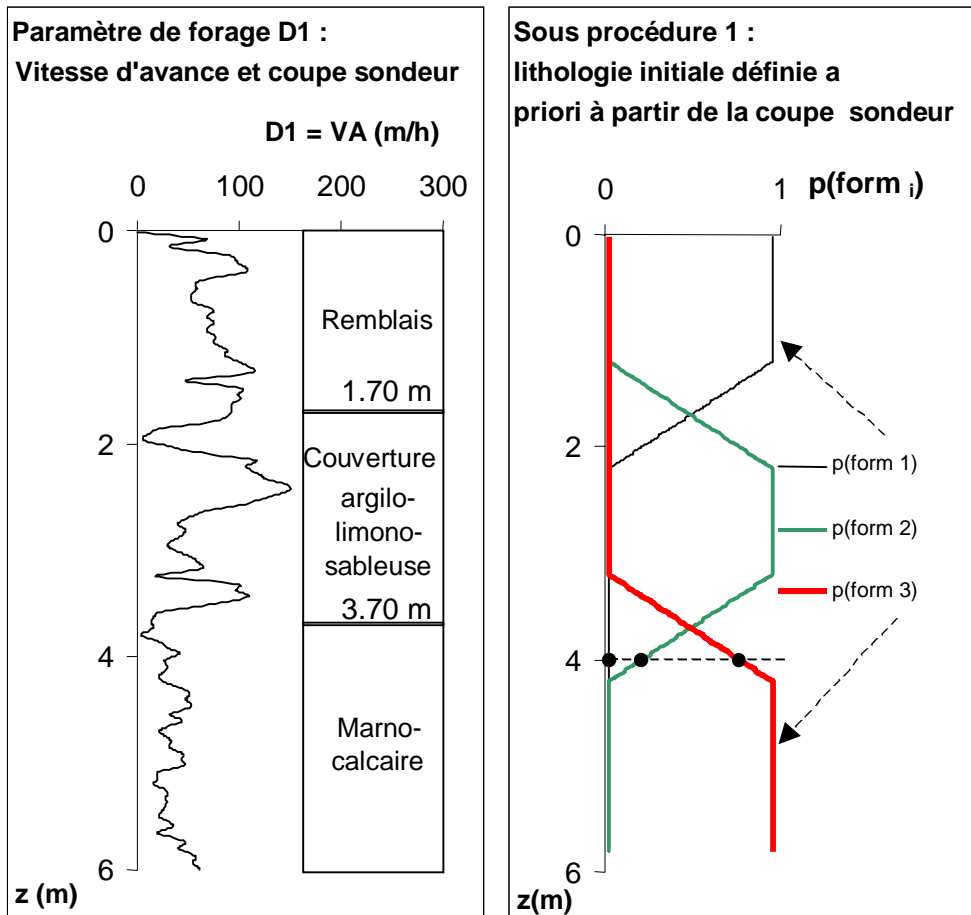


Figure 21 : Illustration de la sous procédure 1 : Mise en forme des propositions lithologiques données comme paramètres d'entrée par le géotechnicien (lithologie définie à partir des notes de sondage limites à 1.70 et 3.70, zone d'incertitude postulée par le géotechnicien égale à 1.00 m).

A ce stade du processus, l'algorithme ne fait pas intervenir les données diagraphiques, il s'agit là de poser les hypothèses de départ, de traduire la coupe postulée initialement par le géotechnicien et qu'il a défini à partir de la coupe "sondeur" et de son expérience.

Ainsi, compte tenu de la prise en compte d'une zone d'incertitude de part et d'autre des limites de couches, la lithologie définie initialement pose, par exemple, qu'à 4 m de profondeur $p(\text{form } 1) = 0.025$, $p(\text{form } 2) = 0.210$ et $p(\text{form } 3) = 0.765$.

3. Sous-procédure 2 : Calcul des fonctions de répartition des paramètres considérés

La sous procédure 2 de l'algorithme consiste à calculer, à l'échelle du forage, les fonctions de répartition :

- du paramètre de forage D1, considéré dans son ensemble,
- du paramètre de forage D1 pondéré par la probabilité d'appartenance à la formation i .

Plus précisément, pour quatre formations, nous calculons :

- $pcum(D1)$: courbe des probabilités cumulées pour le paramètre de forage D1 considéré dans son ensemble, à l'échelle du forage.
- $pcum(D1/ form_1)$: courbe des probabilités cumulées pour le paramètre de forage D1 pondéré par les probabilités d'appartenance à la formation 1.
- $pcum(D1/ form_2)$: courbe des probabilités cumulées pour le paramètre de forage D1 pondéré par les probabilités d'appartenance à la formation 2.
- $pcum(D1/ form_3)$: courbe des probabilités cumulées pour le paramètre de forage D1 pondéré par les probabilités d'appartenance à la formation 3.
- $pcum(D1/ form_4)$: courbe des probabilités cumulées pour le paramètre de forage D1 pondéré par les probabilités d'appartenance à la formation 4.

Notons $\{x_1, \dots, x_n, \dots, x_N\}$ l'ensemble des points constitutifs du forage, et $\{v_1, \dots, v_n, \dots, v_N\}$ les valeurs constitutives du signal diagraphique D1 considéré. N représente le nombre d'individus x_n constitutifs du forage et le nombre de valeurs constitutives du signal diagraphique D1 considéré.

En pratique, à tout x_n situé à la profondeur z correspond une valeur diagraphique v_n mesurée.

La sous procédure 1 a permis de faire correspondre à chaque point x_n et valeur v_n constitutive du signal diagraphique une probabilité d'appartenance la formation i , $p(form\ i)$, probabilité qui correspond à la coupe lithologique définie a priori par le géotechnicien.

Dans cette étape du calcul, les valeurs v_n du paramètre de forage D1, associées à leurs probabilités d'appartenance à la formation i , sont alors ordonnées de manière croissante selon le paramètre de forage D1.

Calcul des probabilités cumulées du paramètre de forage D1 considéré dans son ensemble, à l'échelle du forage :

La probabilité d'occurrence de la plus petite valeur v_1 de D1 est égale à :

$$p(v_1) = \frac{1}{N}$$

La probabilité qu'une valeur v de D1 soit inférieure à une autre valeur v_n ; $n \in [2; N]$ de ce même paramètre de forage D1 est égale à :

$$p(v \leq v_n) = p(v \leq v_{n-1}) + \frac{1}{N}$$

Calcul des probabilités cumulées du paramètre de forage D1 "pondéré" par les probabilités d'appartenance aux formations i.

Procéder par pondération signifie que les individus ne participent à la construction de la fonction de répartition qu'à la hauteur de leurs probabilités d'appartenance à la formation i.

Le calcul de la fonction de répartition du paramètre D1 dans la formation i est obtenu en traitant la population de valeurs $\{v_1, \dots, v_n, \dots, v_N\}$ prises par le paramètre de forage au sein de cette formation. Cela revient à pondérer les fréquences des valeurs prises par D1 par leur probabilité d'appartenance à la formation considérée. C'est une sorte d'effectif pondéré de la formation i.

$$p(v_1 / form_i) = \frac{p(form_i)}{N'}$$

avec

$$N' = \sum_{n=1}^N p(form_i)$$

$$p(v \leq v_n / form_i) = p(v \leq v_{n-1} / form_i) + p(v_1 / form_i)$$

Par exemple, $p(form_1)$, correspond à la probabilité d'appartenance à la formation 1 pour le point situé à la cote z.

Le calcul des fonctions de répartition appliqué au signal diagraphique de la Figure 21, est reporté sur la Figure 22. On y distingue les fonctions de répartition de l'ensemble du forage et celles de chaque formation.

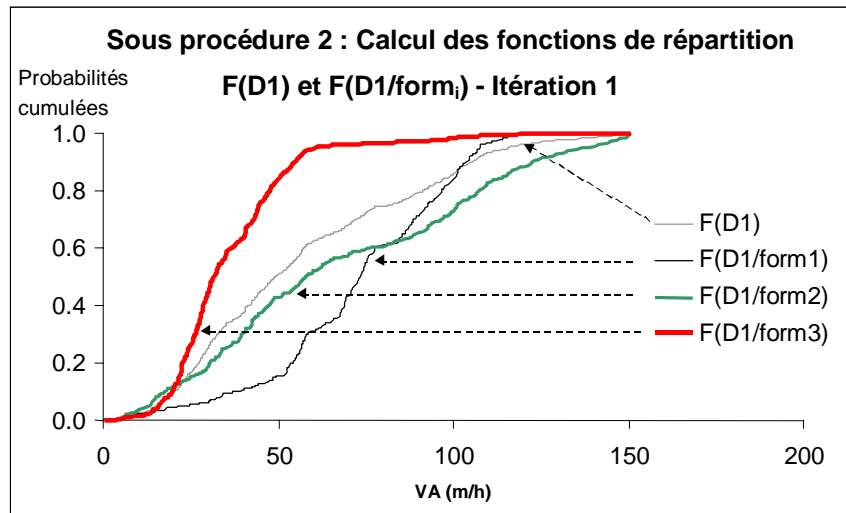


Figure 22 : Illustration de la sous procédure 2 : fonctions de répartition calculées à partir du signal de VA présenté en Figure 21 et de la proposition lithologique initiale. (itération n°1)

A ce niveau des calculs, il apparaît que plus de 90% des valeurs enregistrées dans la formation 3 sont inférieures à 50 m/h, que cette proportion est inférieure à 60 % dans la formation 2 et représente moins de 20% des valeurs dans la formation 1. Inversement, enregistrer une vitesse donnée (exemple, VA = 80 m/h) peut être considéré comme fournissant un indice sur la nature de la formation concernée.

4. Sous-procédure 3 : Pour chaque formation, calcul des densités de probabilités du paramètre de forage D1.

Nous considérons que les fonctions de répartition établies lors de la sous procédure 2 sont linéaires par intervalles et qu'elles permettent de décrire les fonctions de distribution statistiques. Plusieurs voies sont envisageables pour accéder aux distributions statistiques.

- Il est possible de « coller » un modèle sur chaque fonction de répartition et de le dériver. La plus grande difficulté est d'adapter le modèle à toute la courbe.
- Une dérivation par tronçons de la fonction de répartition est également une solution, mais s'avère lourde et coûteuse compte tenu de l'espace mémoire nécessaire à une telle opération. De plus à chaque extrémité de tronçon se pose le problème d'une discontinuité dans les dérivées.
- Une dernière possibilité est de segmenter la fonction de répartition. Nous avons choisi cette possibilité en discrétisant chaque courbe de fonction de répartition calculée en s segments égaux suivant l'axe des probabilités ($s = 50$ dans notre procédure). Cette option permet d'obtenir une image fidèle de la courbe de fonction de répartition et

constitue un compromis intéressant entre finesse du découpage et vitesse de calcul (Figure 23).

Nous procédons comme suit :

Pour chaque limite supérieure de segment (0.02, 0.04, 0.06 ...1), la procédure détermine, par interpolation linéaire entre les valeurs v de D1 mesurées, une valeur interpolée de D1 ($v_{interpolé}$) (équation 21).

$$v_{int\ erpolé} = \frac{x2 - x1}{y2 - y1} \times \text{lim.sup}(\text{segment}_i) + \frac{x1y2 - y1x2}{y2 - y1} \quad \text{équation 21}$$

avec :

$$x1 = v_{n-1} \quad x2 = v_n \quad y1 = Pcum_{n-1} \quad y2 = Pcum_n$$

et $\text{lim.sup}(\text{segment}_i)$ = limite supérieure du segment i

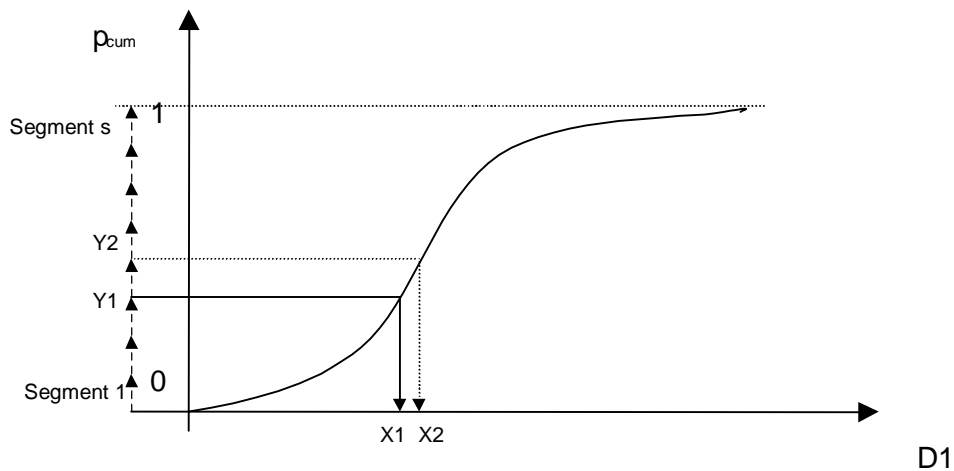


Figure 23 : Schéma représentant la discrétisation opérée sur une fonction de répartition, sous procédure 3.

Puis nous calculons, la probabilité P correspondant à chacune des valeurs interpolées du paramètre de forage D1.

$$P = \frac{S_n - S_{n-1}}{v_{int\ erpolé}_n - v_{int\ erpolé}_{n-1}}$$

On obtient ainsi les densités de probabilités conditionnelles pour chaque élément $p(D1/form_i)$.

Les densités de probabilité obtenues au terme de la sous procédure 3 pour le signal étudié Figure 21 sont reportées ci-après (Figure 24).

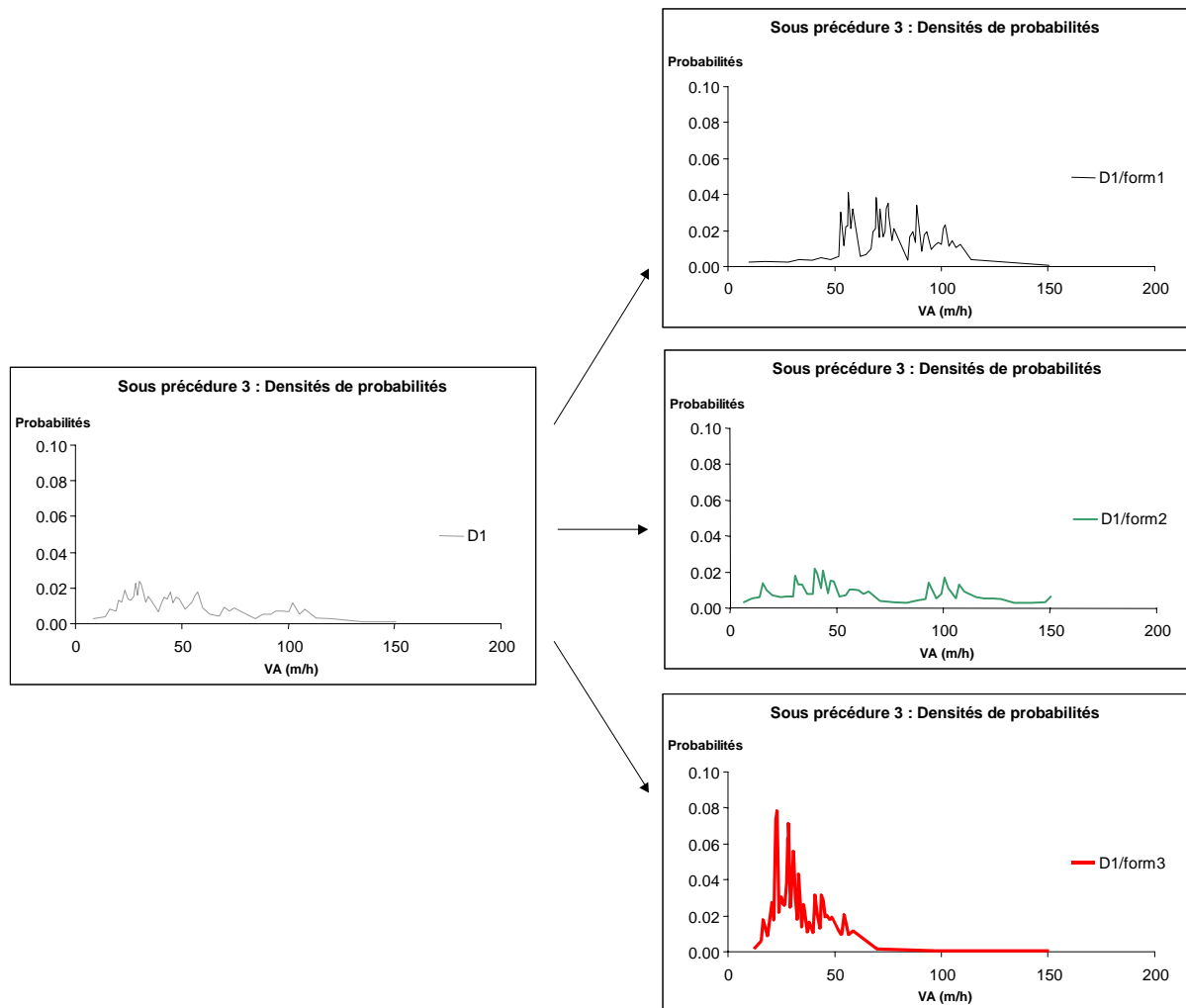


Figure 24 : Résultats obtenus au terme de la sous procédure 3 sur le signal diagraphique présenté en figure 7.

La démarche permet de révéler le contraste, une valeur de la vitesse d'avance de 30 m/h caractérisera un matériau issu de la formation 3 de façon prépondérante, son appartenance à la formation 2 et 1 représentant une moindre présomption. De même une valeur de VA supérieure à 100 m/h caractérisera très vraisemblablement un individu appartenant à la formation 1 ou 2.

5. Sous-procédure 4 : Attribution d'une valeur de probabilité lithologique aux valeurs mesurées du paramètre de forage D1.

Pour chacune des valeurs mesurées du paramètre de forage D1, le processus recherche la valeur interpolée de D1 qui lui est immédiatement inférieure. Il attribue alors à la valeur mesurée du paramètre D1 la probabilité lithologique calculée pour la valeur interpolée de D1 lors de la sous-procédure 3. Nous obtenons ainsi $p(D1)$.

L'opération est répétée pour le paramètre D1 lorsqu'il est pondéré par chaque formation i . Nous obtenons de cette manière les probabilités : $p(D1/form\ i)$, (i allant de 1 à 4).

En appliquant l'équation 20, nous calculons pour chaque formation i envisagée les probabilités conditionnelles $p(form\ i/D1)$.

En théorie, pour obtenir la probabilité d'appartenance à la formation i d'un point situé à la cote z connaissant la valeur mesurée de D1 en ce point, il suffit d'écrire :

$$p(form_i / D1) = \frac{p(D1 / form_i) \times p(form_i)}{p(D1)}$$

En pratique, les probabilités ainsi calculées peuvent être supérieures à 1 en raison de l'approximation faite au niveau du découpage des fonctions de répartition. L'erreur peut être grande notamment sur des signaux synthétiques, pour lesquels le paramètre de forage D1 peut être très contrasté et peu bruité, ce qui se traduit par une faible amplitude de la plage de variation du paramètre de forage).

La dernière étape consiste donc à ramener égale à 1 la somme des probabilités des différentes formations.

Soit :

$$p(form_i / D1)_{renormé} = \frac{p(form_i / D1)}{\sum_{i=1}^4 p(form_i / D1)}$$

Cela signifie, par exemple, que la probabilité d'appartenance à la formation 1 du point situé à la profondeur z calculée suivant l'équation 20 est divisée par la somme des probabilités d'appartenance de ce point à chaque formation envisagée.

Les probabilités conditionnelles ainsi « renormées » sont réinjectées dans le processus de calcul et servent de base à la sous-procédure 2 pour la seconde itération.

Le processus itératif permet ainsi une évolution de la lithologie a priori donnée en entrée de l'algorithme par le géotechnicien, en tenant compte des informations portées par le signal diagraphique.

Au terme de 10 itérations, le processus présenté, appliqué sur le signal de la Figure 15 conduit aux fonctions de répartition de D1 et D1/form_i présentée Figure 25 et à la coupe lithologique de la Figure 26 .

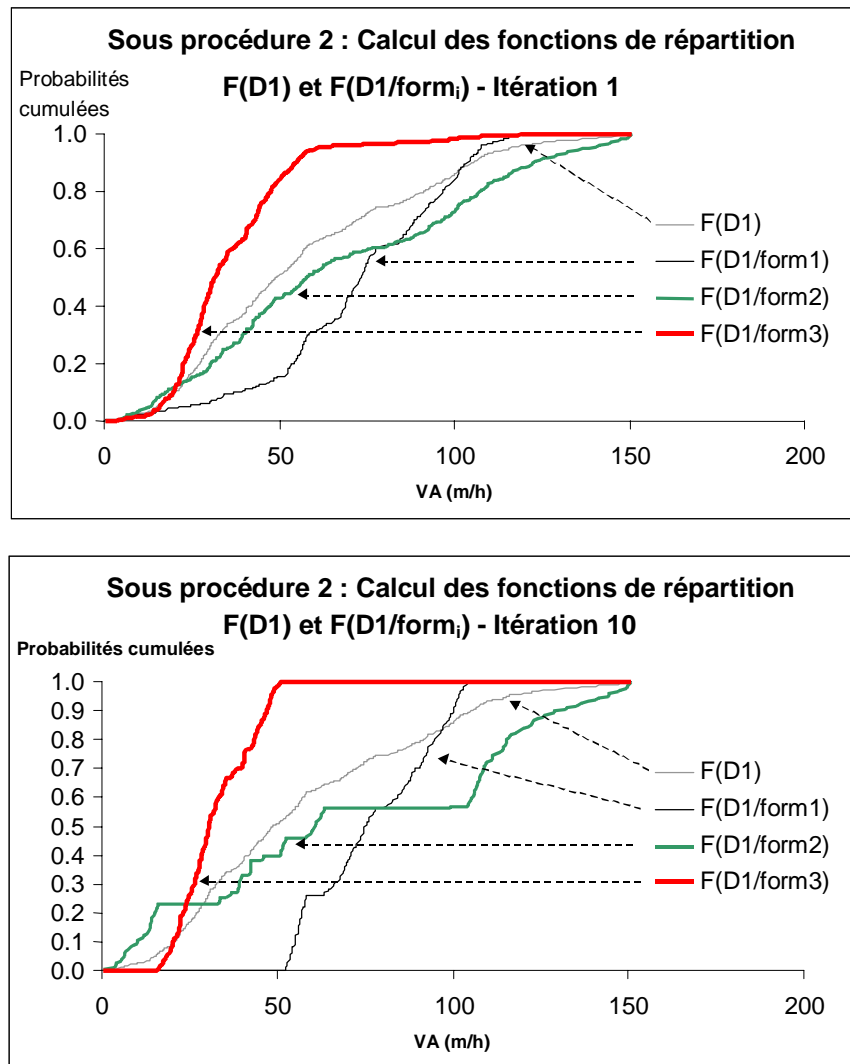


Figure 25 : Fonctions de répartition de PF1 et PF1/form_i obtenues à partir des hypothèses de départ et au terme de 10 itérations.

La comparaison des fonctions de répartition construites entre l'initialisation du processus et la dixième itération montre que l'algorithme a permis une claire distinction entre les formations 1 et 3 lorsque VA est inférieure à 50m/h. La formation 2 est cependant moins nettement individualisée.

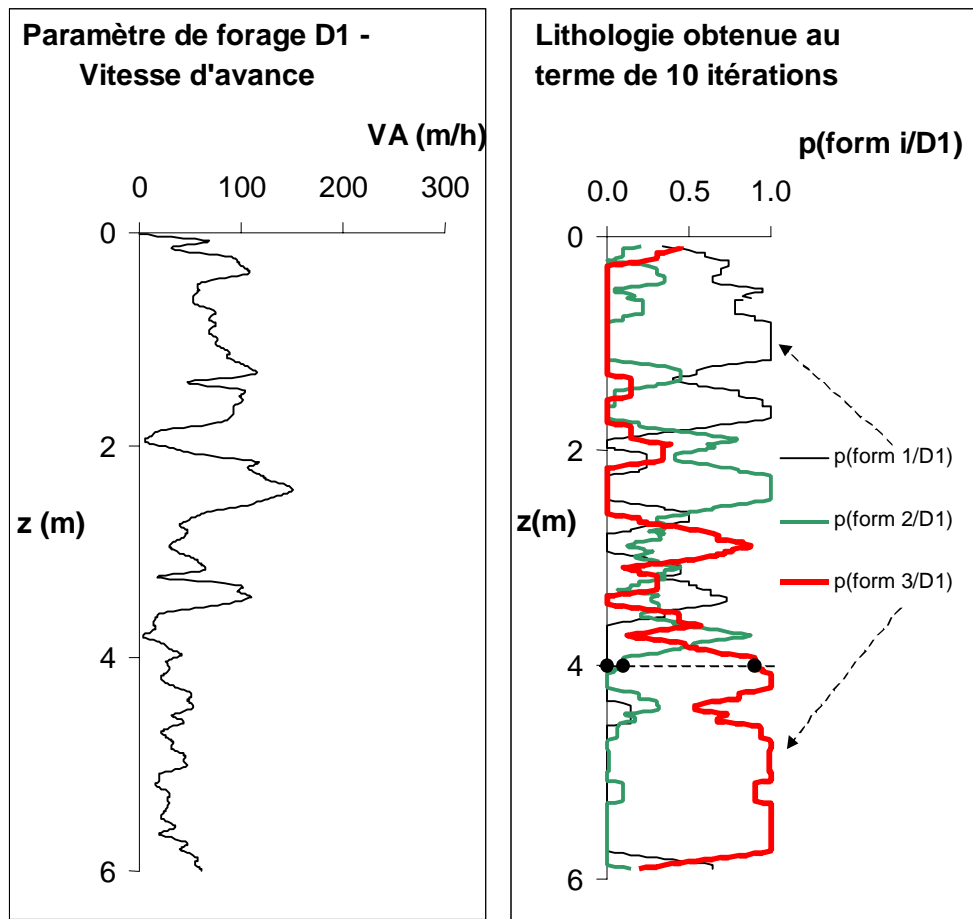


Figure 26 : Log des probabilités d'appartenance aux formations 1, 2 et 3 pour la vitesse d'avance d'un forage mené dans l'agglomération bordelaise.

Le log lithologique obtenu propose :

- la prédominance de la formation 1, ($p(\text{form}_1) > 0.6$) jusqu'à environ 1.80 m de profondeur.
- Au-delà, entre 1.80 et 2.60 m de profondeur et entre 3.60 et 3.90 m de profondeur, en accord avec le signal diagraphique, la probabilité d'appartenance à la formation 2 est prépondérante.

Mais :

- Le signal de VA entre 2.80 et 3.00 conduit à une probabilité $p(\text{form}_3)$ supérieure à $p(\text{form}_1)$ et $p(\text{form}_2)$.
- Une zone pour laquelle $p(\text{form}_1)$ domine, ressort entre 3.20 et 3.50 m de profondeur.
- A partir de 3.90 m de profondeur, les valeurs de vitesse d'avance sont inférieures à 50m/h, la prédominance de $p(\text{form}_3)$ est évidente. A 4.00 m de profondeur, nous obtenons $p(\text{form}_1/\text{PF1}) = 0$, $p(\text{form}_2/\text{PF1}) = 0.1$, $p(\text{form}_3/\text{PF1}) = 0.9$.

La coupe lithologique ainsi obtenue est tout à fait cohérente avec les valeurs de VA mesurées et la lithologie attendue pour le site. La formation 1 représentant les matériaux de remblai, la formation 2 les matériaux de couverture argilo-limono-sableux, la formation 3, les marno-calcaires.

La prise en compte de deux paramètres de forage dans la détermination du log lithologique probable est obtenue en considérant alternativement un paramètre de forage D1 pour les itérations impaires et un paramètre de forage D2 pour les itérations paires.

En toute rigueur la lithologie obtenue à l'issue du processus itératif n'est pas plus juste ou plus probable que celle proposée par le sondeur, mais elle est plus conforme aux informations portées par le signal diagraphique.

En effet, si l'on considère les valeurs de VA enregistrées un peu au dessus de 3 m de profondeur, elles présentent des valeurs proches de celles acquises au sein de la formation 3. Il sera donc logique de tenir compte de cette information lors de la génération des paramètres pressiométriques.

6. Sous-procédure 5 : Calcul du critère de convergence.

Le processus itératif proposant un log. de probabilités des différentes formations n'a de sens que si la proposition lithologique retenue, soit la proposition résultat de l'itération (k) est "meilleure" que la proposition lithologique obtenue à l'itération (k-1).

En d'autres termes, l'algorithme proposant un log lithologique probable est-il convergent ?

A partir de quelle précision (ε), la proposition obtenue est-elle jugée satisfaisante?

Soit, A un algorithme engendrant la suite de nombres déterminés :

$$\{U_k(A) : k \in \mathbb{N}\} \text{ avec } U_k = U_1; U_2; \dots; U_k$$

ε étant fixé, on peut trouver effectivement un entier accessible $N(\varepsilon)$ tel que :

$$|U_{k+q} - U_k| < \varepsilon \text{ dès que } k \geq N(\varepsilon), N(\varepsilon) \text{ étant indépendant de } q.$$

On dit alors que l'algorithme A converge à la précision ε [Naisse 92].

Dans notre cas, le critère de convergence (ε) choisi est un critère global. Il tient compte de l'ensemble des formations et est calculé à l'échelle du forage (équation 22) :

$$\varepsilon = \frac{\sum_{z=1}^N \sum_{i=1}^{NF} \frac{1}{NF} |p(form_i)_k - p(form_i)_{k-1}|}{N}$$

équation 22

avec :

k = indice de l'itération

i = indice de la lithologie

z = indice d'individu (cote z)

N = nombre d'individus constitutifs du forage

NF = nombre total des lithologies considérées

p(form_i) = probabilité d'appartenance à la lithologie i

En pratique, on procède au calcul du critère de convergence par étapes :

(a) calcul de la moyenne des valeurs absolues des écarts des probabilités de chaque lithologie entre deux itérations successives.

Pour chaque z, calcul de la moyenne des valeurs absolues des écarts obtenus entre les probabilités de chaque lithologie entre deux itérations successives.

Par exemple, pour 3 formations (form 1, form 2 et form 3), entre les itérations 1 et 2, nous obtenons pour chaque z :

$$\tau_z = \frac{1}{3} \times [|p(form_1)_1 - p(form_1)_2| + |p(form_2)_1 - p(form_2)_2| + |p(form_3)_1 - p(form_3)_2|]$$

ce qui correspond à une valeur (τ_z) pour chaque z

(b) calcul de la moyenne des valeurs obtenues sur l'ensemble du forage.

Pour un forage constitué de N individus, nous obtenons :

$$\varepsilon = \sum_{z=1}^N \frac{1}{N} \cdot \tau_z$$

7. Validation de la démarche

Afin de définir une valeur seuil pour le critère de convergence, adaptée à notre problème, nous analyserons les résultats obtenus sur des signaux synthétiques peu bruités et sur des enregistrements de la vitesse d'avance (VA) et de la pression d'injection (Pi) pour un forage mené par la société Solen à l'occasion d'une campagne de reconnaissance pour un tunnel à IVRY (France).

7.1. Principes

A partir de l'évolution des log. lithologiques suivant le nombre d'itérations, l'appréciation de « l'expert » permet de définir un seuil de précision convenable pour le critère de convergence. La précision est jugée « satisfaisante » en relation avec le problème posé : identifier les différentes couches lithologiques en accord avec l'information portée par le signal diagraphique et selon le problème posé.

L'œil « expert » définit à partir de quelle itération (q) la solution apportée par l'algorithme est satisfaisante, soit l'itération au-delà de laquelle le gain de précision n'est plus significatif. En d'autres termes, poursuivre le calcul n'apporte pas d'information supplémentaire.

A l'itération (q) correspond une valeur du critère de convergence, qui sera ensuite prise comme seuil de référence. Les signaux diagraphiques seront alors traités en posant ce degré de précision comme référence.

Les cas de figure suivants pourront alors se présenter :

- L'algorithme est convergent, la solution obtenue est valable au seuil de précision ε (seuil de convergence de référence).
- L'algorithme ne converge pas, la solution proposée ne peut pas être interprétée.

Afin de valider le choix d'un seuil de référence pour le critère de convergence et d'apprécier l'impact des paramètres d'entrée sur la lithologie probable proposée comme solution, nous testerons le processus, dans un premier temps sur des signaux synthétiques peu bruités, puis sur des signaux réels en faisant intervenir, un puis, deux paramètres de forage.

7.2. Tests sur un signal synthétique peu bruité

Le signal synthétique suit :

- une loi normale de moyenne 100 et d'écart type 5 de 0 à 1.5 m,
- une loi normale LN(50,5) de 1.5 à 3.0 m de profondeur.
- le signal est régularisé par une moyenne arithmétique sur une fenêtre mobile de taille 0.40m.

A travers 3 cas de figures (test n°1 à 3) (Figure 27), nous mesurerons l'impact des choix lithologiques, imposés via la coupe a priori initialisant le processus de découpage, sur la valeur du seuil de convergence et sur les solutions construites par l'algorithme. Les fonctions de répartition correspondant aux hypothèses de départ sont portées en Figure 28.

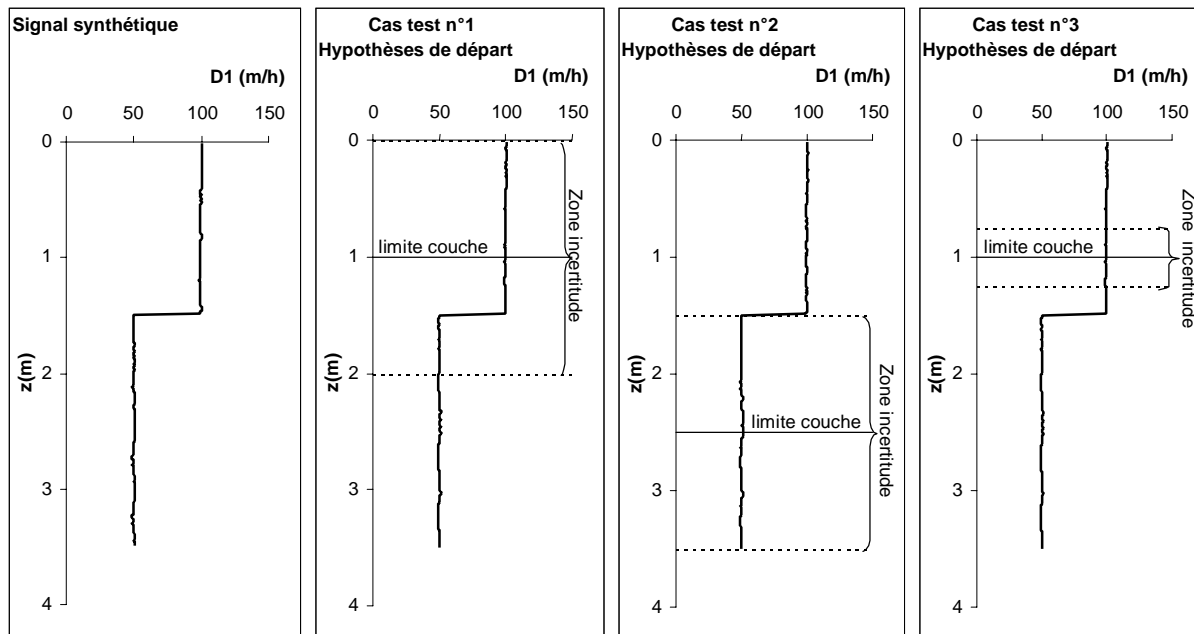


Figure 27 : Illustration des 3 tests réalisés sur un signal synthétique peu bruité

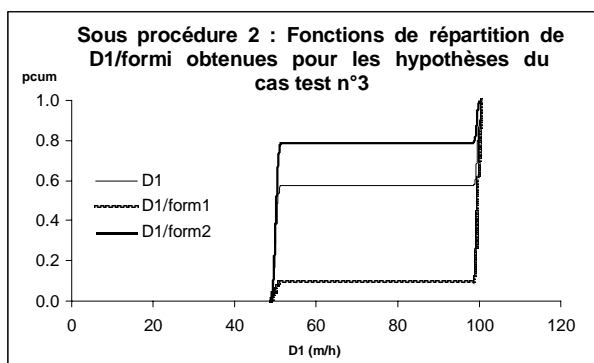
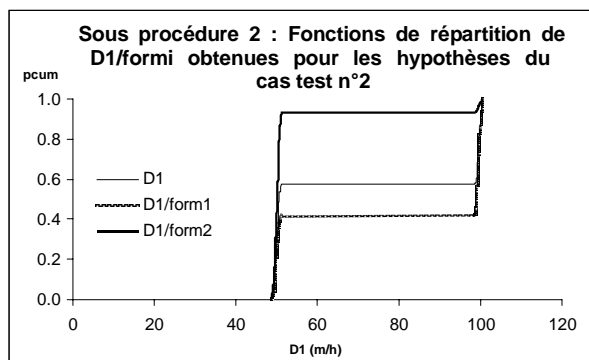
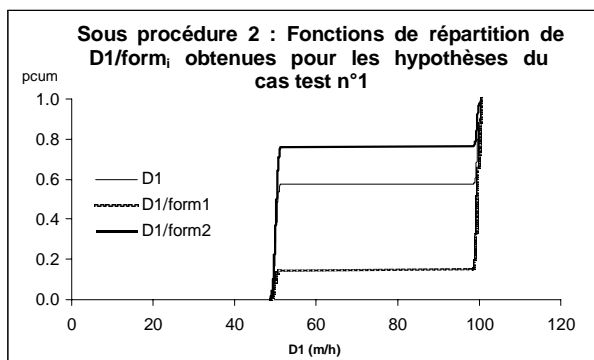


Figure 28 : Fonctions de répartition obtenues pour les hypothèses de départ des cas test 1 à 3 sur un signal synthétique peu bruité.

7.2.1. Test n°1

Les données de départ sont :

- mur de la formation 1 posé à 1.0 m, (limite réelle située à 1.50 m)
- zone d'incertitude = 2.0 m,

Le critère de convergence posé est 1.10^{-8} , avec un nombre maximal d'itérations égal à 30.

Le critère de convergence donné ici est volontairement très faible afin de visualiser le comportement du critère et l'évolution de la lithologie pour un nombre d'itérations relativement important. Le nombre d'itérations est limité à 30 afin de rester dans des temps de calcul acceptables.

L'évolution du critère de convergence au fil des itérations est reportée sur la Figure 29.

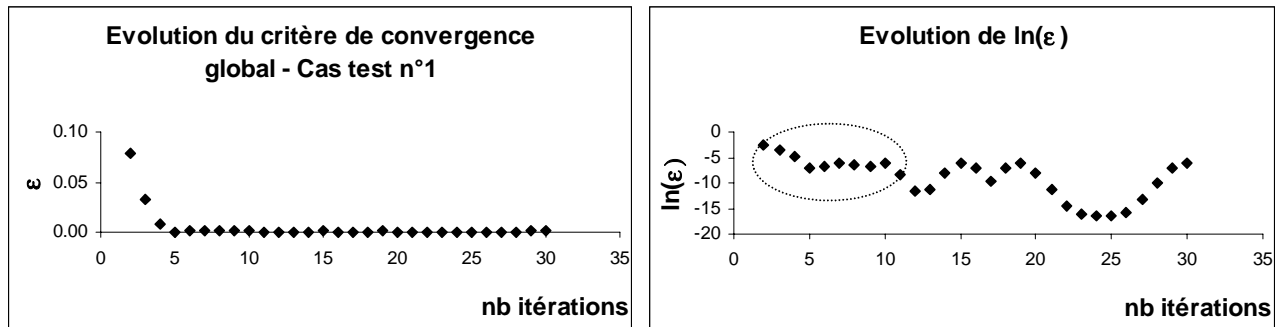


Figure 29 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itération

L'examen visuel de l'évolution du critère de convergence au fil des itérations (Figure 29) montre que, dans ce cas de figure, le critère de convergence n'évolue plus de façon significative au-delà de 5 itérations, soit un seuil de 8.10^{-4} .

La visualisation du graphique de $\ln(\epsilon)$ en fonction du nombre d'itérations fait ressortir des fluctuations importantes du critère au-delà de la 10^{ème} itération après une stabilisation de celui-ci entre les itérations 5 et 10. L'amplitude de ces variations est due aux arrondis numériques et n'est pas significative.

Pour l'utilisateur, le log lithologique obtenu est satisfaisant, autrement dit en bon accord avec le signal diagraphique, à partir de la 2^{ème} itération, ce qui correspond à $\epsilon_{(it1-2)} = 0.078$. Le résultat obtenu à l'itération 4 est cependant plus "abouti" et correspond à un degré d'exigence supérieur. $\epsilon_{(it3-4)}$ est alors égal à 8.10^{-3} .

Pour notre problème, nous préférons conserver le résultat obtenu à l'itération n°4, pour laquelle la probabilité d'être dans la formation 1, $p(\text{form } 1)$ jusqu'à 1.50 m de profondeur est supérieure à $p(\text{form } 1)$ obtenue à l'issue de l'itération n°2.

Les log lithologiques sont présentés sur la figure 30.

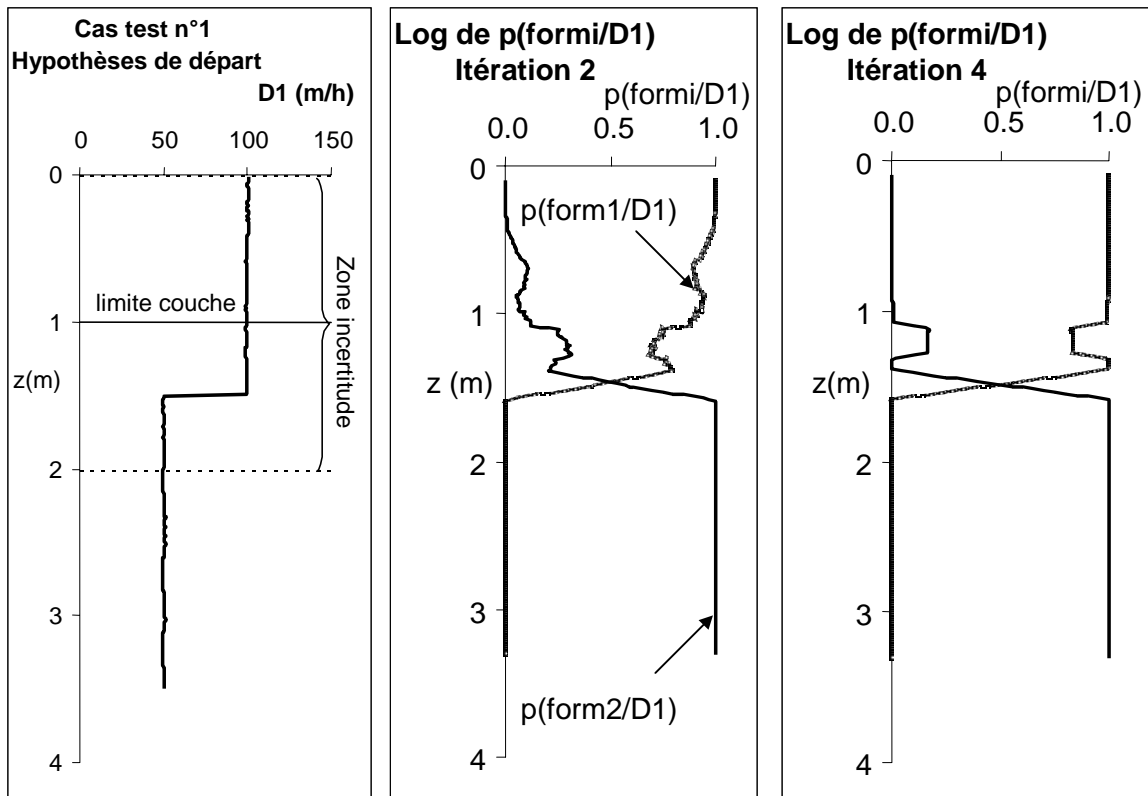


Figure 30 : Log des probabilités lithologiques obtenus aux itérations 2 et 4

7.2.2. Test n°2

Nous avons voulu tester la variation de la précision ϵ selon la position du mur imposé au départ de l'algorithme. Pour ce cas test, la distance entre le mur de départ et la limite réelle a été augmentée par rapport au cas test n°1. Les données de départ sont :

- mur de la formation 1 situé à 2.5 m,
- zone d'incertitude = 2.0 m,

L'évolution du critère de convergence suivant le nombre d'itérations est présenté Figure 31.

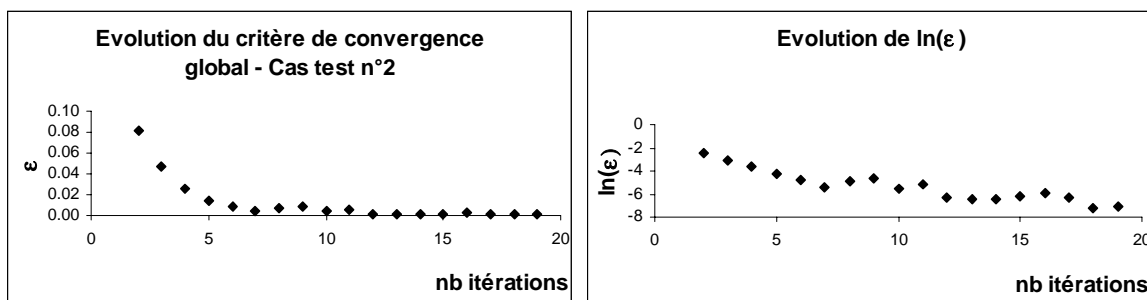


Figure 31 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itérations - cas test n°2.

De la même manière que pour le cas test n°1, l'algorithme est convergent. Cependant, nous constatons que pour une itération donnée, les valeurs obtenues pour le critère de convergence sont supérieures à celles calculées pour le test n°1. Cela signifie, qu'à l'échelle du forage et pour l'ensemble des formations, l'écart entre une itération (k) et une itération (k+1), est plus grand pour le test n°2 que pour le test n°1. Le processus se rapproche de la solution, mais moins rapidement que pour le cas test n°1.

Les fluctuations de $\ln(\varepsilon)$ au-delà de la 8^{ème} itération demeurent limitées.

L'étude des log des probabilités lithologiques (Figure 32) montre que la limite est retrouvée pour l'itération n°19, seuil de convergence $\varepsilon = 8.10^{-4}$, soit un seuil de convergence 10 fois plus faible que celui obtenu au cas test n°1.

Notons aussi que dès l'itération n°4, la limite entre les formations 1 et 2 est située à environ 1.75 m, soit 0.20 en dessous de la limite réelle en accord avec le signal synthétique simulé.

Selon le degré d'exigence de l'expert, ce résultat peut être jugé satisfaisant par l'utilisateur, avec un seuil de convergence $\varepsilon_{(it4)} = 2.6 \cdot 10^{-2}$.

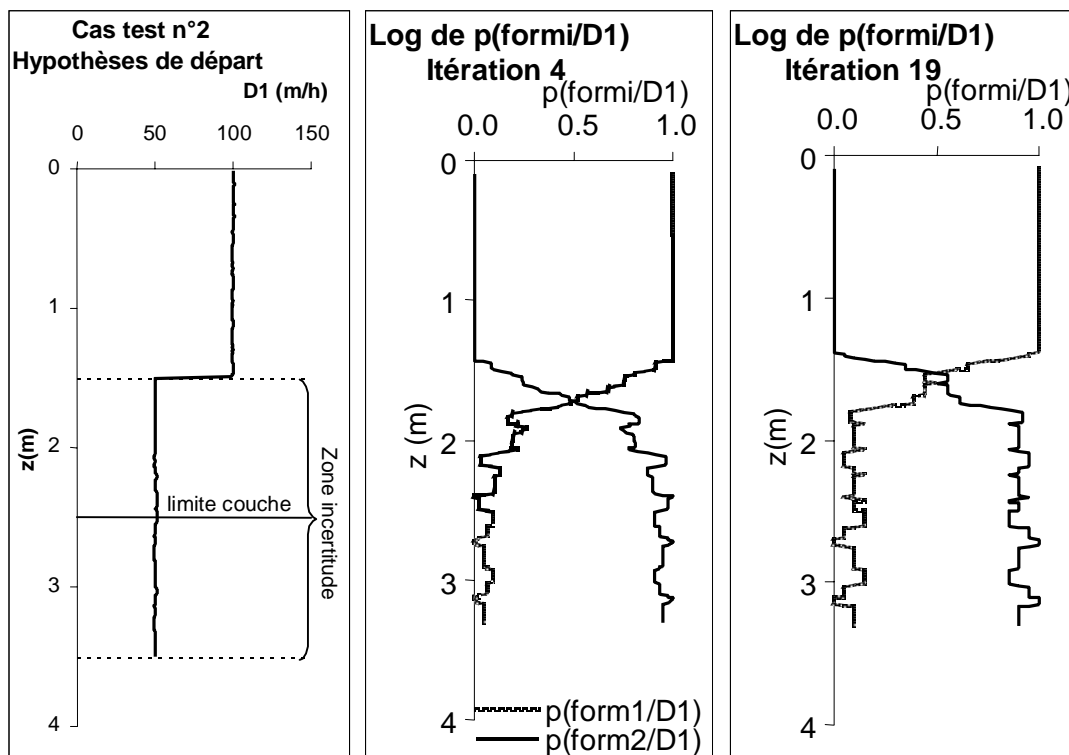


Figure 32 :Log des probabilités lithologiques pour le cas test n°2. Itérations 4 et 19

Lorsque la limite de couche posée en hypothèse de départ, est éloignée de la limite logique définie à partir du signal diagraphique, le processus est capable de retrouver la limite logique.

Cependant, les probabilités $p(\text{form1}/D1)$ et $p(\text{form2}/D1)$ restent très voisines sur environ 0.20 m, ce qui constitue une limite du processus algorithmique.

7.2.3. Test n°3

Via le test n°3, nous avons voulu tester l'impact de l'étendue de la zone d'incertitude sur la valeur du critère de convergence. Dans le cas test n°1, la limite réelle entre les deux formations appartenait à la zone d'incertitude. Ici la zone d'incertitude ne couvre pas la limite vraie entre les formations 1 et 2. La donnée de départ est manifestement fautive.

Les données de départ sont :

mur de la formation 1 = 1.0 m, (coupure réelle située à 1.50 m),

zone d'incertitude = 0.5 m, (la zone d'incertitude n'inclut donc pas la limite réelle donnée par le signal).

Nous obtenons (Figure 33) la convergence du processus itératif vers une lithologie probable qui corrige l'erreur a priori.

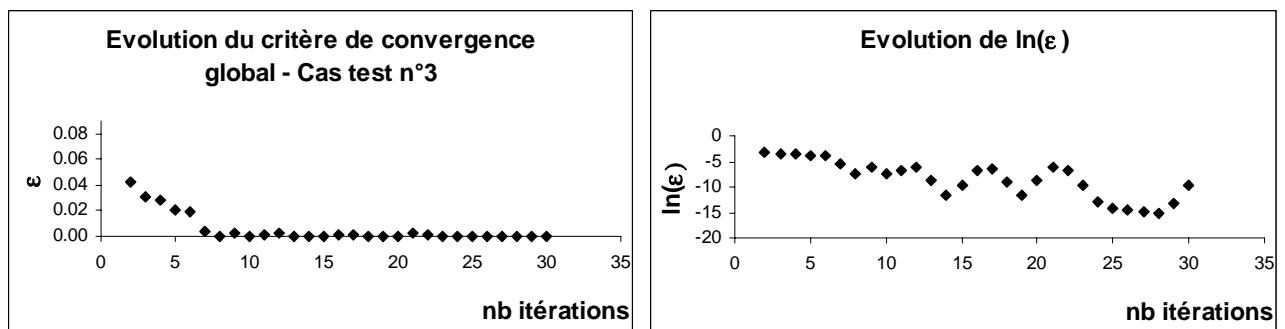


Figure 33 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itérations - Cas test n°3

Nous remarquerons que les écarts mesurés entre les premières itérations est moindre par rapport au cas test n°1 et n°2 pour lesquels la limite réelle entre les formations 1 et 2 appartenait à la zone d'incertitude. L'examen des log. de probabilités lithologiques obtenus (Figure 34) entraîne les remarques suivantes :

Compte tenu de nos exigences (recherche de la limite réelle), le résultat obtenu est tout à fait satisfaisant dès la 6^{ième} itération, pour laquelle le critère de convergence $\epsilon_{(it6)} = 1.9 \cdot 10^{-2}$.

Au regard de la courbe traçant l'évolution du critère de convergence, l'itération n°7 paraît "plus juste" que l'itération n°6, toutefois, si l'on se réfère au degré d'exigence de l'expert, la différence entre les deux découpages lithologiques ne paraît pas très importante.

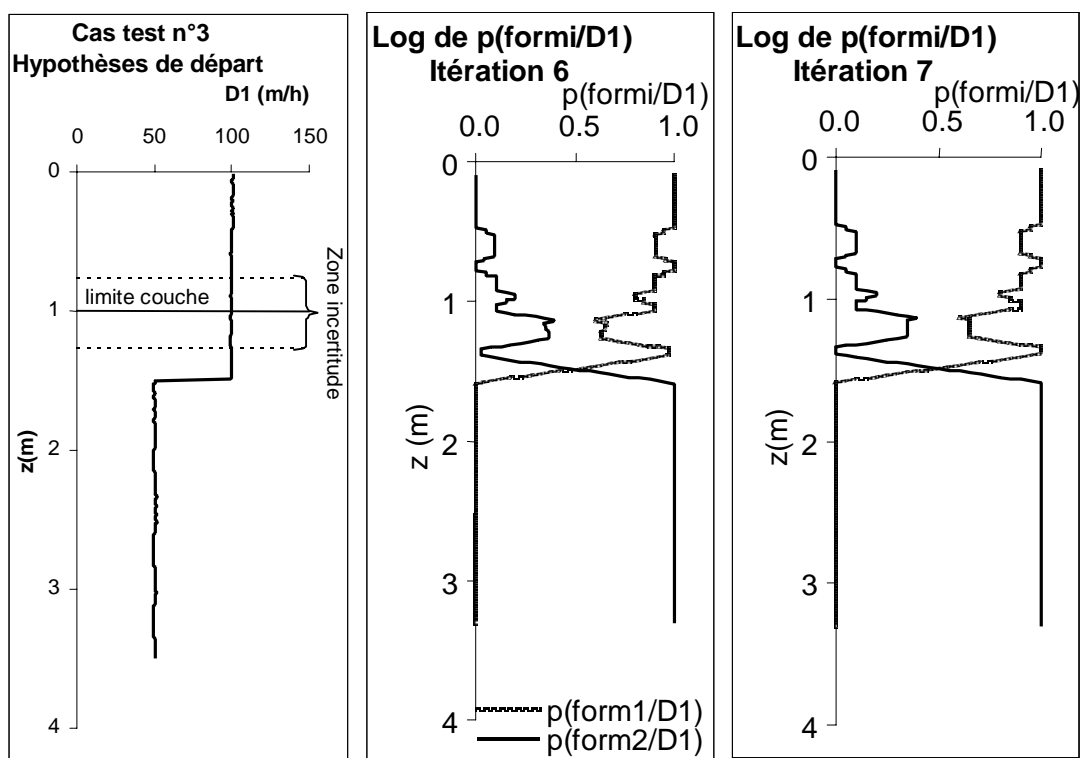


Figure 34 : Log des probabilités lithologiques obtenus pour le cas test n°3.

Sont reportés dans le Tableau 5, selon les cas tests 1,2 et 3 et pour un signal synthétique peu bruité, l'ensemble des valeurs du critère de convergence correspondant aux log des probabilités lithologiques satisfaisant l'expert au regard du problème posé.

	Test n°1	Test n°2	Test n°3
Critère de convergence (ϵ)	0.078 (it 2) (*)	0.026 (it4) (*)	0.019 (it6) (**)
	0.008 (it4) (**)	0.001 (it 19) (**)	

(*) indique la qualité du résultat : coupe lithologique jugée : acceptable (*) ou tout à fait satisfaisante (**)

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des valeurs du seuil de convergence pour les cas test 1, 2 et 3.

De ces 3 exemples, il ressort que le nombre d'itérations pour lequel la solution est jugée satisfaisante pour l'expert, est fonction des paramètres d'entrée et notamment de la position du mur donnée au départ par rapport à la limite vraie imposée par le signal digraphique.

Si l'on compare les résultats obtenus à l'issue des tests n°1 et n°3, la valeur de la zone d'incertitude et surtout le fait que celle-ci englobe ou non la limite réelle imposée par le signal, a peu d'impact sur la valeur du seuil à retenir pour la convergence du processus.

Pour un même seuil de convergence, si la limite réelle entre les deux formations appartient à la zone d'incertitude, l'écart entre les probabilités $p(\text{form1}/\text{PF1})$ et $p(\text{form2}/\text{PF1})$ est plus important que pour le cas où la limite réelle entre les deux formations n'est pas comprise dans la zone d'incertitude.

A partir de ces cas tests :

1 - Le minimum des valeurs obtenues pour le seuil de convergence pour lequel la proposition lithologique après itération est jugée tout à fait satisfaisante est de $1 \cdot 10^{-3}$ (cas test n°2).

2 - Pour un degré moindre d'exigence, la coupe lithologique étant jugée acceptable, le seuil de convergence minimal est de $2 \cdot 10^{-2}$.

Compte tenu de notre utilisation ultérieure de la coupe lithologique ainsi établie, soit définir un intervalle de valeurs pressiométriques à partir des corrélations adaptées à la lithologie suivant la profondeur, puis le calcul de la portance du sol suivant les règles des DTU 13.12 et 13.2, un découpage très fin du milieu n'est pas nécessaire.

Pour cette raison nous choisirons un seuil de convergence de $2 \cdot 10^{-2}$.

7.3. Tests sur des signaux réels

Les signaux choisis ont été acquis sur un chantier à Ivry en bord de Seine (94) par la société Solen. Nous travaillerons sur les signaux de vitesse d'avance (VA) et de pression d'injection (Pi) d'un des forages de la campagne (Figure 35) [Rapport synthèse Me2i & al 00].

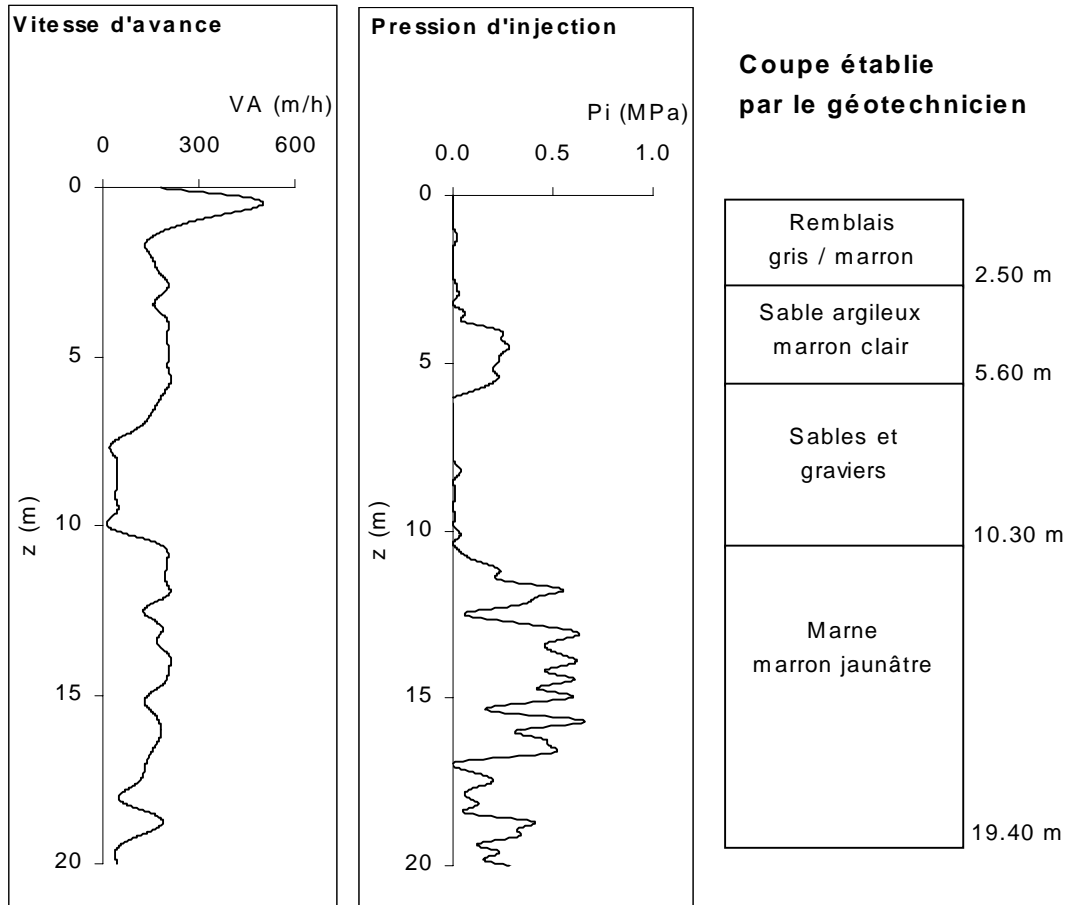


Figure 35 : Log. diagraphiques de la vitesse d'avance et de la pression d'injection pour le forage retenu

L'algorithme de proposition lithologique étant écrit pour 4 formations, nous limiterons les données jusqu'à la base de la 4^{ème} formation reconnue, soit 19.40 m de profondeur. Le géotechnicien relève, sous 2.50 m de matériaux de remblais caractérisés par une vitesse d'avance élevée, des sables argileux reconnus jusqu'à 5.60 m de profondeur, puis des sables et graviers identifiés jusqu'à 10.30 m. Cet ensemble surmonte des matériaux marneux pour lesquels la pression d'injection est plus élevée pour les autres matériaux.

7.3.1. Test sur le signal de Pi

Les données permettant d'initialiser l'algorithme sont les suivantes :

- Nombre de formations = 4.
- Les murs sont positionnés à 2.50 / 5.60 et 10.30 m de profondeur (ce qui correspond à la coupe proposée par le géotechnicien responsable du dossier).
- Une zone d'incertitude de 3.00 m et un nombre maximal d'itérations de 15.

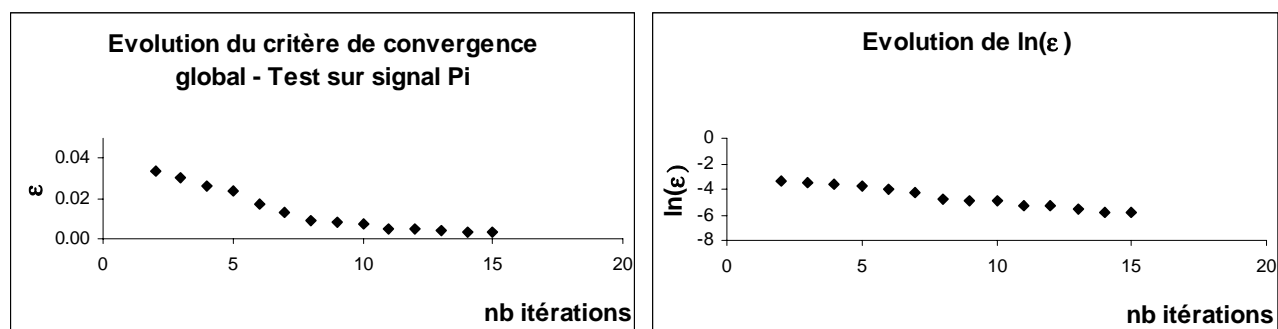


Figure 36 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itérations

Nous obtenons (Figure 36), la convergence régulière du processus.

Au regard du signal Pi, en posant l'hypothèse de l'existence de 4 formations, l'expert pourrait proposer les limites de couches à 3.70 / 6.00 et 10.50 m. Le géotechnicien responsable du dossier, possédant des éléments supplémentaires (les autres paramètres de forage par exemple) a posé les limites de couches à 2.50 / 5.60 et 10.30 m de profondeur (coupe Solen a priori).

Les moyennes, écart types et coefficients de variation sont reportés dans le suivant pour les deux découpages « experts ».

Pi	form1 (0.0 - 2.5 m)	form2 (2.5 - 5.6 m)	form3 (5.6 - 10.3)	form4(10.3 - 18.0m)	
m (MPa)	0.00	0.14	0.02	0.34	Coupe a priori selon Solen
sd (MPa)	0.01	0.10	0.03	0.20	
CV	2.14	0.72	2.17	0.59	
Pi	form1 (0.0 - 3.7 m)	form2 (3.7 - 6.0 m)	form3 (6.0 - 10.5)	form4(10.5 - 18.0m)	
m (MPa)	0.01	0.20	0.01	0.35	Coupe a priori selon Pi
sd (MPa)	0.02	0.07	0.01	0.19	
CV	1.53	0.35	1.55	0.56	

Tableau 6 :Tableau récapitulatif des moyennes (m), écart-type (sd) et coefficient de variation (CV) pour le paramètre Pi selon deux découpages lithologiques.

D'une manière générale, l'écart type du signal calculé pour les formations, définies intuitivement, sur le signal P_i , est moins important que celui obtenu pour les formations établies à partir de la coupe Solen. Cette constatation est tout à fait naturelle, dans le sens où « l'expert » aura tendance à découper le signal suivant des "blocs" présentant des caractéristiques similaires.

Au regard de l'information diagraphique portée par P_i , il ressort que les formations 1 et 3 présentent des réponses, vis à vis de P_i , très voisines. En ce sens, une lithologie plausible pour l'expert pourrait être :

- Formation 1 de 0 à 3.7 et de 6.0 à 10.5 m.
- Formation 2 de 3.7 à 6.0 m
- Formation 4 de 10.5 à 18.0 m.

Cependant, la formation 3 pourrait rester distincte selon l'interprétation géologique considérée par l'expert.

Les résultats obtenus sur les log de probabilité suivant le processus mis en œuvre fournissent une lithologie cohérente avec le signal diagraphique à partir de l'itération n°6 (Figure 37). ($\epsilon_{(it\ 6)} = 2.10^{-2}$).

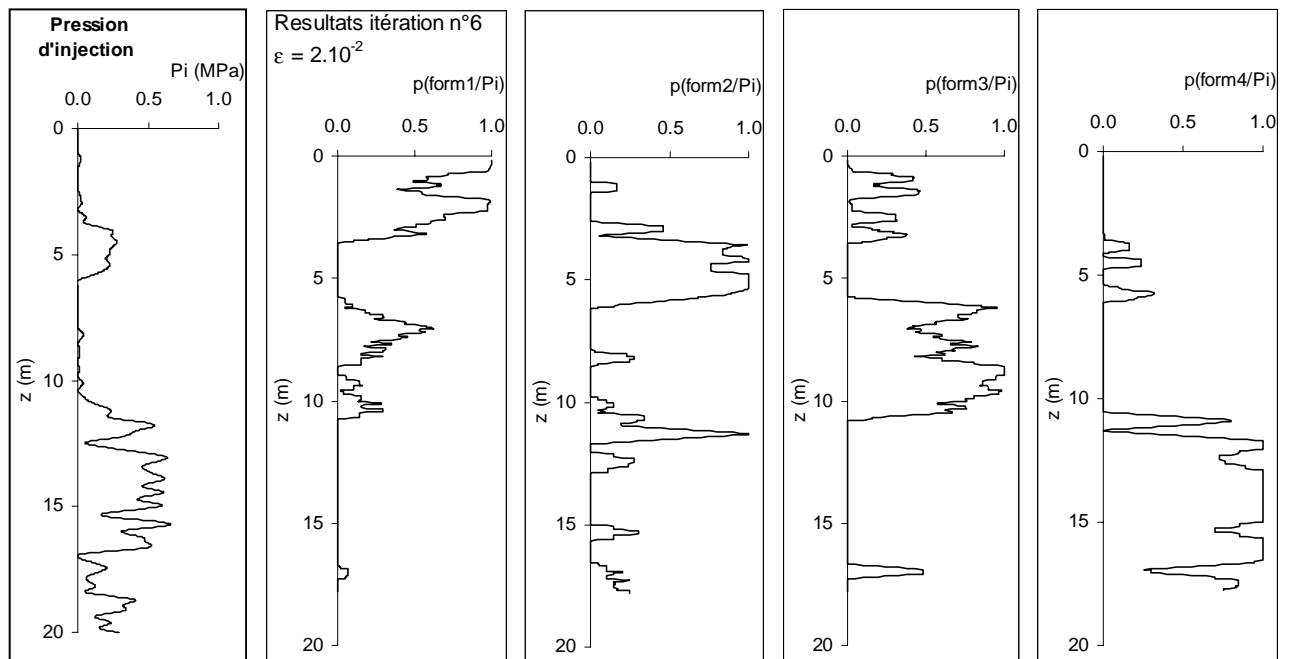


Figure 37 : Log des probabilités lithologiques obtenus à l'itération n°6 et signal de P_i étudié.

Au regard des probabilités obtenues, $p(\text{form1}/P_i)$ est prédominante jusqu'à 3.30 m, elle est de l'ordre 0.3 - 0.4 entre 6.50 et 8.30 m

$p(\text{form2}/P_i) > 0.5$ entre 3.50 et 5.90 m. La formation 3 est clairement identifiée entre 6.00 et 10.60 m

$p(\text{form}4/\text{Pi})$ prédomine au-delà de 10.80 m et jusqu'à la fin du signal testé, soit 18 mètres.

Notons qu'au fil des itérations, entre 6.50 et 8.50 m, $p(\text{form}1/\text{Pi})$ devient plus importante au détriment de $p(\text{form}3/\text{Pi})$, toutefois, la formation 3 demeure prépondérante.

Au niveau du seuil de convergence fixé ($2 \cdot 10^{-2}$), la proposition lithologique obtenue est satisfaisante au sens où elle est en accord avec l'information portée par le signal de Pi.

7.3.2. Test sur le signal VA

Les données de départ sont les mêmes que celles proposées dans le processus utilisant le signal Pi, soit la coupe proposée par le géotechnicien responsable du dossier.

Le signal de VA est discriminant vis à vis des formations 1 et 3, il doit permettre la distinction entre ces deux formations.

Le processus est convergent, il est donc légitime d'interpréter les résultats (Figure 38).

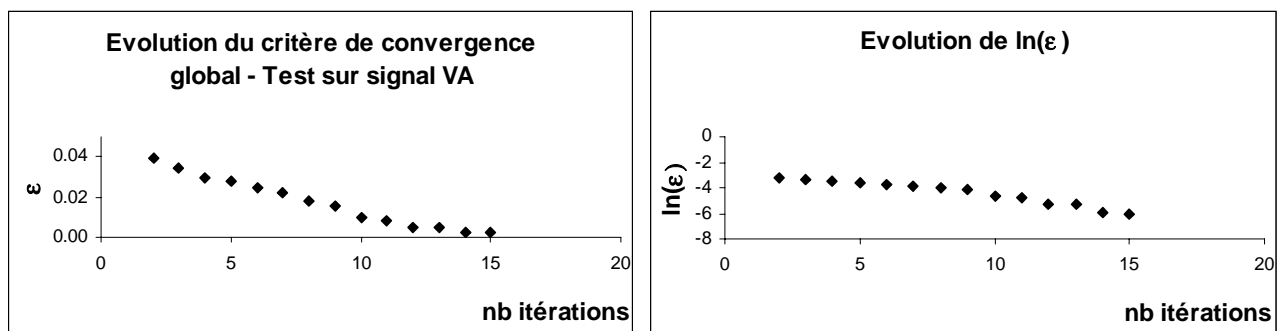


Figure 38 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itérations - Signal de VA

L'examen visuel du signal de VA permet de proposer la coupe lithologique intuitive a priori suivante :

- Jusqu'à environ 1.5 - 2.0 m de profondeur, le signal caractérise la formation 1
- de 2.0 à 7.20 m : formation 2
- de 7.20 à 10.30 m : formation 3
- de 10.30 jusqu'à 18 m, formation 4

Pour un seuil de convergence de $2 \cdot 10^{-2}$, l'itération 7 propose une lithologie en accord avec la coupe intuitive établie à partir du signal de VA. (Figure 39).

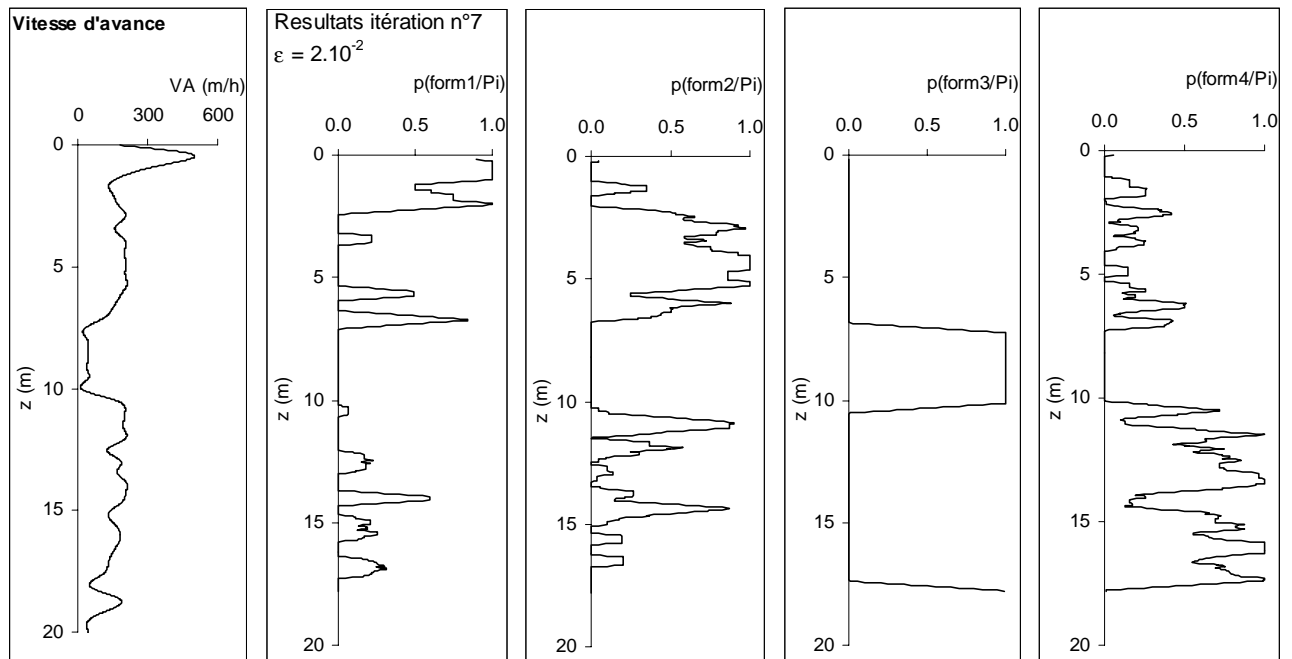


Figure 39 : Log probabilités lithologiques obtenus à partir du signal de VA - Itération n°7.

Le processus itératif conduit à la coupe suivante :

Formation 1 de 0.00 à 2.20 m

Formation 2 de 2.7 à 6.0 m, notons que $p(\text{form2}/VA)$ n'est pas négligeable entre 10,70 et 14.7 m et interfère avec $p(\text{form4}/VA)$. Ce résultat est tout à fait plausible compte tenu des valeurs de VA enregistrées. Le géologue devra alors faire la part entre la possibilité d'une formation 2 ou d'une formation 4.

Formation 3 de 7.0 à 10.3 m et en fin de sondage à partir de 17.6 m.

Formation 4 entre 10.3 et 17.6 m.

7.3.3. Test sur la combinaison des signaux VA Pi :

Jusqu'à présent, les log des probabilités lithologiques étaient obtenus, soit à partir du signal de Pi, soit à partir du signal de VA. Ce cas test, mêlant l'information provenant des deux signaux, permettra d'une part de tester le comportement du critère de convergence lorsque le processus itératif tient compte de deux signaux diagraphiques et d'apprécier, d'autre part, la qualité du découpage lithologique produit au terme du processus intégrant l'information diagraphique portée par deux indicateurs (VA et Pi).

Les données de base restent inchangées par rapport aux tests précédents.

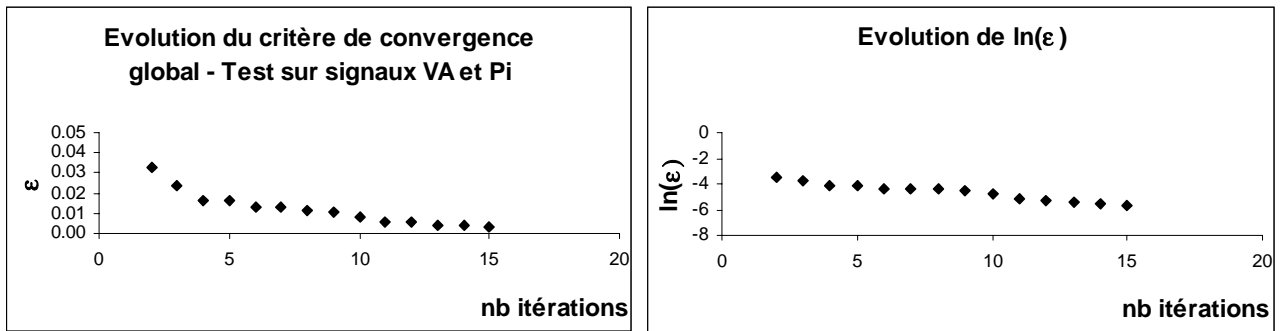


Figure 40 : Evolution du critère de convergence en fonction du nombre d'itération - Signaux VAPi.

Comme sur l'ensemble des tests précédents, l'algorithme est convergent (Figure 40).

Le processus prend en compte successivement le signal VA, pour les itérations impaires puis le signal Pi pour les itérations paires. Il convient donc de considérer les résultats obtenus pour les itérations paires au terme desquelles les deux signaux ont exercé sur le résultat une influence égale.

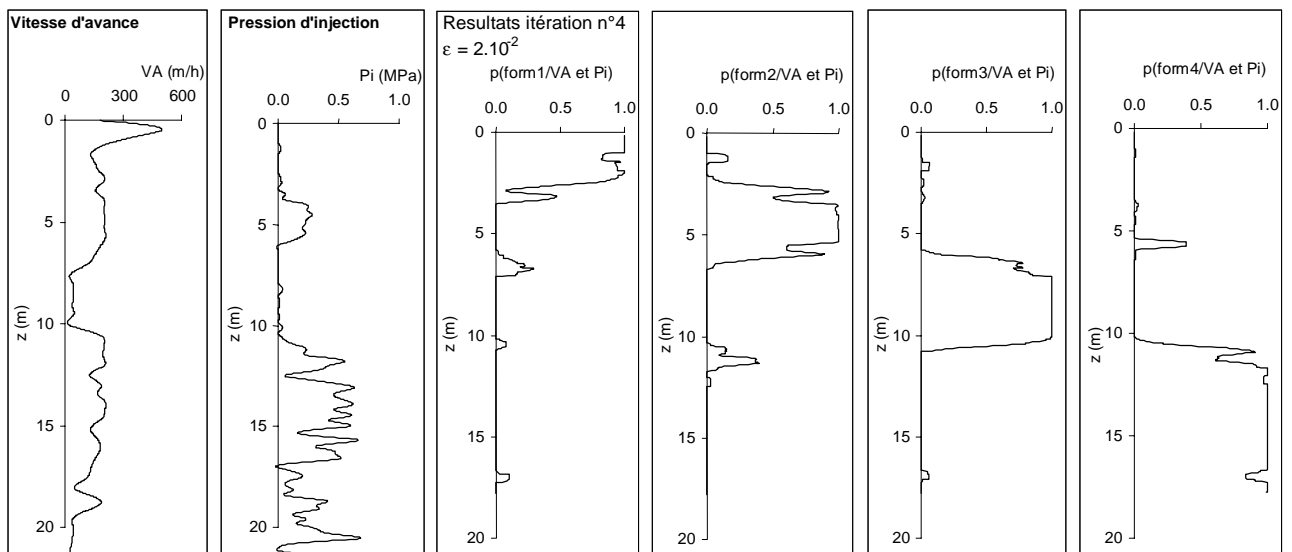


Figure 41 : Log des probabilités lithologiques obtenus pour l'itération n°4 - Signaux VAPi

Pour un seuil de convergence de convergence de 2.10^{-2} , nous retenons l'itération n°4. La solution obtenue est conforme aux informations portées par les signaux diagaphiques.

L'utilisation des signaux VA et Pi permet de lever l'ambiguïté sur la nature des formations et notamment sur la formation 2, qui n'apparaît plus qu'au-delà de 11.50 m où le processus privilégie clairement la formation 4. Notons que l'ordre de considération des signaux diagaphiques VAPi ou PiVA n'a pas d'impact sur le résultat obtenu.

L'utilisation du processus algorithmique, sur un signal synthétique peu bruité et sur des signaux réels a permis d'obtenir des résultats cohérents avec l'information portée par les signaux diagraphiques. Il permet de retrouver les limites de couches malgré une information de départ fausse.

L'utilisation combinée de deux signaux diagraphiques s'est donc révélée utile et a permis de distinguer deux formations présentant une réponse similaire vis à vis du paramètre de forage "Vitesse d'avance" mais différente vis à vis de la pression d'injection P_i .

L'obtention d'une lithologie probabilisée est un processus original dans la démarche du géotechnicien. Dans la suite de la méthodologie il va permettre de considérer, suivant la profondeur, différentes équations de régression tout en pondérant leur influence sur le résultat pressiométrique estimé.

Choix d'un seuil de convergence de référence :

Le choix d'un seuil de convergence égal à $2 \cdot 10^{-2}$, établi tout d'abord sur les cas test pour un signal synthétique peu bruité et appliqué ensuite sur des signaux réels s'est révélé satisfaisant, dans le sens où les propositions lithologiques obtenues pour ce seuil de convergence étaient cohérentes avec les log. des signaux diagraphiques testés.

C'est ce seuil de convergence que nous appliquerons à l'ensemble des forages testés ultérieurement, notamment pour les forages du site expérimental de l'IUT, traités dans la troisième partie du document.

Chapitre III -

Exploitation des résultats et évaluation de la sécurité

1. Construction d'un intervalle de valeurs pressiométriques probables

L'estimation d'un intervalle de valeurs pressiométriques probable permet au géotechnicien d'apprécier si le profil pressiométrique mesuré in situ est compatible avec les mesures attendues, cohérent avec les enregistrements de paramètres de forage. Cette démarche permet de prendre conscience que le profil mesuré n'est qu'une réalisation particulière des valeurs pressiométriques probables, potentiellement mesurables sur le site.

1.1. Estimation d'un intervalle de valeurs pressiométriques probables

Afin d'obtenir une image plus riche des caractéristiques pressiométriques du site, à partir :

- du log. des probabilités lithologiques obtenu à l'issu du processus algorithmique permettant de proposer une coupe lithologique plus conforme aux informations diagraphiques.
- de la mise en œuvre des équations de régression variables selon la nature lithologique, nous calculons, pour chaque forage exécuté sur le site et tous les centimètres (pas d'acquisition des données diagraphiques) :
 - le profil moyen probable des p_f^* (pression de fluage) (équation 23). C'est-à-dire des valeurs de p_f^* issues des équations de régression sans tenir compte des résidus,
 - l'enveloppe des valeurs pressiométriques probables pour un niveau de confiance de $(1-\alpha)$. (équation 24). Il s'agit de l'intervalle des valeurs probables de p_f^* (limites inférieure et supérieure des valeurs probables).

L'influence des équations de régression est pondérée par les probabilités d'appartenance aux formations i . Ceci implique qu'un individu peut être plus ou moins influencé par les caractéristiques correspondantes à plusieurs lithologies.

Plusieurs points de vue peuvent être adoptés par l'utilisateur, ce qui modulera, en conséquence, les résultats pressiométriques obtenus. Ainsi on distinguera :

- les probabilités globales d'occurrence des formations i , c'est à dire la probabilité de rencontrer une formation i à une profondeur z . Elles sont établies suivant la profondeur à partir d'une image globale du site. Ainsi, la lithologie considérée est la même pour tous les forages, nous noterons ces probabilités "globales" $p(\text{form}_i)_z$.
- les probabilités locales d'appartenance aux formations i sont établies pour chaque forage, elles sont notées $p(\text{form}_i)_{xz}$. Elles peuvent être établies à partir :
 - de la coupe donnée par le sondeur
 - de la coupe établie par le géotechnicien au regard des informations pressiométriques par exemple
 - du processus de découpage suivant l'algorithme proposé au chapitre II de cette même partie.

L'impact du choix lithologique, c'est à dire considérer la lithologie à l'échelle du site ou à l'échelle du forage, en tenant compte ou pas de l'information diagraphique sera traité dans la quatrième partie de ce document sur les résultats obtenus sur le site expérimental de l'IUT de Génie Civil de Bordeaux I.

Au stade actuel de notre propos, $p(\text{form}_i)_z$, $p(\text{form}_i)_{xz}$ seront notés indifféremment $p(\text{form}_i)$.

Lorsque $i = 1$ (une seule formation), nous calculons :

$$pf^*_{\text{moyen}} = e (a \ln(D1) + b)$$

$$pf^*_{\text{inf}} = [e (a \ln(D1) + b)] - u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_\varepsilon$$

$$pf^*_{\text{sup}} = [e (a \ln(D1) + b)] + u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_\varepsilon$$

avec :

$\ln(D1)$ = paramètre de forage explicatif de $\ln(pf^*)$.

σ_ε = écart-type des résidus relatifs à la droite de régression établie pour le nuage de points $\ln(pf^*) = \text{fn}(\ln(D1))$ (équation 25).

Pour i formations, il convient d'utiliser suivant la profondeur la relation adéquate à la nature des matériaux traversés. Ainsi, utilisant les résultats obtenus via le processus permettant l'établissement d'un log des probabilités d'appartenance à la formation i suivant la profondeur (Partie II), i corrélations (chaque nature de sol est caractérisée par une relation spécifique) interviennent alors dans le calcul de pf^* et de ses limites.

A chaque profondeur z, les i équations de corrélation sont pondérées par la probabilité d'appartenance à la formation correspondante.

Lorsque i est supérieur à 1 (plusieurs formations), le paramètre de forage explicatif des $\ln(pf^*)$, n'est pas forcément le même pour les différentes formations, nous le noterons donc D_j .

Le calcul de l'intervalle de valeurs pressiométriques, pour un niveau de confiance de $(1-\alpha)$, suit alors équation 23 et équation 24.

$$pf^*_{moyen} = \sum_{i=1}^{NF} e(a_{form_i} \ln(D_j) + b_{form_i}) \cdot p(form_i) \quad \text{équation 23}$$

et

$$pf^*_{inf} = \sum_{i=1}^{NF} e[(a_{form_i} \ln(D_j) + b_{form_i}) - u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_{\varepsilon.form_i}] \cdot p(form_i)$$

$$pf^*_{sup} = \sum_{i=1}^{NF} e[(a_{form_i} \ln(D_j) + b_{form_i}) + u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_{\varepsilon.form_i}] \cdot p(form_i) \quad \text{équation 24}$$

A ce stade du processus, nous parvenons à estimer, en chaque point d'investigation, à partir des signaux diagraphiques explicatifs et selon la nature lithologique des matériaux traversés, un intervalle de valeurs probables pour le paramètre pressiométrique considéré (pf^* dans notre exemple). Le géotechnicien peut replacer dans cet intervalle le profil pressiométrique effectivement mesuré, qui ne constitue qu'une réalisation particulière des valeurs possibles de pf^* .

L'organigramme ci-après permet de re-situer la succession des différentes étapes de notre démarche et de préciser le niveau d'implication du choix lithologique (Figure 42).

Démarche proposée - Détail des étapes

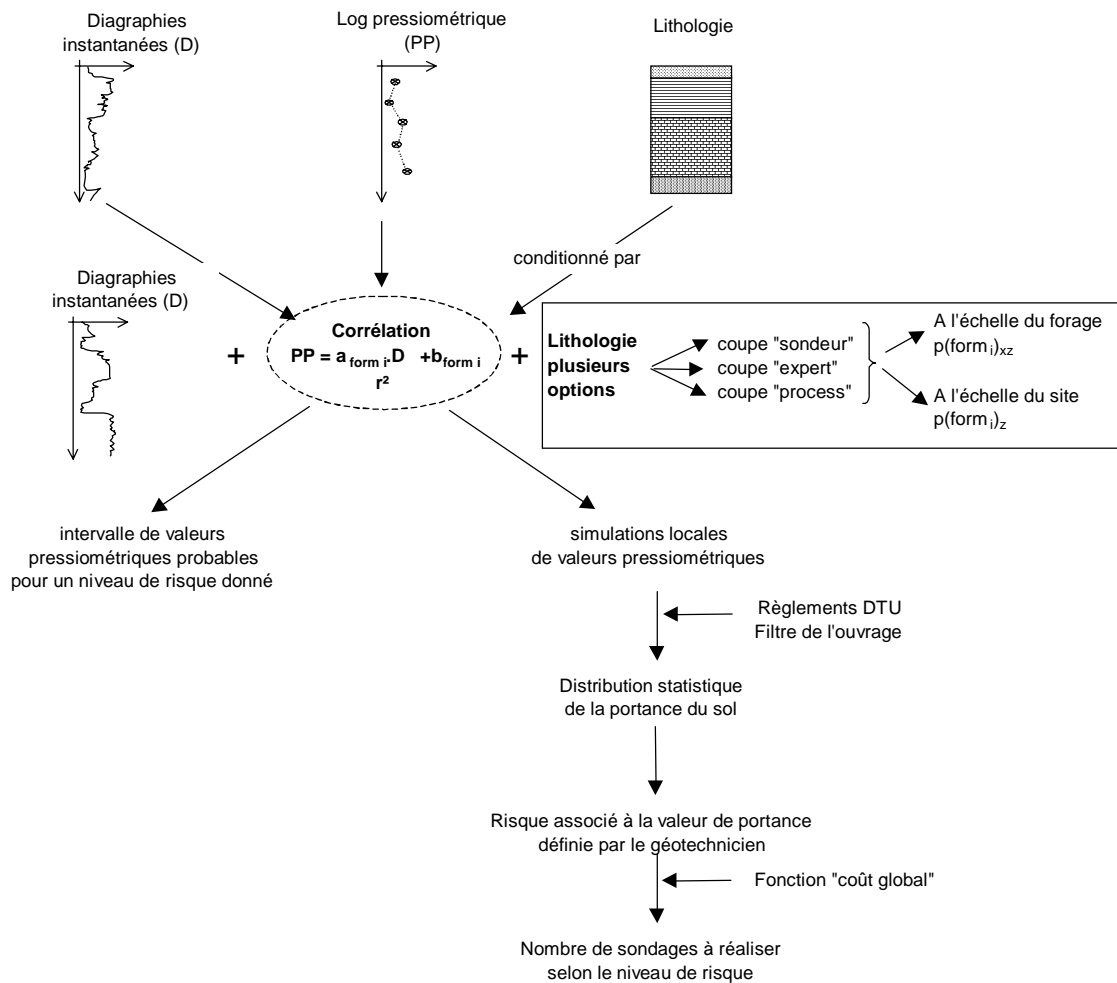


Figure 42 : Organigramme des différentes étapes de la procédure et niveau d'implication du choix lithologique.

1.2. Génération de profils pressiométriques virtuels statistiquement représentatifs du site

La génération de profils pressiométriques statistiquement représentatifs du site permet d'appliquer sur des profils virtuels les règles de calcul usuelles utilisées en bureaux d'études géotechniques et de construire à partir de cet ensemble, la fonction de répartition de la portance du sol. C'est un moyen de multiplier artificiellement le nombre de valeurs pressiométriques en se basant sur l'information diagraphique et en respectant les paramètres statistiques des mesures pressiométriques réalisées in situ.

Nous générons un ensemble fini de profils pressiométriques possibles, statistiquement représentatifs du site d'étude. En pratique, nous simulons $NP = 50$ profils pressiométriques virtuels par point de sondage.

Ainsi, pour un site S, les rapports de forage permettent de dégager, par exemple, deux formations majeures A et B.

Supposons qu'au sein de la formation A, la régression établie à partir des mesures est de la forme : $\ln(pf^*)_A = a_A \ln(D1) + b_A + \varepsilon_A$, avec un coefficient de corrélation r_A .

Pour la formation B, la relation fonctionnelle entre $\ln(pf^*)$ et $\ln(D2)$ suit l'équation $\ln(pf^*)_B = a_B \ln(D2) + b_B + \varepsilon_B$ et un coefficient de corrélation r_B .

avec :

pf^* = pression de fluage nette

D1, respectivement D2, = paramètre ou combinaison de paramètres de forage explicatif de pf^* dans la formation A, respectivement dans la formation B.

ε_A , respectivement ε_B = résidus relatifs à la régression dans la formation A, respectivement dans la formation B.

La corrélation établie entre paramètre pressiométrique (ici pression de fluage pf^*) et paramètre de forage n'est pas parfaite et les points de mesure n'appartiennent pas tous à la droite de régression. La prise en compte de cet écart, entre valeurs mesurées et valeurs constitutives de la droite (valeurs générées par le modèle), est réalisée par la simulation de NP profils pressiométriques particuliers prenant en compte les résidus ε_A et ε_B .

Nous posons comme hypothèse que la distribution des résidus est gaussienne centrée dans $\ln(pf^*) = f(\ln(D_1))$.

- de moyenne nulle, $\overline{\varepsilon_A} = \overline{\varepsilon_B} = 0$ et
- d'écart type $\sigma_{\varepsilon_A} = \sigma_{\ln(pf^*)_A} \sqrt{(1 - r_A^2)}$, respectivement

$$\sigma_{\varepsilon_B} = \sigma_{\ln(pf^*)_B} \sqrt{(1 - r_B^2)} \quad \text{équation 25}$$

A chaque cote z, nous disposons de l'ensemble des probabilités d'appartenance aux i formations considérées et la génération de valeurs de pf^* suit l'équation 26.

$$pf^* = \sum p(form_i) \cdot e^{(\ln(pf^*)_{form_i})} \quad \text{équation 26}$$

Nous pouvons générer ainsi une série de profils pressiométriques virtuels par sondage diagraphique (dans notre application, génération de 50 profils virtuels par sondage diagraphique réalisés). La génération des valeurs pressiométriques virtuelles peut être conduite suivant le pas de mesure désiré, tous les mètres (pas de la mesure

pressiométrique) ou tous les centimètres (pas de mesure des diagraphies instantanées pour l'appareillage Explofor de la société Apagéo).

Toutefois, notre but étant de confronter les profils simulés aux calculs géotechniques suivant les méthodes classiques recommandées dans les documents techniques unifiés (DTU 13.12 pour les fondations superficielles et DTU 13.2 pour les fondations profondes), la considération des valeurs générées tous les mètres reste plus appropriée.

Ajoutons quelques précisions :

- Ce sont les corrélations retenues comme significatives entre diagraphies instantanées et paramètres pressiométriques qui conditionnent les paramètres de forage à prendre en compte comme base d'estimation du paramètre pressiométrique considéré.
- Les paramètres de forage retenus comme paramètres explicatifs dans les équations de régression ne sont pas nécessairement identiques à ceux utilisés pour l'établissement d'une lithologie probable, (processus itératif décrit au chapitre II de cette même partie).
- Le calcul des paramètres pressiométriques, (pression de fluage par exemple), est obtenu à partir des données diagraphiques lissées par une moyenne glissante opérant sur une fenêtre de 0.40 m, afin de rester homogène avec le volume de sol intéressé par l'essai pressiométrique et le mode de construction de la matrice des données servant à établir les corrélations (chapitre I de cette même partie).

1.3. Exemples de résultats

Un exemple d'intervalle de valeurs probables calculé pour un niveau de confiance de 0.8 et un ensemble de profils pressiométriques simulés est présenté en Figure 43. Il s'agit d'un forage issu du site de l'IUT de Génie Civil de Bordeaux I (voir étude détaillée en partie III).

Les équations de régression ont été établies pour les matériaux A (matériaux argilo-limono-sableux de couverture) et C (marno-calcaire altérés) sur un ensemble de forages. Elles ne sont donc pas spécialement calées sur ce forage.

Au sein des matériaux A (N= 21) :

$$\ln pf^* = - 0.83 \ln(VA) + 2.74 \quad r^2 = 0.40,$$

la régression est jugée significative pour un niveau de confiance de 0.900.

Au sein des matériaux C (N= 13) :

$$\ln pf^* = - 0.47 \ln(VA) + 2.51 \quad r^2 = 0.13,$$

la relation entre $\ln(pf^*)$ et $\ln(VA)$ n'est justifiée que pour un niveau de probabilité de 0.750, ce qui explique la plage étendue de l'enveloppe des valeurs probables de pf^* au sein des matériaux C entre 4.00 et 11.50 m environ.

Notons que pour la lisibilité du graphique, seuls quelques profils virtuels sont représentés.

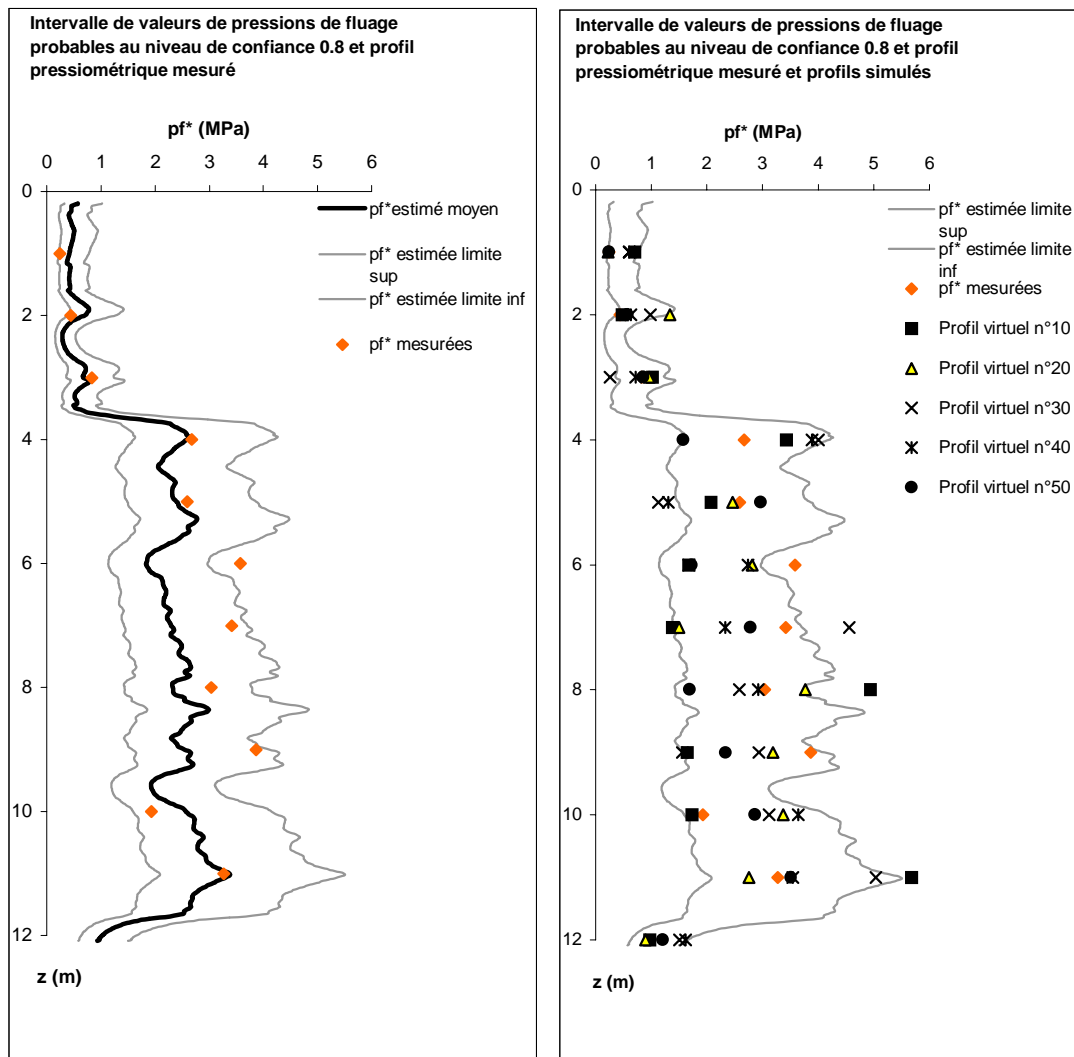


Figure 43 : Détermination de l'intervalle des valeurs probables de pf^* pour un niveau de confiance de 0.8 et génération de profils pressiométriques virtuels.

L'examen de la Figure 43 permet de faire les remarques suivantes :

- l'intervalle de valeurs de pf^* semble "large" mais reste tout à fait compatible avec les mesures, les profils virtuels sont tout aussi plausibles que le profil pressiométrique mesuré,
- les NP profils virtuels particuliers vont être utilisés pour les estimations du risque associé à la valeur calculée par l'ingénieur suivant les règles des DTU qui se prêtent mal à une analyse de variables continues.

Le processus de génération des valeurs pressiométriques considère ici, qu'au sein d'un forage deux valeurs pressiométriques successives ne sont pas corrélées. Nous verrons dans la partie IV, que le calcul du variogramme des pf^* suivant l'axe z permet en fait de définir une distance de corrélation de l'ordre de 3 mètres.

La génération des profils pressiométriques, telle que nous l'avons conçue ne permet pas de reproduire directement cette répartition spatiale des données. La distance de corrélation des données générées est fonction de la structure spatiale du paramètre de forage initial et de la distribution des résidus attachés à chaque valeur pressiométrique.

A ce stade de la procédure nous avons établi des corrélations entre paramètres de forage et paramètres pressiométriques, ces dernières étant fonction, notamment de la lithologie, nous établissons un log. lithologique probable conforme aux informations diagraphiques. Ainsi, le long d'un forage destructif, en tout point, nous calculons l'ensemble des probabilités des formations considérées par le géotechnicien.

Ces log. de probabilités ont pour objet de pondérer l'influence des différentes équations de régression au sein du forage. En ce sens, en chaque point constitutif du forage, l'estimation de l'intervalle pressiométrique prend en compte l'ensemble des équations de régression avec un poids plus ou moins important selon la prédominance lithologique obtenue à cette profondeur.

L'intervalle de valeurs pressiométriques calculé pour un niveau de risque donné permet de visualiser l'amplitude des valeurs pressiométriques possibles le long du forage, de replacer les mesures pressiométriques au sein de cet intervalle et d'apprécier la cohérence des valeurs mesurées avec les résultats des enregistrements de paramètres de forage.

La génération de profils virtuels particuliers permet de se replacer dans le cadre traditionnel du calcul de la portance du sol utilisé aujourd'hui en bureau d'études et de passer à l'estimation du risque attaché à toute valeur de portance.

2. Justification des fondations et sécurité

2.1. Distribution de la portance du sol pour le site et la fondation considérés

Pour chaque forage du site, nous appliquons les règles de calcul préconisées dans les DTU, pour le calcul de la contrainte ultime dans le cas d'une fondation superficielle et la détermination de la charge nominale pour une fondation profonde. La volonté de se placer dans un contexte d'utilisation en bureau d'études et donc l'application aux règles de calcul préconisées dans les DTU ou fascicule 62 utilisant abaques et tableaux (cf. partie I) a pu être réalisée sur les profils pressiométriques virtuels.

La considération de l'ensemble des résultats obtenus pour les deux types de fondation permet de tracer les fonctions de répartition de la portance du sol relative au site, fonction de répartition des contraintes ultimes (q_u) calculées pour les hypothèses retenues (niveau d'assise et géométrie de la semelle) et fonction de répartition des charges nominales (Q_n) pour une fondation profonde déterminée par le géotechnicien.

Les procédures de calcul et les équations relatives aux calculs de q_u et Q_n sont reportées en annexe 14.

La fonction de répartition peut être utilisée, par le maître d'ouvrage ou le géotechnicien, à deux niveaux :

- elle constitue un outil permettant de comparer la distribution des probabilités des capacités portantes vraies attachées au site ($q_{réelle}$) et la valeur donnée par le géotechnicien ($q_u/3_{ing}$). (valeur géotechnicien = valeur obtenue à partir des porfils mesurés).

Nous posons que lorsque $q_u/3_{ing} > q_{réel}$, il y a défaillance.

- elle permet l'accès à une valeur de portance du sol raisonnée (q_{ref}) correspondant à un risque donné (p_{ref}). Autrement dit, la probabilité que la portance réelle du sol ($q_{réelle}$) soit inférieure à (q_{ref}) est égale à (p_{ref}).

$$p(q_{réelle} < q_{ref}) = p_{ref} \quad \text{équation 27}$$

La valeur de p_{ref} peut appartenir à la fonction de répartition, c'est le domaine d'interpolation (p_{ref} de l'ordre de 10^{-2}) ou bien, pour des valeurs beaucoup plus faibles, se situer dans le domaine d'extrapolation de la courbe (p_{ref} de l'ordre de 10^{-3}).

La simulation de NP profils pressiométriques compatibles avec les informations diagraphiques et pressiométriques acquises in situ permet de construire la fonction de répartition de la portance du sol pour le site et le système de fondation étudiés. La modélisation de la queue de la fonction de répartition permet d'accéder aux valeurs de p_{ref} et q_{ref} .

Afin d'assurer la stabilité de la valeur de q_{ref} selon le nombre de forages constitutifs du site (NP profils simulés multiplié par Nb points de sondage = N), le calage du modèle de régression de la queue de la fonction de répartition de q_u , doit être effectué sur un nombre de points correspondant à un pourcentage de N. Dans notre cas, nous avons choisi de considérer le fractile à 10% pour établir la régression modélisant la queue de distribution.

Pour illustrer notre propos nous présenterons la fonction de répartition de la contrainte ultime obtenue pour un site fictif constitué de 100 profils pressiométriques générés.

Le site fictif est généré à partir de profils diagraphiques simulés suivant une loi normale de moyenne $[m(\ln(D_{1}))]$ et d'écart type $[sd(\ln(D_{1}))]$ et d'une équation de régression reliant le paramètre pressiométrique considéré (pf^* par exemple) et le paramètre diagraphique généré avec un certain coefficient de corrélation.

Pour chaque profil pressiométrique obtenu, la contrainte ultime q_u relative à une fondation de base $B = 0.70$ m et dont le niveau d'assise sera porté à 2.9 m de profondeur est calculée suivant les règles du DTU 13. 12 de mars 1988.

Ainsi, à chaque configuration de fondation est associée une fonction de répartition de portance particulière.

Afin de simuler un site dans lequel une zone de caractéristiques médiocres couvrent 10% de la surface, 1000 valeurs de q_u calculées à partir des 1000 profils pressiométriques, par des valeurs de q_u quatre fois inférieures celles normalement obtenues pour un site homogène.

Pour l'exemple, la simulation d'une forte hétérogénéité locale a été directement construite à partir des valeurs de q_u . D'un point de vue formel, il aurait été plus correct de simuler deux populations de pf^* et de réaliser ensuite les calculs de q_u selon les règles en vigueur. Cependant, notre objectif étant d'expliciter comment nous proposons d'estimer le niveau de sécurité pour une valeur de calcul donnée, le mode de simulation du site est ici sans conséquence.

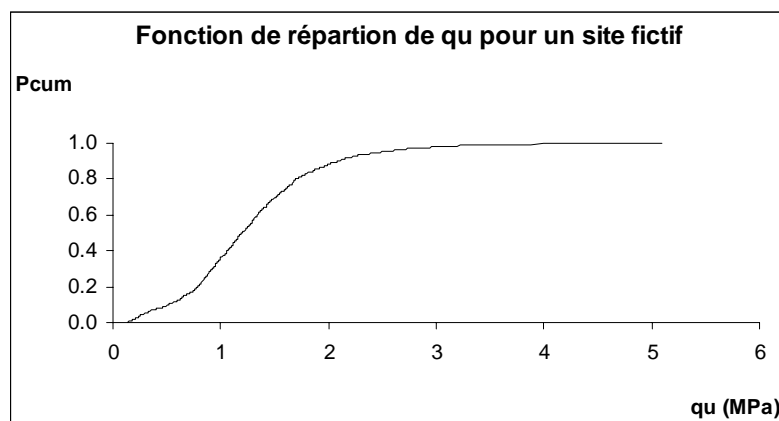


Figure 44 : Fonction de répartition de la contrainte ultime q_u pour un site fictif et une fondation superficielle donnée.

2.2. Estimation de la sécurité attachée à une valeur de calcul

Afin d'appréhender les valeurs de contrainte ultime (q_u) ou de charge nominale (Q_n) affectées d'un coefficient de sécurité et pouvoir replacer la valeur ingénieur sur la courbe des probabilités cumulées de la portance du sol relative au site et à la fondation étudiés, nous proposons d'extrapoler la queue de distribution de la fonction de répartition de la portance du sol par un modèle de forme exponentielle. (équation 28 et équation 29)

dans le cas d'une fondation superficielle

$$P_{cum} = a e^{-b \cdot (q_u)} \quad \text{équation 28}$$

dans le cas d'une fondation profonde

$$P_{cum} = a' e^{b \cdot (Q_n)}$$

équation 29

L'extrapolation est réalisée à partir d'un ensemble de valeurs correspondant au fractile à 10% formant la queue de distribution. La forme exponentielle du modèle est justifiée par la forme de la queue de distribution des fonctions de répartition calculées et la volonté de ne générer que des valeurs positives, seules à avoir un sens physique.

L'utilisation d'une fonction exponentielle comme modèle d'extrapolation de la courbe de répartition de la portance du sol, ne constitue qu'une approche grossière du problème de l'estimation des valeurs extrêmes, qui généralement se modélisent par des distributions de Gumbel, de Fréchet ou de Weibull, ou des exponentielles d'exponentielle [Lan-Chih Ho & al 00], [Jureckova 00].

Il conviendra donc de rester très prudent dans l'interprétation quantitative des résultats et vérifier que l'on se trouve de préférence dans le domaine d'interpolation des données ou du moins ne pas trop s'en éloigner. La modélisation proposée n'est pas suffisante pour accéder aux très faibles niveaux de risque.

L'extrapolation de la fonction de répartition pour les faibles valeurs de q_u calculées pour le site fictif est présentée sur la Figure 45.

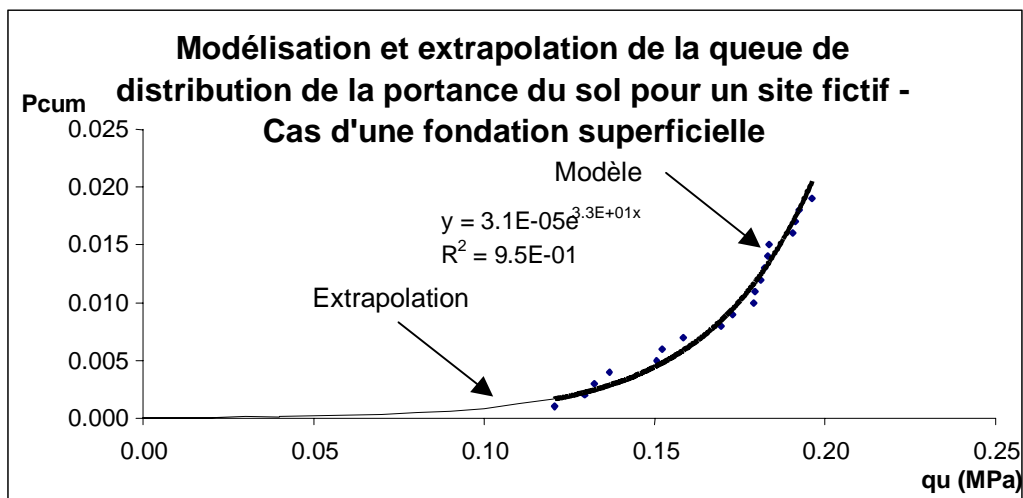


Figure 45 : Extrapolation par une fonction exponentielle de la fonction de répartition dans le domaine des faibles valeurs de q_u .

La fonction de répartition calculée représente une image du site, sur laquelle on peut reporter la valeur de q_u ingénieur. C'est-à-dire la valeur à laquelle parvient un ingénieur expert en appliquant les règles de calcul en vigueur au cas considéré et en intégrant le niveau de sécurité usuel, $q_u/2$ ou $q_u/3$ (en d'autres termes la valeur de la contrainte ultime affectée d'un coefficient partiel de sécurité). Celle-ci peut être calculée à partir d'un nouveau

forage réalisé sur le site ou établie à partir d'un point de reconnaissance ayant servi à la construction de la base de données relative au site.

Ainsi, la partie extrapolée de la courbe permet d'obtenir des valeurs de portance du sol pour un risque très faible et inversement de connaître le risque associé à toute valeur donnée par le géotechnicien. On peut ainsi attacher un degré de fiabilité à toute valeur choisie pour le projet : $p(q_{réelle} \leq q_{choix})$ y compris pour les faibles valeurs de probabilité que les simulations ne permettent pas d'atteindre, sous réserve de mieux adapter le modèle d'extrapolation.

Supposons par exemple qu'à partir d'un sondage disponible, l'ingénieur trouve $q_u = 0.20$ MPa, soit une valeur de q_{ELU} de 0.10 MPa (valeur de x). On peut estimer la probabilité de rupture à :

$$3.1 \cdot 10^{-5} \cdot e^{33 \cdot 0.10} = 8.4 \cdot 10^{-4}$$

A l'inverse, choisir un degré de fiabilité implique la définition de q_{ELU} correspondant pour ce site (Figure 46).

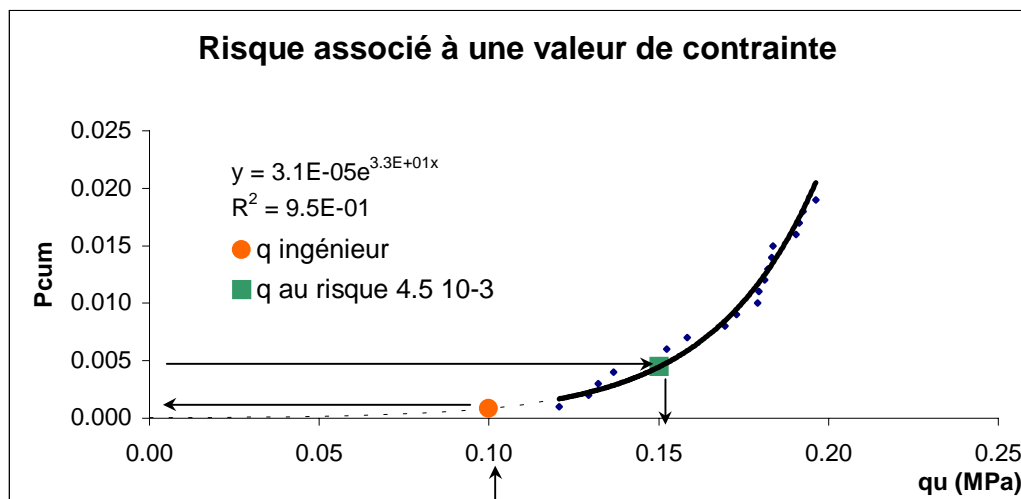


Figure 46 : Lecture du risque associé à la valeur géotechnique et définition d'une valeur géotechnique pour un risque donné.

Le calcul de valeurs géotechniques, par exemple la portance du sol, suivant les règles préconisées dans les DTU et utilisées en bureaux d'études, a été réalisé sur un grand nombre de profils pressiométriques virtuels générés à partir de log diagraphiques et de relations fonctionnelles dont l'influence varie suivant la profondeur z par pondération suivant la lithologie.

L'effectif des valeurs particulières de portance du sol obtenu pour le site, est beaucoup plus grand que celui des seuls profils mesurés et intègre l'information portée par les signaux diagraphiques à deux niveaux, lors de l'établissement d'une lithologie probable et lors de la mise en œuvre des équations de régression.

La fonction de répartition établie, pour un site et une fondation spécifiques permet

- d'estimer la fiabilité associée à la valeur de calcul définie par l'ingénieur, c'est à dire la valeur affectée d'un coefficient de sécurité de 2 ou 3, aux états limites ultimes, respectivement aux états limites de service
- et inversement, de définir la contrainte attachée à un niveau de risque donné.

A partir d'un nombre limité de sondages pressiométriques, la méthodologie proposée présente l'avantage de donner au géotechnicien les outils lui permettant d'enrichir la vision partielle du site dont il dispose en combinant l'information pressiométrique et les données diagraphiques, d'estimer à partir de ces dernières un intervalle de valeurs pressiométriques probable et enfin d'estimer le risque attaché à la valeur qu'il fournit au maître d'œuvre.

La détermination du risque associé à toute valeur de portance du sol, calculée selon les modes traditionnels, est obtenue au terme des différentes étapes de la méthodologie mise en œuvre. A partir du risque ainsi défini, nous verrons comment utiliser les outils développés sur les données issues d'un site expérimental, quels seront les enseignements que nous pourrons en tirer et dans quelle mesure la méthode peut être utilisée sur un chantier réel.

En fin du processus et à partir du risque associé à une valeur géotechnique nous proposons de définir le nombre optimal de sondages mettant en balance risque de défaillance du sol et coût des dommages.

3. Optimisation de la campagne de reconnaissance pour un niveau de fiabilité fixé

3.1. Méthode

Le prolongement naturel de la méthodologie exposée vient dans la détermination du nombre optimal de points de sondages à exécuter pour un niveau donné de fiabilité.

Cette nouvelle étape ne constitue ici qu'une approche simplifiée du problème et utilise l'estimation du risque de défaillance d'une fondation lié à un défaut de portance du sol, autrement dit, la probabilité que la valeur préconisée par l'ingénieur soit supérieure à la capacité portante réelle du sol $p(q_u/3_{ing} > q_{réelle})$ (chapitre III de cette même partie, § 2).

L'estimation du nombre optimal de sondages telle que nous l'envisageons sera testée sur quatre configurations de sites fictifs présentant des degrés variables d'hétérogénéité, pour lesquels nous considérerons, en première approximation, que le coût global (CG) d'un projet de construction inclut :

- le coût des fondations : $C(W)$
- le coût des dommages liés à un défaut de portance du sol : $C(D)$

- la probabilité que la valeur établie par le calcul ingénieur ($q_u/3_{ing}$), soit supérieure à la portance réelle du sol ($q_{réelle}$) : $p(q_u/3_{ing} > q_{réelle})$
- le coût des sondages : $C(NF)$.

Nous proposons de calculer le coût global du projet en appliquant la relation suivante :

$$CG = C(W) + C(D) \cdot p(q_u/3_{ing} > q_{réelle}) + C(NF) \quad \text{équation 30}$$

Les sites fictifs A, B, C et D diffèrent de par leur "pourcentage d'hétérogénéité", c'est à dire la proportion de moindres valeurs de contrainte ultime q_u calculée à partir de profils pressiométriques virtuels constitutifs du site, et de part leur contraste d'hétérogénéité, autrement dit le caractère plus ou moins accentué des zones de moindre portance du sol par rapport au reste des valeurs de q_u .

- Site A, dit « homogène », sa construction est réalisée à partir de :
 - La simulation de NB profils diagraphiques (PF) suivant une loi normale de moyenne $m \ln_{(PF)}$ et d'écart type $\sigma \ln_{(PF)}$, (en pratique NB = 1000).
 - D'une équation de régression reliant, avec un coefficient de corrélation r , le paramètre pressiométrique d'intérêt (PP) et le paramètre de forage (PF) simulé précédemment. Ainsi à chacun des NB profils de PF, correspond un profil de PP.
Nous calculons, suivant les règles appliquées en bureaux d'études géotechniques, pour chaque profil de PP, une valeur de q_u pour une fondation superficielle donnée (fondation soumise à une charge verticale centrée de base $B = 0.70\text{m}$ et de niveau d'assise = 2.90 m).
- Site B, hétérogène à 30%, contraste de $\frac{1}{2}$:
Pour la construction du site B, 30% des valeurs de q_u calculées pour le site A sont remplacées par la moitié de leur valeur.
Le site est dit hétérogène à 30% avec un contraste d'hétérogénéité de $\frac{1}{2}$.
- De la même manière nous construisons le site C, hétérogène à 50% avec un contraste de $\frac{1}{2}$, où la moitié des valeurs de q_u du site A sont divisées par 2.

Les sites B et C tendent à représenter des hétérogénéités relativement diffuses assez peu marquées.

- Site D, hétérogène à 10%, contraste de $\frac{1}{4}$:

Dans ce dernier cas, 10% des valeurs de q_u du site A ont été remplacées par un quart de leur valeur. La simulation du site D vise à représenter une hétérogénéité locale très marquée.

La représentation schématique des sites fictifs et les fonctions de répartition correspondantes sont représentées Figure 47.

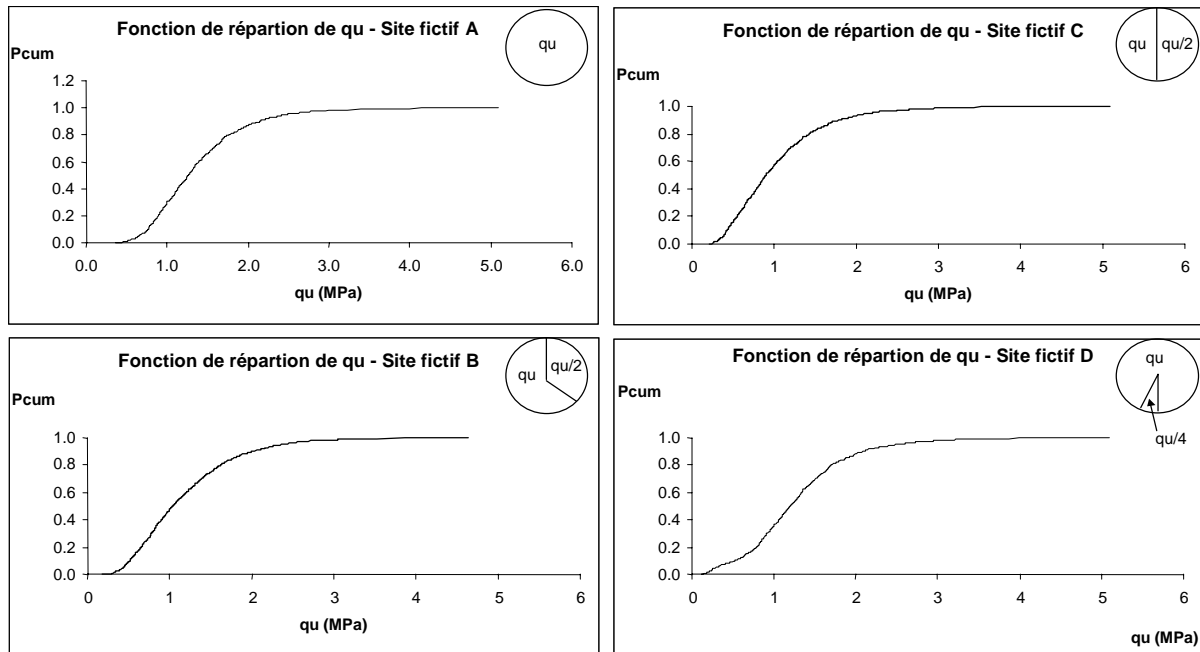


Figure 47 : Représentation iconographique des sites A, B, C et D et les fonctions de répartition des q_u correspondantes.

Afin de déterminer la probabilité que la valeur déterminée par l'ingénieur, valeur affectée d'un coefficient de sécurité, soit supérieure à la portance réelle du site : $p(q_u/3_{ing} > q_u \text{ réelle})$, nous procédons au tirage au sort de N' campagnes de NF sondages ($N'=1000$).

Pour chaque campagne N' , nous déterminons une valeur de $q_u/3_{ing}$, calculée comme la valeur minimale des $q_u/3$ obtenue sur les NF forages tirés au sort et constitutifs d'une campagne de reconnaissance. Nous obtenons donc N' valeurs de $q_u/3_{ing}$.

On pose que la portance réelle du sol ($q_u \text{ réelle}$) est une variable aléatoire qui suit la loi de répartition de la Figure 47, les N valeurs de q_u constitutives du site sont distribuées de manière aléatoire face aux N' valeurs de $q_u/3_{ing}$.

Chaque valeur de $q_u/3_{ing}$ est comparée à la valeur de $q_u \text{ réelle}$ qui lui fait face. $p(q_u/3_{ing} > q_u \text{ réelle})$ est estimée à partir du nombre de cas pour lesquels $q_u/3_{ing} > q_u \text{ réelle}$.

Nous pouvons alors calculer le coût global de la fondation CG (équation 15), en posant les hypothèses de calcul suivantes :

$C(W) = 60 \text{ (kF)}^7$ (soit 9147 € environ)

$C(D) = 10 \cdot C(W)$

$C(NF) = 2 + 8 \cdot NF \text{ (kF)}$ avec NF = nombre de sondages à exécuter

Nous admettrons que la taille minimale d'une campagne de reconnaissance est de 1 forage.

3.2. Résultats

Les résultats obtenus sont reportés dans le

Tableau 7, avec : $p = p(q_{u/3_{ing}} > q_{u_{réelle}})$, CG (coût global) et C(NF) le coût des forages.

	Hétérogénéité %	Contraste	NF	CG	C(NF)	p
Site A	0	*	2	81.0 kF (12 349 euro)	18 kF (2 744 euro)	0.005
Site B	30	1/2	2	86.4 kF (13 172 euro)	18 kF (2 744 euro)	0.014
			1	109.0 kF (16 617 euro)	10 kF (1 524 euro)	0.060
Site C	50	1/2	3	90.8 kF (13 842 euro)	26 kF (3 964 euro)	0.008
			4	95.2 kF (14 513 euro)	34 kF (5 183 euro)	0.002
Site D	10	1/4	2	112.2 kF (17 105 euro)	18 kF (2744 euro)	0.057

Tableau 7 : Résultats obtenus, pour une fondation superficielle, selon le % d'hétérogénéité du site et le caractère plus ou moins marqué des accidents.

⁷ le Franc est l'ancienne unité monétaire de la République Française, le taux de conversion est de 1 euro = 6.55957F, 1kF (kiloFranc) = 1000 F.

Pour un site « homogène », site A, le nombre optimal de sondages est égal à 2 avec $p(q_{\text{ing}}/3 > q_{\text{réelle}}) = 0.005$. Le coût global est estimé à 81kF, dont 18kF consacrés à la campagne de reconnaissance géotechnique, soit plus de 22% du coût global, ce qui est énorme.

En toute objectivité, nous devons reconnaître les limites de la fonction coût global (CG) qui ne comprend que le coût des fondations, le coût lié au sinistre et le coût de la campagne de reconnaissance, ce qui dans le cadre d'un projet de construction ne constitue qu'une partie du coût global réel après achèvement des travaux.

Pour un site hétérogène à 30% avec un contraste des valeurs de moindre portance du sol de $\frac{1}{2}$ (site B), il apparaît qu'une campagne de reconnaissance comportant 1 seul sondage conduit à un risque de défaillance des fondations relativement important de 0.06, le coût global serait alors de 109kF.

Cette simulation montre que la réalisation d'un sondage supplémentaire correspond, dans ce cas de figure à la reconnaissance géotechnique optimale, soit 2 sondages, avec $p = 0.014$ pour un coût global estimé à 86.4kF, dont 18kF pour la campagne de reconnaissance géotechnique. Dans ce cas, le surcoût lié au sondage complémentaire (8kF) est amorti à double titre, d'une part par la diminution du risque de défaillance de la fondation, d'autre part par la diminution significative du coût global (22.6kF), ce qui implique une vision à plus long terme du maître d'ouvrage.

Dans le cas du site C, le nombre optimal de sondages à réaliser est égal à 3, avec $p(q_{\text{ing}}/3 > q_{\text{réelle}}) = 0.008$ et un coût global de 90.8kF, dont 26kF consacrés à la campagne de forages.

Nous constatons que, pour cette configuration, afin de diviser par 4 le risque de défaillance de la fondation lié à un défaut de portance du sol, il conviendrait de réaliser 1 sondage complémentaire, soit un coût global de 95.2kF, dont 34kF d'étude de sol. Le sondage complémentaire n'est pas amorti par la diminution de la probabilité liée à la défaillance du bâtiment, toutefois, selon le degré de risque que le maître d'ouvrage désire atteindre, il peut être intéressant de réaliser ce sondage supplémentaire, qui, si l'on considère le coût global et le surcoût lié à la reconnaissance complémentaire, représente moins de 3kF.

Cette première approche « simpliste » de la définition du nombre de sondages à réaliser pour une campagne de reconnaissance selon le coût du projet et le risque de défaillance associé conduit à des résultats qualitativement satisfaisants dans le sens où le nombre de sondages préconisés augmente avec le pourcentage et le contraste des hétérogénéités du site.

Cependant le calcul de la fonction du coût global doit être amélioré afin d'être représentatif de la réalité et de refléter le pourcentage réel de l'étude géotechnique dans le coût réel des travaux après achèvement.

Une étude plus fine du problème devra prendre en compte :

- l'évolution du coût des fondations selon la capacité portante du sol. En effet, le processus de calcul mis en œuvre considère toujours le même coût relatif aux fondations quelle que soit la capacité portante du sol ce qui ne reflète pas la réalité. Ce possible raffinement de l'estimation des coûts globaux pourrait être conduit sur un cas d'étude spécifique, avec des descentes de charge données et une géométrie particulière des fondations,
- une meilleure estimation du coût associé à la campagne de reconnaissance, qui n'est pas nécessairement proportionnel au nombre de sondages. En effet, le géotechnicien pourra pondérer ces prix, notamment en fonction du volume de la campagne, de ses relations avec le client, de son désir d'emporter le marché ...
- une meilleure estimation des coûts des désordres, à partir des banques de données des assurances, les désordres dépendant de l'intensité de "l'erreur du géotechnicien".

Pouvoir associer, le coût global d'un projet, le risque lié à une défaillance du sol et le nombre de sondages correspondant à une reconnaissance géotechnique constitue un outil pour le maître d'ouvrage lui permettant d'avoir une gestion à court terme et à long terme vis à vis des risques liés au sol pour son projet de construction.

Le processus présenté ici n'est qu'une ébauche et vient en continuité de la méthodologie proposée permettant de définir un niveau de fiabilité pour une valeur de calcul. La fonction de coût intervenant dans l'établissement d'un nombre optimal de sondages doit être sérieusement affinée pour espérer obtenir des résultats représentatifs de la réalité.

CONCLUSION :

A l'issue de ce chapitre, nous retiendrons plus particulièrement les acquis suivants :

- l'établissement de corrélations universelles par classes de matériaux tel que nous l'avons traité ne paraît pas envisageable. Les équations de régression et paramètres explicatifs des paramètres pressiométriques d'intérêt varient selon le site, les conditions de forage et la nature des matériaux, il est donc préférable de traiter les données selon ces trois ensembles distincts.
- l'établissement d'une lithologie probable conforme aux données diagraphiques permet en plus des équations de régression de rendre compte de l'information portée par les enregistrements de paramètres de forage dans la génération des paramètres pressiométriques. Le processus algorithmique mis en œuvre conduit, pour un seuil de convergence fixé à des résultats cohérents avec les signaux diagraphiques traités tant pour des signaux synthétiques que pour des signaux réels.

- la construction d'un intervalle de valeurs pressiométriques à un niveau de risque donné permet d'apprécier la représentativité des valeurs pressiométriques mesurées et leur cohérence avec les enregistrements de paramètres de forage. L'intervalle paraît important, mais reste cohérent avec l'importante variabilité des mesures.
- la simulation de profils virtuels particuliers permet à l'ingénieur de se replacer dans le cadre des règles de calcul des DTU, il obtient ainsi, une image plus complète du site quantitativement et qualitativement dans le sens ou la génération d'un grand nombre de profils pressiométriques tient compte des données diagraphiques mesurées in situ.
- la fonction de répartition de la portance du sol calculée pour le site à partir des profils virtuels générés permet d'estimer la fiabilité associée à la valeur de calcul définie par l'ingénieur et inversement de définir une valeur de contrainte pour un niveau de risque donné.
- enfin, l'optimisation du nombre de sondages vient en continuité de la méthodologie proposée. Il ne s'agit là que d'une première approche qui doit être sérieusement affinée notamment au niveau de l'estimation du coût global du projet et des dommages liés à un défaut de portance du sol dont dépendent les résultats.

L'ensemble du processus d'estimation relatif à la détermination d'un niveau de risque associé à une valeur géotechnique sera appliqué dans la troisième partie au site expérimental de l'IUT et à un chantier réel (site de Boulogne).

Nous verrons à cette occasion quelles sont les limites de la méthode.

Partie III

Application de la méthodologie proposée à des cas réels

Après avoir développé, dans la seconde partie, les étapes du processus mis en œuvre, nous allons étudier comment la méthodologie peut être adaptée à des chantiers réels.

Dans un premier temps nous exploiterons les données issues du site expérimental de l'IUT Génie Civil de Bordeaux I (France), représentatif des contraintes liées aux sols rencontrés en région bordelaise.

Enfin, l'application de la méthodologie sera menée sur les données issues d'un chantier exécuté à Boulogne sur Mer (France), pour lequel nous ne disposons que des données pressiométriques et diagraphiques acquises in situ.

Dans les deux cas nous répondrons aux objectifs suivants :

- Obtenir une image lithologique du site
- Définir le risque attaché à la valeur préconisée par l'ingénieur, valeur obtenue à partir d'un nombre limité de mesures et des règles de calcul préconisées dans les DTU.
- Déterminer la valeur de calcul à adopter pour un niveau de risque donné

Enfin, nous préciserons les résultats obtenus et nous proposerons de possibles orientations pour améliorer la précision des estimations.

Chapitre I -

Le site expérimental de TALENCE / GRADIGNAN - France. Les moyens et construction d'une image du site

1. Présentation du site d'étude

1.1. Situation et description du site

Le site d'étude est localisé au sein du domaine universitaire de Talence sur la commune de Gradignan dans l'agglomération bordelaise et borde l'avenue de la Libération (Figure 48). Il peut être divisé en deux parties : une zone nord de forme quasi triangulaire représentant une surface de l'ordre de 1200 m², une zone est, d'environ 1000 m² de superficie. L'extension maximale de la zone nord est de 75 m. La plus grande distance entre 2 forages, un implanté dans la zone nord du site, le second dans la partie est, est de 125 m.

Le terrain ne présente pas de singularité topographique, il se situe à la cote moyenne de 29 NGF.

La localisation des points de sondage a été pensée dans le but de reconnaître au mieux de nos possibilités la variabilité du sol dans la zone nord. Les essais menés dans la zone est permettent de travailler en extrapolation par rapport à la zone nord. L'implantation des points de reconnaissance a également été guidée par :

- le plan des réseaux enterrés (eau et électricité)
- la présence d'une piste piétonnière revêtue
- l'implantation de deux longrines sur le terrain nord.
- les zones de parking au niveau de la zone est.

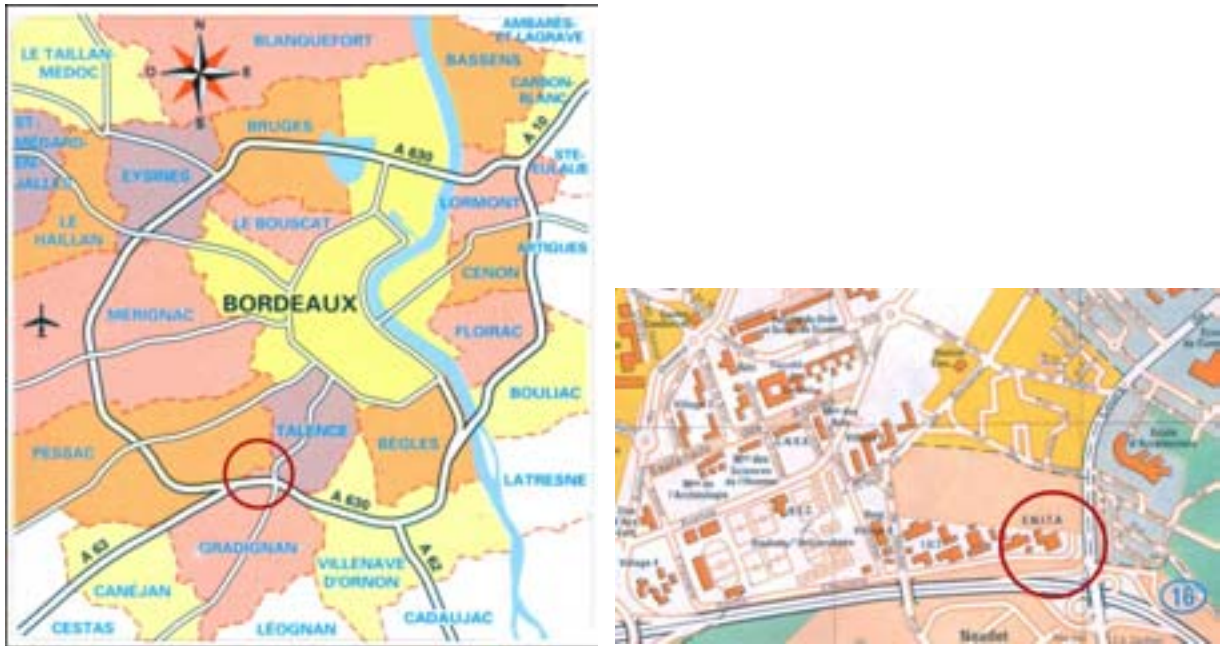


Figure 48 : Plan de situation du site expérimental

1.2. Contexte géologique

Le site est reporté sur la carte géologique de Pessac au 1/50 000^{ième} éditée par le BRGM (carte n° 827). Les formations superficielles (*Fxb1*) appartenant au système de la Garonne y sont répertoriées. Elles se composent de sables et graviers pris dans une matrice argileuse ou de sables peu argileux, graviers et galets.

Cet ensemble recouvre la formation (*g₂*) encore appelée "calcaire à Astéries" datée du Stampien (Oligocène supérieur - 28 à 23 millions d'années).

La mise en place de cette formation carbonatée s'est opérée par transgressions successives, séparées par des phases régressives, soit des périodes de dépôts sédimentaires et phases d'altération importante.

Cette formation caractéristique de la région bordelaise est extrêmement hétérogène d'un point de vue lithologique et mécanique. Elle est marquée par une importante variabilité du toit des calcaires. Les matériaux carbonatés peuvent être affectés de nombreuses poches de dissolution de taille plus ou moins importantes, pouvant aboutir à la formation de ("karst"), comblés ou non, de matériaux argileux issus de la décalcification du calcaire et de matériaux sableux amenés par les circulations d'eau s'écoulant par les fractures, fissures et autres discontinuités du calcaire. Ainsi, cette formation peut être constituée :

- de sables calcaires plus ou moins argileux,
- de sables quartzeux,
- de niveaux argileux ou marneux,

- de calcaires bioclastiques gris à jaunes plus ou moins résistants. Rappelons que les calcaires les plus résistants ont été exploités en partie et forment aujourd'hui les carrières souterraines de l'Entre-Deux-Mers, les caves de St Emilion. Ces ouvertures dans le sous-sol favorisent les phénomènes de dissolution et constituent des facteurs importants de risque d'effondrement dans ces régions. Précisons toutefois que ce risque est totalement écarté sur le site expérimental.

Dans le cadre de notre travail, une collecte de données, réalisée auprès de différents bureaux d'études, a permis de recenser une vingtaine de points de reconnaissance, exécutés lors d'études géotechniques antérieures sur le campus universitaire.

Les différents points de sondage corroborent les informations de la carte géologique. Ils révèlent une couverture argilo-sableuse parfois graveleuse, d'épaisseur variable, recouvrant le substratum calcaire ou marno-calcaire stampien précédemment décrit.

Le toit du calcaire est à une profondeur qui va de 5 à 23 m par rapport au terrain actuel, ce qui constitue une illustration de son importante variabilité. Il se présente sous différentes formes, calcaire gréseux ou marneux, à passées argileuses. Les coupes lithologiques établies font état d'un calcaire jaunâtre, friable ou d'un calcaire blanchâtre plus résistant.

Les descriptions lithologiques établies sur des terrains proches du site expérimental sont tout à fait conformes à la vision du site expérimental reconstituée à la fin de l'étude à partir des différents sondages destructifs et carottés menés in situ. De ce point de vue, la lithologie est homogène en grand, cependant les formations qui la constituent sont hétérogènes et particulièrement le substratum. Les formations alluviales peuvent être argilo-sableuses ou graveleuses et les calcaires du Stampien composites.

Après étude approfondie du site, notre interprétation, prévoit une épaisseur variable de matériaux de remblai, jusqu'à 2.00 m de profondeur, une couche résultant des dépôts alluvionnaires argilo-sablo-limoneuse surmontant le "calcaire à Astéries" du Stampien décrit précédemment, constitué de bancs calcaires plus ou moins résistants, de cailloux calcaires emballés dans une matrice argileuse, de passées sablo-graveleuses et marno-calcaire. Au droit des points de sondage, le toit de la formation marno-calcaire a été relevé entre 3.30 et 12.60 m de profondeur environ.

Les photos prises au niveau des carottes relevées au droit d'un des deux sondages carottés menés sur le site illustrent tout à fait cette hétérogénéité des matériaux constitutifs de la formation dite "calcaire" (Figure 49).

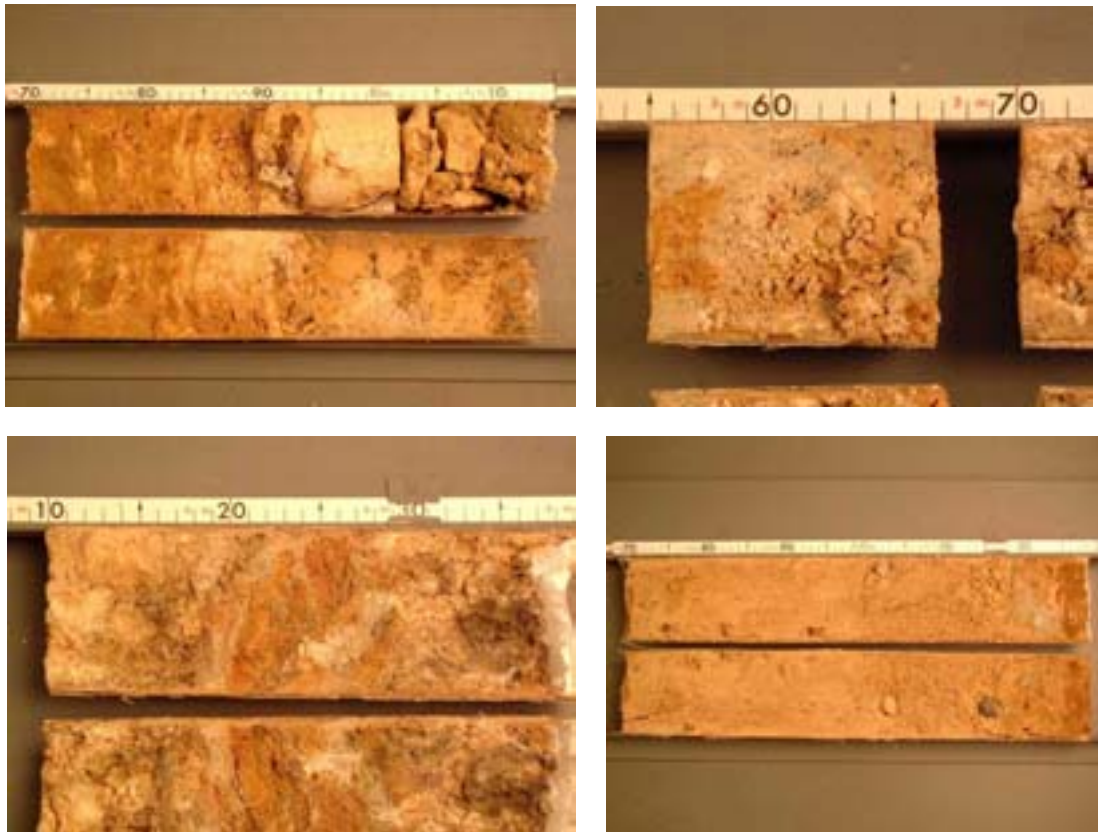


Figure 49: Echantillons du carottage C2, formation dite "calcaire".

2. Les moyens de reconnaissance mis en œuvre

L'ensemble des techniques de reconnaissance mises en œuvre sur le site est repris dans le tableau de synthèse suivant (Tableau 8).

	Dates	Moyens				
		Géophysique	Sondages tarière	DEP + pressio	Sondages carottés	Essais de laboratoire
Reconnaissance préliminaire Phase 1	04/11/99 10/12/99 31/05/00	profils de pseudo-section P1/P2/P3 et P4	T1, T2, T3 et T4			4 profils hydriques 11 VBS 11 granulométries par tamisage 11 sédimentométries 5 essais triaxiaux
Reconnaissance approfondie Phase 2.1	21/03/00 22/03/00 24/03/00 28/03/00 29/03/00 30/03/00 31/03/00 06/06/00 07/06/00			SP1, vPLL SP5, vPLL SP6, vPLL SP7, jBPV SP8, jBPV SP2, jBPV SP3, jBPV SP7, jPLL SP7, jBLL		
Phase 2.2	11/07/01 12/07/01 12/07/01 13/07/01			SP9, sTOC SP10, sTOC SP4, sTOC	C2	4 essais triaxiaux profil VBS

DEP + Pressio	Sondages destructifs avec enregistrement de paramètres et essais pressiométriques
vPLL	conditions de forage, BE3050, outil à Plaquettes, équipe de sondage LL
jBPV	conditions de forage, BE2030, outil à Boutons, équipe de sondage PV
jPLL	conditions de forage, BE2030, outil à Plaquettes équipe de sondage LL
jBLL	conditions de forage, BE2030, outil à Boutons équipe de sondage LL
sTOC	conditions de forage, Socomafor, Tricône, équipe de sondage OC

Tableau 8: Programme de reconnaissance mis en œuvre sur le site expérimental

2.1. Campagne de reconnaissance préliminaire - Phase 1

2.1.1. Pseudo-sections électriques

Dans un premier temps, nous avons choisi de procéder à une reconnaissance géophysique du site à l'aide de pseudo-sections électriques pour obtenir une première image du sous-sol, connaître plus précisément, le nombre de formations lithologiques à traverser lors des sondages et localiser d'éventuels points particuliers à investir.

Ces premiers résultats guideront l'implantation des sondages destructifs à venir.

La méthode consiste à combiner les principes du sondage et du traîné électriques. Le premier permet de mesurer la résistivité apparente (ρ_a) du sous-sol (équation 31) suivant la profondeur (z) et le second de balayer cette même variable électrique suivant un profil (x). Ainsi l'utilisateur obtient une image de la résistivité apparente du milieu en deux dimensions.

Pour un dispositif Wenner pôle - dipôle, une série d'électrodes de potentiel (M et N) est disposée régulièrement suivant un profil linéaire, un courant continu, d'intensité (I), est injecté par deux électrodes d'émission (A et B) encore appelées électrodes de courant. L'une d'entre elles (électrode B) est placée à "l'infini", l'électrode A est déplacée le long du profil d'électrodes de potentiel, (en pratique l'infini représente environ 2 à 3 fois la longueur du dispositif d'électrodes de potentiel) (Figure 50).

Pour un dispositif Wenner pôle - pôle, l'électrode d'émission B et l'électrode de potentiel M sont toutes deux placées à l'infini, ce qui permet une plus grande profondeur d'investigation, mais une moindre précision dans les variations des mesures de résistivité apparente du sous-sol, le volume de sol pris en compte par la mesure étant plus important.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{équation 31}$$

ρ_a : résistivité apparente ($\Omega.m$)

ΔV représente la différence de potentiel mesuré entre les électrodes M et N (V),

(I) l'intensité du courant émis au niveau des électrodes A et B (A),

K est un coefficient correcteur fonction de la géométrie du dispositif de mesure (m) [Frappa 93].

Les électrodes sont asservies à un système informatique qui, suivant une séquence de mesures prédéfinie, détermine les couples d'électrodes émettrices (AB) et les couples d'électrodes de potentiel (MN). Les valeurs de résistivité apparente sont attribuées à des pseudo-profondeurs, car la pseudo-section représente la projection sur le plan (xz) des

résistivités apparentes des matériaux mesurées pour un volume de sol compris entre les électrodes de potentiel.

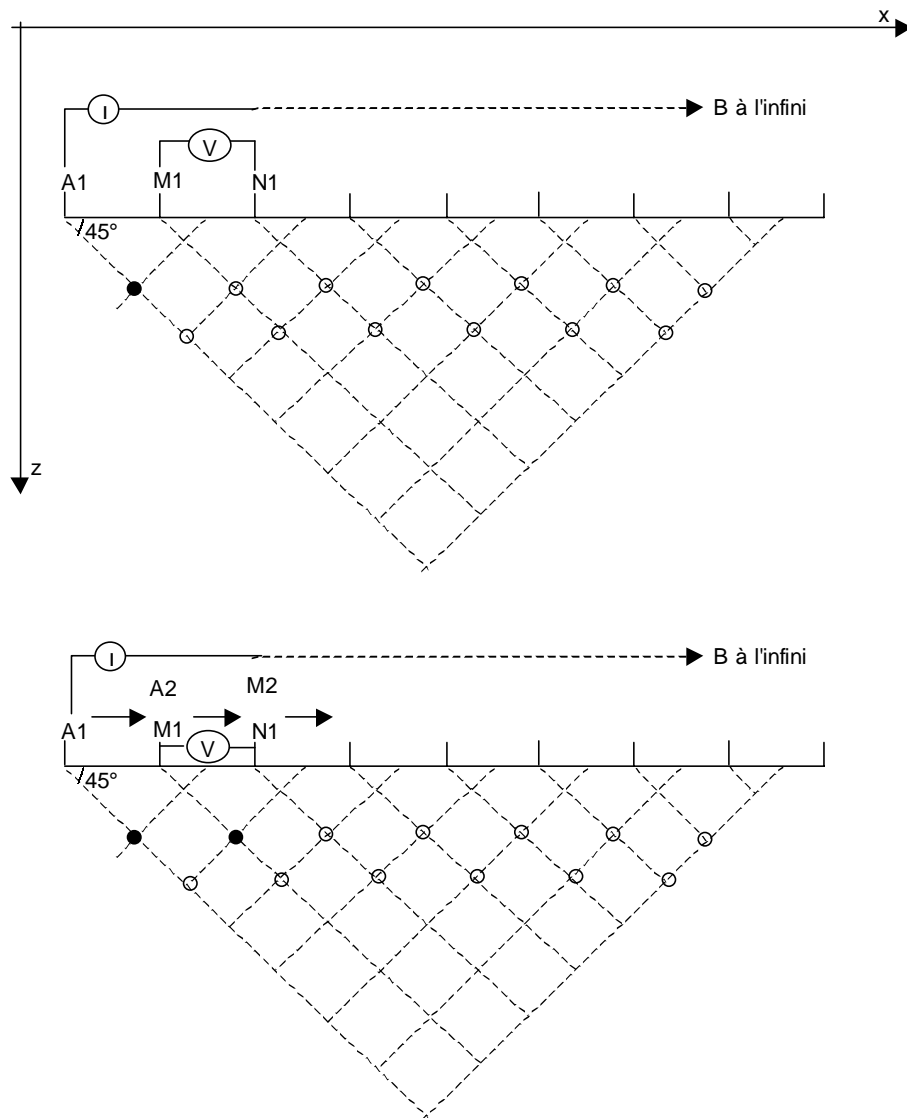


Figure 50: Dispositif de mesure d'une pseudo-section électrique

Le traitement des mesures est réalisé à l'aide du logiciel RES2Dinv [Loke 98], qui estime les résistivités "vraies" qui permettraient de recalculer des résistivités apparentes les plus proches de celles mesurées. Les résistivités ainsi calculées sont attribuées à des profondeurs estimées. La solution proposée n'est pas unique et le modèle retenu doit être plausible compte tenu de la géologie du site.

Sur le site expérimental, quatre profils ont été mis en place le 4/11/99, ils sont notés P1 à P4 sur le schéma d'implantation des points de reconnaissance (Figure 51). Chaque profil est composé de 30 électrodes équidistantes de 2m, ce qui représente un linéaire d'investigation

de 58 m. Le profil P1 est orienté Nord-ouest / Sud -est, P2 Ouest / Est, P3 Est / Ouest, P4 Nord / Sud.

Les dispositifs pôle - pôle "PP" et pôle - dipôle "PD" ont été mis en œuvre, le premier a permis de réaliser une investigation sur une profondeur d'une vingtaine de mètres, le second sur dix mètres environ.

2.1.2. Sondages à la tarière

Quatre sondages à la tarière hélicoïdale \varnothing 63 mm, ont été implantés sur les profils de mesures électriques, dans le but de confirmer la première image lithologique du site, établie à partir des profils de pseudo-section et de vérifier si les informations bibliographiques recueillies pouvaient être étendues au site étudié.

Les forages sont reportés T1 à T4 sur le schéma d'implantation des points de reconnaissance. Les points T1, T2 et T3 ont été implantés au niveau de la zone nord du site expérimental, T4, dans la partie est.

Les forages, réalisés le 10/12/99, ont été descendus :

- jusqu'au refus de l'appareil obtenu à :
 - 8.10 m de profondeur par rapport au terrain actuel en T1,
 - 8.00 m de profondeur par rapport au terrain actuel en T3.
- jusqu'à 15.00 m en T2 et T4 (arrêt volontaire des sondages)

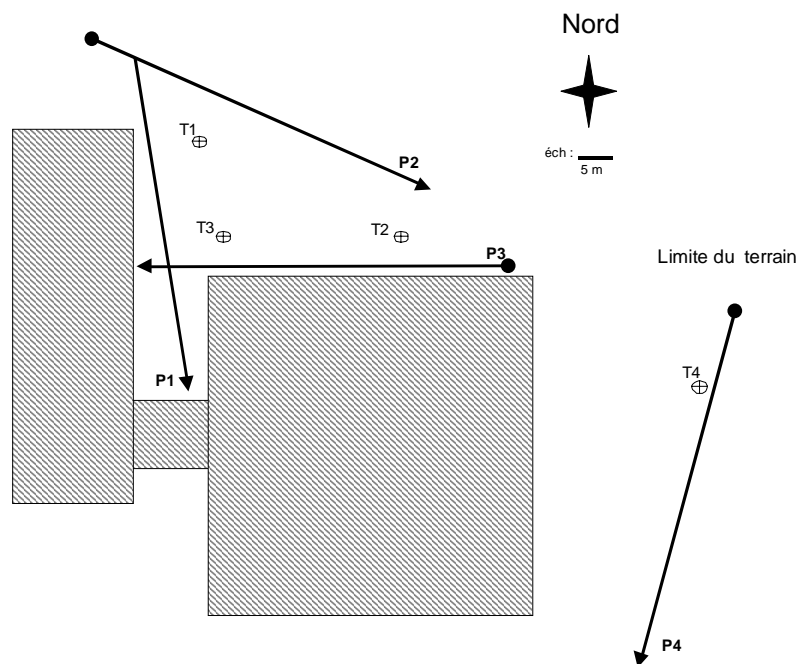


Figure 51: schéma d'implantation des sondages réalisés à la tarière et profils électriques au stade de l'investigation préliminaire (phase1)

2.1.3. Les essais de laboratoire - Identification des matériaux

Afin de préciser la coupe établie sur site à partir des échantillons prélevés, le laboratoire du Cemagref a réalisé :

- **4 profils hydriques** sur les échantillons prélevés tous les 0.50 m jusqu'à 3.00 et 4.50 m de profondeur au sein des forages T1 à T4. Au-delà, compte tenu du mode de prélèvement, la précision de prélèvement n'est plus jugée suffisante pour être représentative.

Pour onze des échantillons prélevés au sein des quatre forages menés à la tarière, nous avons déterminé :

- la **valeur au bleu de méthylène (VBS)** suivant la norme NF P 94-068, (annexe 17)
- la courbe granulométrique (annexe 18)
 - **par tamisage** (norme NF P 94-056) et
 - **par sédimentation** (norme NF P 94-057).

Les procès verbaux d'essais relatifs aux 11 prises d'essais réalisées sur les tarières T1 à T4 sont reportés en annexe 19.

L'examen des profils de teneur en eau naturelle du sol, des VBS et valeurs repères telles que le passant à 80 microns et le passant à 2 microns suivant la profondeur permettra de juger de la cohérence de la coupe lithologique avec les résultats obtenus au laboratoire.

2.2. Campagne de reconnaissance : phase 2

2.2.1. Forages destructifs avec enregistrements de paramètres de forages et essais pressiométriques

Compte de tenu des contraintes de planning de l'entreprise Alios, plusieurs équipes de sondages sont intervenues successivement sur le site.

Les essais pressiométriques ont été menés au sein des sondages destructifs avec enregistrement de paramètres exécutés par passes successives de 4 à 5 m. Au regard de la norme pressiométrique, les modes de forage utilisés sont compatibles avec la nature des matériaux traversés.

Phase 2.1 :

Entre les 21 et 24 mars 2000, les forages SP1, SP5, SP6 et SP7vPLL ont été menés entre 6.90 et 14.00 m de profondeur avec l'enregistrement de la vitesse d'avance (VA), de la pression d'injection (Pi), de la pression sur outil (Po), la pression de retenue (P.ret) et de la

pression de rotation (CR). Des essais pressiométriques ont été réalisés approximativement tous les mètres, soit un total de 40 essais pour un linéaire de forage de 47.20 m.

Les conditions d'exécution des forages sont notées "**vPLL**", il s'agit d'une sondeuse Bonne Espérance 3050 procédant en roto-percussion, l'outil de forage est un taillant à **Plaquettes** et l'équipe de sondage désignée "**LL**" (Initiales des acteurs).

Entre les 28 et 31 mars 2000, les forages SP2, SP3, SP8 et SP7jBPV ont été descendus entre 14.00 et 19.30 m de profondeur. Les paramètres de forage sont identiques à ceux enregistrés pour les conditions de forage vPLL, la vitesse de rotation et la pression de retenue ont été ajoutées, mais malheureusement les capteurs se sont montrés défectueux sur la majorité des forages. Le linéaire de forage exécuté est de 61.30 m et 48 essais pressiométriques ont été réalisés.

Les conditions d'exécution des forages sont notées "**jBPV**", il s'agit d'une sondeuse Bonne Espérance 2030 roto-percussion, l'outil de forage est un taillant à **Boutons**, l'équipe de sondage désignée "**PV**".

Les 6 et 7 juin 2000, dans le but d'approcher la répétabilité des essais pressiométriques et appréhender l'influence des conditions de forage sur les résultats diagraphiques, nous avons procédé à la réalisation de deux sondages supplémentaires à proximité des forages SP7vPLL et SP7jBPV. Ces sondages notés SP7jBLL et SP7jPLL, ont été menés respectivement à 12.40 et 12.60 m de profondeur et comportent 10 et 11 essais pressiométriques.

Pour l'exécution du forage SP7jBLL, nous avons utilisé la foreuse BE2030 en roto-percussion, l'outil à **Boutons** et l'équipe de forage "**LL**".

Pour le forage SP7jPLL, la machine et l'équipe de forage reste inchangée, seul l'outil est modifié, il s'agit là d'un outil à **Plaquettes**.

L'ensemble des forages "SP7" a été mené sur un espace restreint d'environ 15 m², afin de limiter les effets des variations lithologiques du sol.

Phase 2.2 :

Les 12 et 13 juillet 2001, les forages SP4, SP9 et SP10 ont été réalisés à l'aide d'une sondeuse Socomafor, un outil **Tricône** et l'équipe de sondage "**OC**". Les forages ont été descendus entre 12.20 et 12.50 m de profondeur et comportent chacun 11 essais pressiométriques (conditions de forage notées "**sTOC**").

Les données diagraphiques et pressiométriques acquises lors de la phase 2.2 seront utilisées pour tester la capacité du modèle à prévoir les caractéristiques pressiométriques à partir des seuls enregistrements de paramètres de forage mesurés au droit des forages exécutés en phase 2.2 via les corrélations établies en phase 2.1.

Le récapitulatif des sondages, (conditions de forages et essais pressiométriques) est reporté dans le tableau de synthèse suivant.

	n° sondage	conditions de forage			date	profondeur (m)	nb essais pressio
		machine	Outil	sondeurs			
phase 2.1	SP1	BE3050	taillant à Plaquettes	LL	21/03/00	14.0	12
	SP5	BE3050		LL	22/03/00	14.0	12
	SP6	BE3050		LL	23-24/03/00	12.3	11
	SP7vPLL	BE3050		LL	24/03/00	6.9	5
	SP2	BE2030	taillant à Boutons	PV	30/03/00	14.0	11
	SP3	BE2030		PV	31/03/00	14.0	11
	SP7jBPV	BE2030		PV	28/03/00	19.3	13
	SP8	BE2030		PV	29/03/00	14.0	13
	SP7jPLL	BE2030	Plaquettes	LL	06/06/00	12.6	10
	SP7jBLL	BE2030	Boutons	LL	01/07/00	12.4	11
phase 2.2	SP4	Socomafor	Tricône	OC	13/07/01	12.2	11
	SP9	Socomafor		OC	12/07/01	12.5	11
	SP10	Socomafor		OC	12/07/01	12.2	11
Total						170.4	142

Figure 52: Tableau de synthèse des forages, conditions de forage, profondeurs d'exécution et nombre d'essais pressiométriques réalisés.

Pour l'ensemble de la campagne, le fluide de forage est du GSP, polymère synthétique non polluant assurant une meilleure tenue des parois du forage.

L'ensemble des log diagraphiques et pressiométriques (données brutes) sont joints en annexe 20.

2.2.2. Les sondages carottés

Deux sondages carottés ont été réalisés sur le site, pour mieux visualiser les matériaux constitutifs du sous-sol, étalonner les signaux diagraphiques et prélever des échantillons intacts pour les essais triaxiaux consolidés non drainés.

Les sondages carottés C1 et C2 ont été menés respectivement jusqu'à 11.60 et 12.00 de profondeur. Afin de procéder à de possibles investigations futures, reconnaissance des terrains par diagraphies différées par exemple, les sondages ont été équipés de tubes crépinés fermés de bouches à clef.

Notons que la profondeur des sondages carottés est restée limitée en raison de la présence de matériaux sableux saturés repérés en fin de carottage, pour lesquels le mode de prélèvement est inefficace.

Pour l'implantation des sondages carottés nous avons choisi de positionner C1 entre les sondages SP6 et T2. Le forage SP4 mené en seconde phase a été implanté à environ 1 m de C1. C2 appartient à la zone "SP7" avec SP9 mené à 1 m de C2.

L'implantation de l'ensemble des investigations est reportée Figure 53

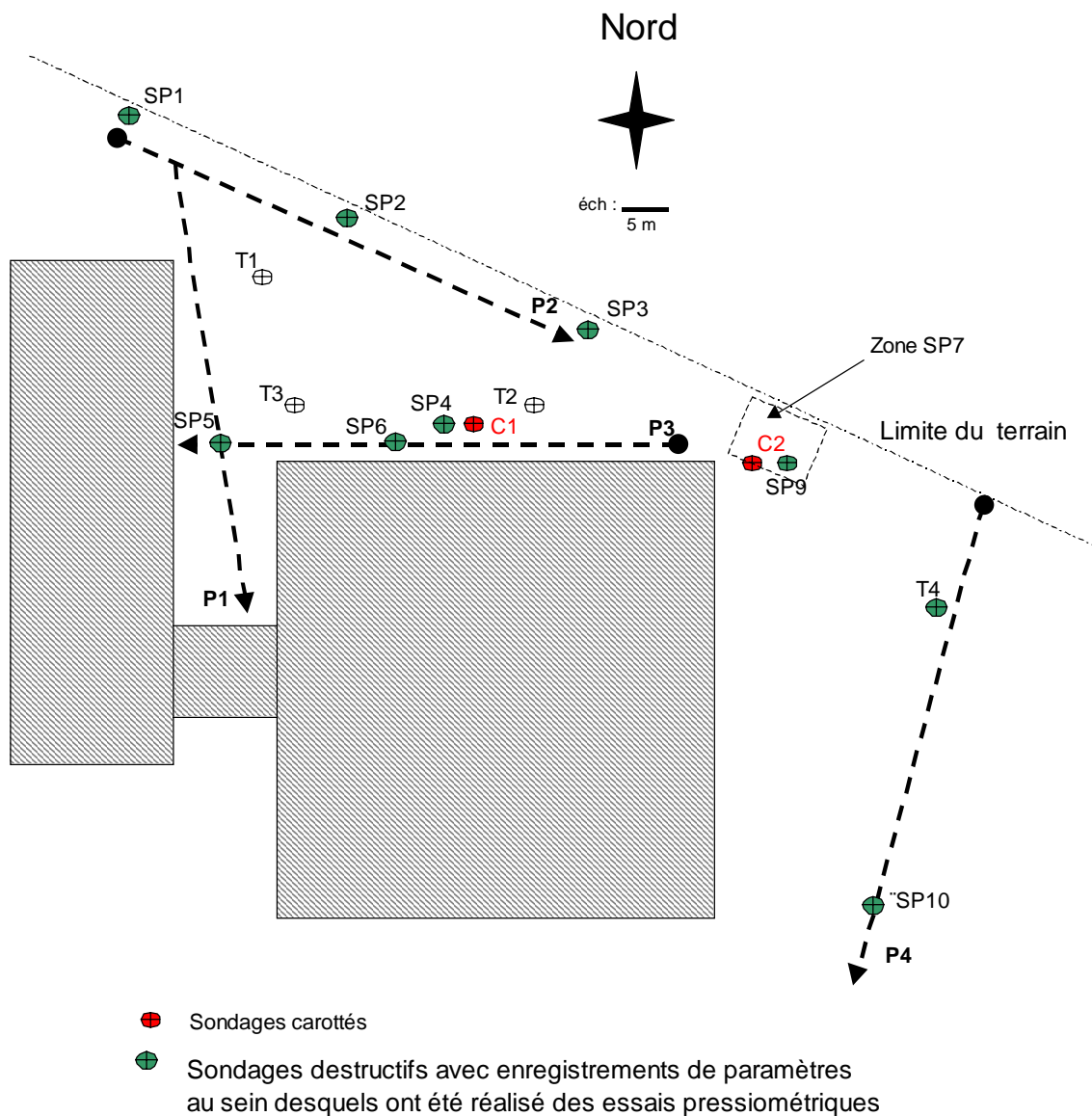


Figure 53: Schéma d'implantation des points de la reconnaissance approfondie phases 2.1 et 2.2.

Les coupes lithologiques établies à partir de l'examen visuel des carottes font l'objet de l'annexe 21.

2.2.3. Les essais de laboratoire - 2nde phase

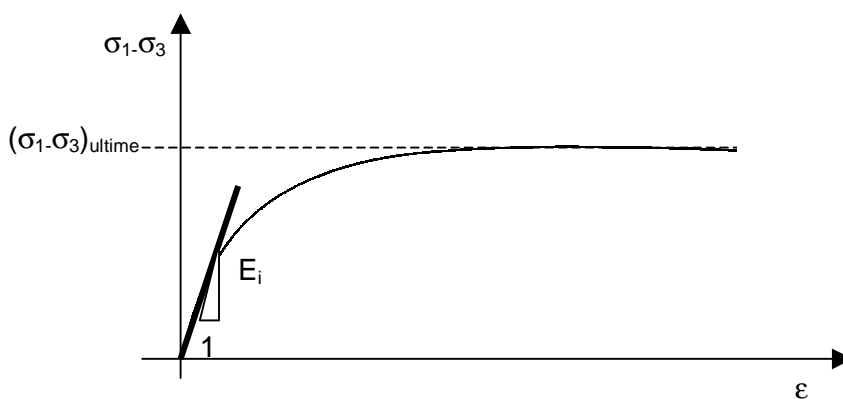
A partir des échantillons prélevés au niveau des carottes C1 et C2, nous avons programmé la réalisation :

- **d'essais triaxiaux** consolidés non drainés (CU) sur les échantillons de sol, qui pouvaient se prêter à la confection des éprouvettes d'essais : les matériaux contenant des éléments figurés, tels que graviers et nodules calcaires, étaient donc exclus [Costet & al. 81].
- **d'un profil de VBS** sur les échantillons prélevés en C2 tous les 0.10 m .

Ces mesures complètent l'analyse de la variabilité des caractéristiques des matériaux traversés et permettent de comparer les valeurs de modules pressiométriques et les modules initiaux (E_i) estimés via les résultats des essais triaxiaux et la loi de Duncan.

Concernant les essais triaxiaux, Duncan propose une variation hyperbolique du déviateur ($\sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de la déformation ε (équation 32).

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ultime}}} \quad \text{équation 32}$$



Dans l'hypothèse où les données expérimentales suivent la loi hyperbolique, dans le repère $(\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3) = f(\varepsilon))$, les points s'alignent sur une droite, dont l'ordonnée à l'origine est égale au rapport $1/E_i$ relatif à la pression de confinement considérée.

Pour chaque pression de confinement σ_3 testée, la valeur de $\ln\left(\frac{E_i}{P_{atm}}\right)$ est reportée en fonction de $\ln\left(\frac{\sigma_3}{P_{atm}}\right)$.

En supposant une évolution de $E_i(\sigma_3)$ de la forme $\frac{E_i}{P_{atm}} = k\left(\frac{\sigma_3}{P_{atm}}\right)^n$ [Janbu & al. 63], la droite de régression reliant l'ensemble des points reporté dans le graphe $\ln\left(\frac{E_i}{P_{atm}}\right) = f\left[\ln\left(\frac{\sigma_3}{P_{atm}}\right)\right]$ permet de calculer pour tout σ_3 , et en particulier pour $\sigma_3 = \gamma.z$ où z est la profondeur de prélèvement de l'échantillon, la valeur de E_i qui peut alors être comparée au module pressiométrique.

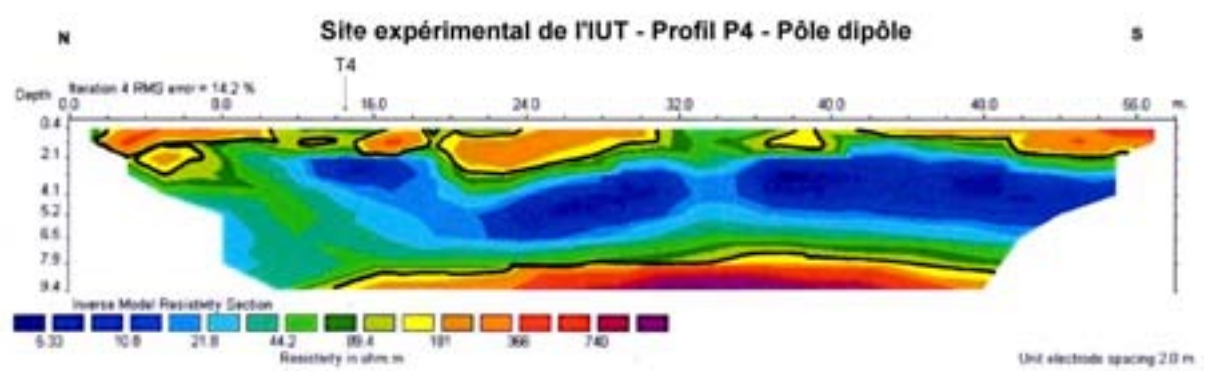
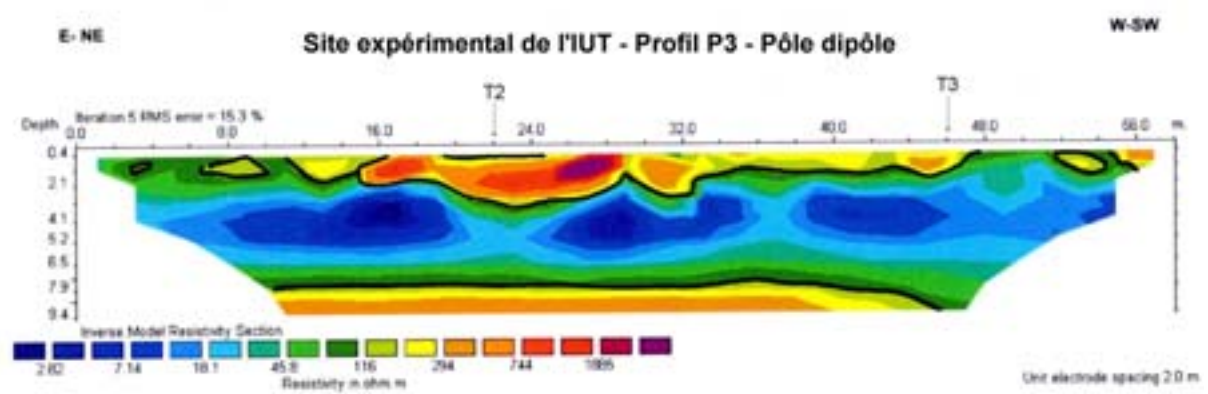
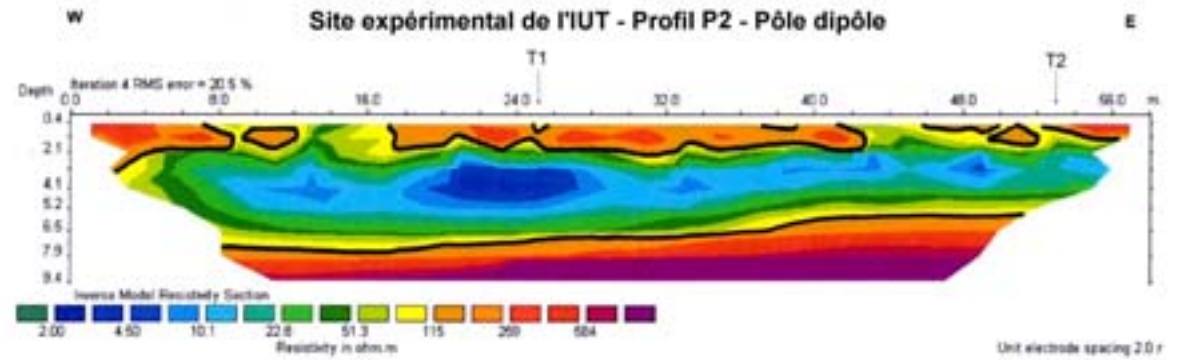
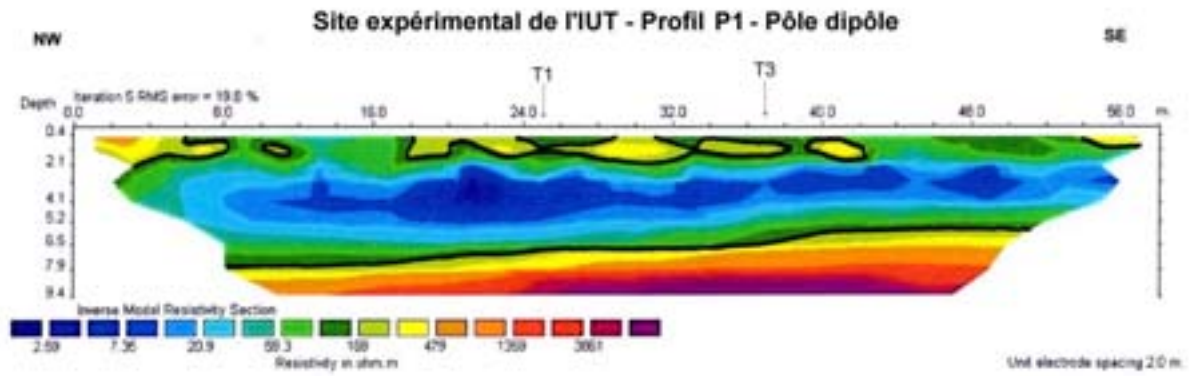
3. Construction d'une image du site

3.1. Lithologie perçue à la fin de la reconnaissance préliminaire - Phase 1

L'image du site que nous avons élaborée résulte de la synthèse de l'ensemble des données disparates relevées. Elle est fortement conditionnée par l'observation des échantillons prélevés au droit du sondage C2, pour lequel nous avons pu parfaitement visualiser la complexité des matériaux calcaires, marqués par une importante variabilité intraformation que nous n'imaginions pas si complexe au début de l'étude.

L'analyse des résultats obtenus après la phase préliminaire de reconnaissance et après la phase de reconnaissance approfondie, plus détaillée révèle l'évolution de la perception que l'on a du site tant d'un point de vue lithologique que mécanique.

Les pseudo-sections menées suivant le mode pôle-dipôle se révèlent être les plus adaptées à l'échelle d'observation que nous avons choisie de traiter, soit les 10 - 15 premiers mètres. En Figure 54 sont présentés les profils P1 à P4 obtenus après inversion et les sondages tarière s'y rapportant.



Coupes simplifiées des sondages menés à la tarière (phase 1)

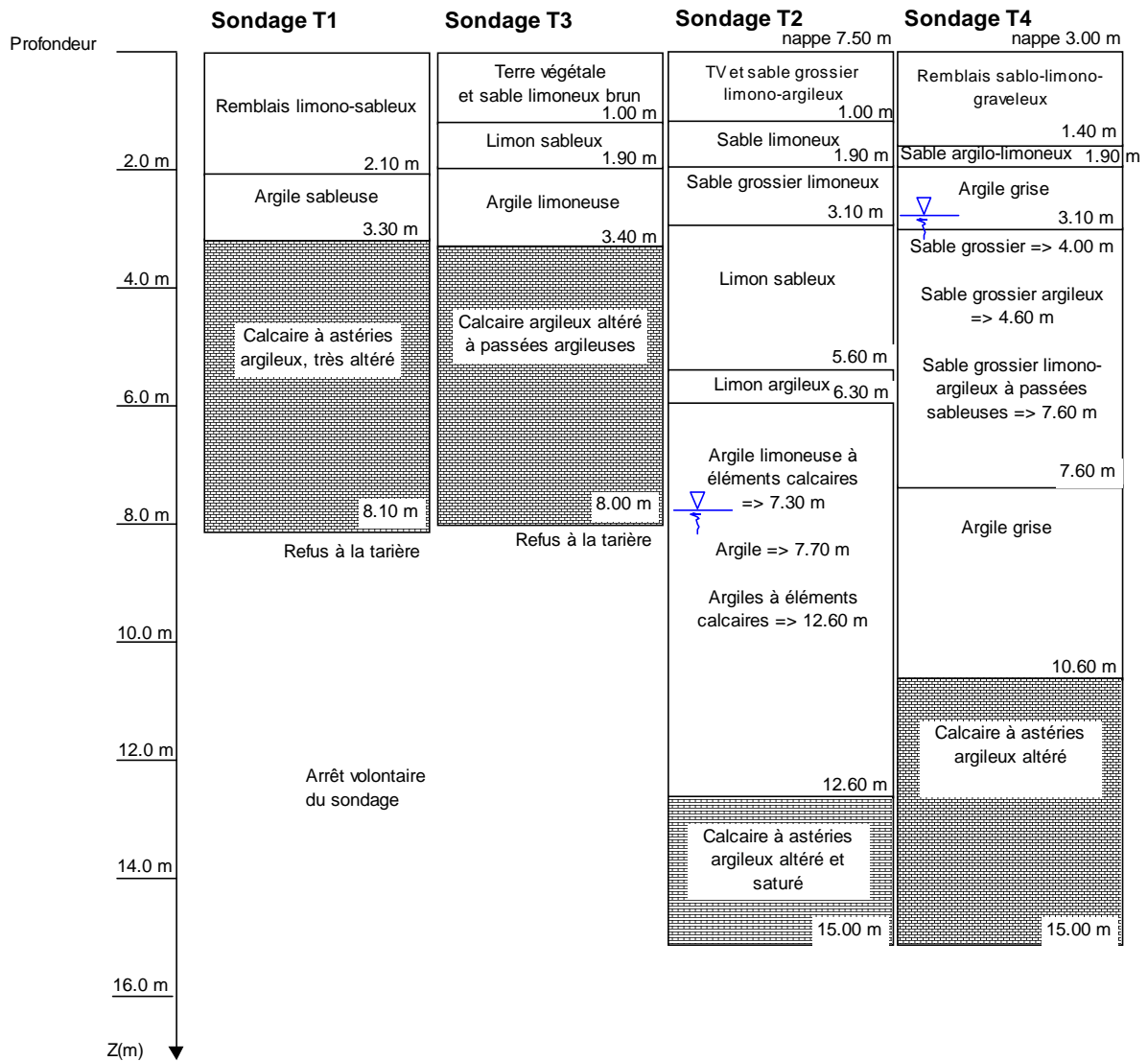


Figure 54: Pseudo-sections des quatre profils réalisés sur le site expérimental - Dispositif pôle - dipôle et sondages tarière pouvant être rapportés à chaque profil.

L'analyse des quatre pseudo-sections montre que le milieu peut être divisé suivant 3 formations :

- une formation superficielle identifiée jusqu'à environ 2 à 3 m de profondeur, les résistivités évoluent au sein de cet ensemble entre 50 et 300 ohm.m environ,
- une zone intermédiaire, conductrice, les résistivités sont inférieures à 60 ohm.m,
- enfin, un milieu beaucoup plus résistant où les valeurs de résistivité sont supérieures à 200 ohm.m environ.

La limite entre les différentes formations est progressive notamment entre la formation intermédiaire conductrice et la formation résistante la plus profonde. Les gammes de valeurs proposées ne sont qu'indicatives, compte tenu de ce passage progressif d'une formation à l'autre.

Si l'on considère la courbe d'isorésistivité de 100 ohm.m, le découpage du milieu suivant 3 formations apparaît de nouveau.

Une première interprétation montre une remontée des résistivités observée suivant les directions :

- sud-est pour le profil P1
- est pour le profil P2
- est pour le profil P3
- sud pour le profil P4

Hormis le sondage T4 qui est implanté sur le profil P4. Les sondages T1, T2 et T3 sont distants des profils P1, P2 et P3. Néanmoins, nous rapporterons les sondages :

- T1 et T3 au profil P1, dont ils sont distants de 10 à 7 m,
- T1 et T2 au profil P2. Leur distance par rapport au profil est de 7.5 m
- T2 et T3 au profil P3 dont ils sont séparés par 4.5 m.

Les coupes lithologiques obtenues ne corroborent pas de façon tout à fait satisfaisante l'image du site obtenu à partir des pseudo-sections électriques et confirment une certaine variabilité de la nature des matériaux entre les points de sondage.

Peuvent être regroupées, les coupes lithologiques établies à partir des sondages T1 et T3. En effet, si l'on excepte une épaisseur variable des matériaux de remblai (de 1.00 m en T3 à 2.10 m en T1) et une variabilité de la nature des matériaux de couverture (argile sableuse en T1, limon sableux et argile limoneuse en T3), le toit du substratum calcaire est identifié entre 3.30 et 3.40 m selon les points de sondage. Il s'agit d'un calcaire argileux très altéré à passées argileuses. Le refus de la tarière Ø 63 mm a été obtenu, respectivement, à 8.10 et 8.00 m de profondeur au sein d'un calcaire franc identifié en T3.

L'étalonnage du profil P1, par ces deux sondages, montre que la formation superficielle correspond plus ou moins aux matériaux de couverture (remblais et matériaux argilo-limono-sableux), le niveau le plus conducteur correspondant au calcaire à astéries altéré à passées argileuses. La formation résistante la plus profonde, témoigne vraisemblablement d'un calcaire plus compact engendrant le refus à la tarière.

Le profil P2 est très similaire au profil P1 et les correspondances observées avec le sondage T1 sont quasi identiques. Les matériaux de remblai se situent au-dessus de la courbe

d'isorésistivité de 100 Ωm . Les argiles et les matériaux calcaire argileux altérés constituent un niveau intermédiaire conducteur. Ce n'est que vers 7.0 m de profondeur que la résistivité apparente du milieu est supérieure à 100 Ωm , soit à la base des matériaux calcaire, le niveau de refus correspondant à des résistivités beaucoup plus élevées, de l'ordre de 500 Ωm .

En revanche, la coupe établie au droit du sondage T2, ne peut être mise en relation avec les résultats obtenus au niveau du profil P2. Les raisons peuvent être liées à l'hétérogénéité du sous-sol et plus particulièrement à l'importante variation du toit du substratum calcaire. A la localisation de T2 en fin de profil où les résultats sont affectés par un effet de bord. La remontée des résistivités apparentes en fin de profil sera confirmée ultérieurement au regard des profils lithologiques obtenus pour les sondages de la zone SP7 réalisés lors la reconnaissance approfondie phase 2.1.

Le profil P3 peut être étalonné par le sondage T2 à l'est du profil, le sondage T3 à l'ouest. L'anomalie repérée entre 16 et 28 m du linéaire du profil P3 s'explique par l'emplacement sur le site de deux longrines en béton.

Les matériaux traversés en tarière jusqu'à environ 3.00 m de profondeur sont sablo-limoneux, ce qui est tout à fait cohérent avec les résultats issus des investigations électriques. Le niveau intermédiaire, le plus conducteur correspond cette fois à des matériaux limoneux ou argileux.

Au vu du profil P3, les résistivités augmentent vers huit mètres de profondeur, ce qui ne s'explique pas réellement par la nature des matériaux prélevés (argile à éléments calcaire). Le report du sondage T3, sur le profil ne permet pas d'établir de correspondance entre la coupe lithologique établie par le sondeur et les résistivités, contrairement au profil P1. Ceci peut s'expliquer par la localisation du sondage en fin de profil, la mauvaise correspondance entre lithologie et mesures de résistivité étant due à un effet de bord.

Le sondage T4, est reporté au niveau du profil P4. Les informations obtenues via les deux méthodes d'investigation, indirecte pour les pseudo-sections et directe pour le sondage tarière, peuvent être recollées. Le niveau superficiel plus ou moins résistant correspond à une zone de remblais et matériaux sablo-argilo-limoneux, un niveau de faible résistivité, correspondant à une lentille argileuse identifiée entre 1.90 et 3.20 m de profondeur au niveau du forage. La résistivité du sous-sol croît progressivement suivant la profondeur, ce qui correspond à une succession de matériaux sableux ou argile sableuse. Le toit des matériaux calcaire n'est reconnu qu'à 10.60 m de profondeur, ce qui est en accord avec le plongement de la formation résistante la plus profonde au niveau du sondage.

L'examen simultané des pseudo-sections et des sondages menés à la tarière montre que l'adéquation des résultats obtenus entre les deux modes d'investigation n'est pas, dans notre cas, toujours satisfaisante.

La vision d'un sous-sol composé de trois formations peut être toutefois retenue, avec en tête les matériaux de remblai sablo-graveleux, d'épaisseur variable, sous jacents les alluvions déposées par la Garonne (matériaux argilo-limono-sableux), enfin le substratum marno-calcaire.

Cependant, la formation intermédiaire peut être masquée par la présence d'un substratum très altéré et particulièrement poreux. La limite entre dépôts alluvionnaires et formation du Stampien reste souvent floue.

Ainsi, les mauvaises correspondances entre pseudo-sections et coupes lithologiques établies à partir des sondages tarière proviennent:

- de la complexité du substratum calcaire, parfois très altéré et argilo-marneux. Les contrastes de résistivité ne sont alors pas suffisants pour être perçus par les mesures de résistivités du sol.
- de l'incertitude des profondeurs, tant pour les profils de pseudo-section, (nous rappelons qu'il s'agit d'une estimation : pseudo-profondeurs - § 2.1.1 de ce même chapitre), que pour les sondages à la tarière et plus particulièrement pour les sondages T2 et T4 pour lesquels le niveau piézométrique ou venues d'eau mesurés à 7.50 et 3.00 m de profondeur altèrent la précision sur les profondeurs de prélèvement.
- de la distance entre profils et les points de sondage tarière introduisant l'effet de la variabilité horizontale du sous-sol.

A partir des coupes établies à partir des sondages tarière (Figure 54), apparaît clairement, l'hétérogénéité de la nature des alluvions et la variabilité du toit du substratum "calcaire" identifié alors comme tel.

Les premiers essais menés en laboratoire conduisent à la même constatation et la comparaison des profils hydriques confirme la dispersion latérale des résultats. Pour une même profondeur, les variations de teneur en eau peuvent provenir des différentes conditions hydriques d'un point à l'autre liées, entre autre, aux variations lithologiques des matériaux.

De 0 à 4.50 m de profondeur, les indicateurs statistiques majeurs des teneurs en eau mesurées sur les échantillons prélevés au sein des sondages T1 à T4 sont reportés dans le Tableau 9. Les profils relatifs à chaque tarière ainsi que les VBS et valeurs granulométriques mesurées sont reportées Figure 55.

Wnat (%)	de 0 à 1 m	de 1 à 2 m	de 2 à 3 m	de 3 à 4 m
moyenne	11.7	15.0	14.7	15.2
min	7.6	5.7	4.2	13.2
max	18.6	23.0	22.3	20.1
Étendue	11.0	17.3	18.1	6.9
N	8	8	8	5

Tableau 9 : Principales grandeurs statistiques pour les teneurs en eau des échantillons prélevés de T1 à T4 entre 0 et 4.50 m de profondeur.

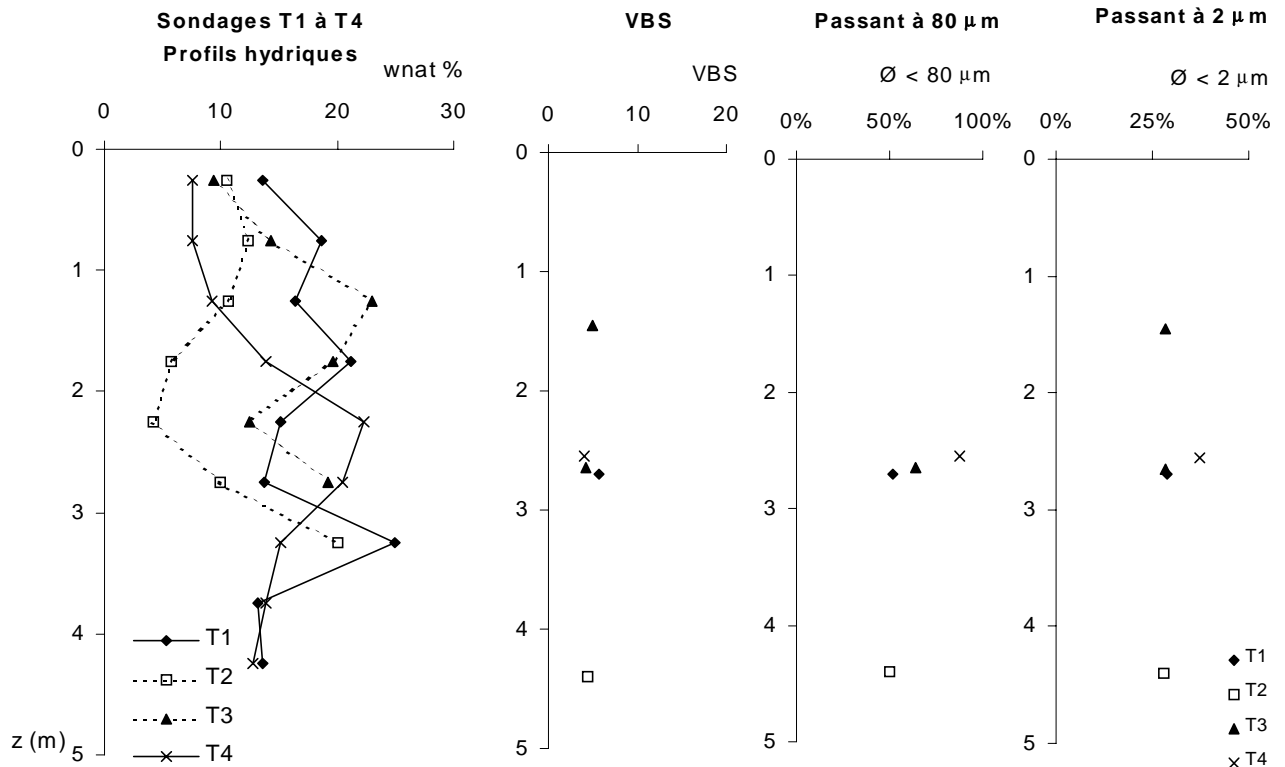


Figure 55: Profils hydriques obtenus au droit des sondages T1 à T4 et indicateurs VBS, passant à 80 µm et 2 µm.

Les teneurs en eau sont cohérentes avec les coupes établies au droit de chaque sondage à la tarière, ainsi les teneurs en eau les plus élevées correspondent à des matériaux argileux ou limoneux, alors que les valeurs les plus faibles sont à mettre en relation avec des matériaux sableux (sondages T4 de 1.90 à 3.20 m et T2 de 1.90 à 3.10 m).

D'un sondage à l'autre, la variabilité horizontale est très élevée. La teneur en eau naturelle des matériaux (W_{nat}) est comprise entre 4.2 % (T2) et 22.3 % (T4), valeurs attribuées à la cote 2.25 m de profondeur. Sur les quatre valeurs reportées à 2.25 m au droit des sondages T1 à T4, le coefficient de variation est de 48%

Les courbes granulométriques établies sur quelques échantillons permettent de formuler les remarques suivantes :

Si l'on considère le passant à 80 µm, la différenciation entre les matériaux argileux et calcaire est loin d'être évidente et paraît parfois contradictoire. Ainsi, en T1, la valeur

obtenue dans les argiles sableuses (52%) est inférieure à celle relevée dans les calcaires à astéries argileux (80%), la même observation peut être faite en T3.

Nous pensons que ce résultat est à considérer avec prudence et ne nous paraît pas nécessairement représentatif de la réalité. En effet, le processus de forage à la tarière hélicoïdale engendre une production de fines et l'échantillonnage du matériau n'est vraisemblablement pas adapté au matériau calcaire argileux.

3.2. Résultats des essais de laboratoire - A l'issue de la phase 2

3.2.1. Les essais triaxiaux

La réalisation d'essais triaxiaux consolidés non drainés sur des échantillons choisis issus des sondages carottés C1 et C2 permet :

- de comparer les modules initiaux identifiés à partir du modèle de Duncan aux modules pressiométriques mesurés au sein des sondages pressiométriques les plus proches (SP4 pour les échantillons issus de C1 et SP9 pour les valeurs déterminées sur les échantillons prélevés en C2).
- de procéder à une analyse en composantes principales sur l'ensemble des échantillons utilisés pour les essais triaxiaux et d'apprécier la cohérence entre les différentes variables d'étude retenues,

Le choix des échantillons au sein des carottes a été contraint par la qualité du prélèvement et la nature des matériaux. La prise d'essai ne devant pas contenir de nodules ou autres éléments figurés (graviers, cailloux...) susceptibles de perturber le bon déroulement de l'essai.

Compte tenu de la taille des éprouvettes, (diamètre 35 mm, hauteur 80 mm), et des échantillons disponibles, la nature des matériaux testés est plutôt argilo-limoneuse : seules trois éprouvettes ont pu être réalisées au sein des marno-calcaire ou argiles calcaires, il s'agit des échantillons prélevés en C1 entre 8.50 et 8.60m, en C2 entre 4.70 et 5.10 et entre 10.30 et 10.80 m de profondeur (Figure 56).



Figure 56 : Exemples d'échantillons retenus pour les essais triaxiaux

A titre d'exemple nous présentons, les courbes expérimentales obtenues dans le repère déviateur de contraintes (σ_1 - σ_3) en fonction du pourcentage de la déformation axiale ε (Figure 57) pour l'échantillon prélevé en C2 entre 2.10 et 2.30 m de profondeur. Les courbes 1 à 4 correspondent aux quatre pressions latérales σ_3 exercées sur chacune des éprouvettes (courbe 1 : $\sigma_3 = 50$ kPa, courbe 2 : $\sigma_3 = 100$ kPa, courbe 3 : $\sigma_3 = 200$ kPa et courbe 4 : $\sigma_3 = 300$ kPa).

Les procès verbaux de l'ensemble des essais triaxiaux sont reportés en annexe 22.

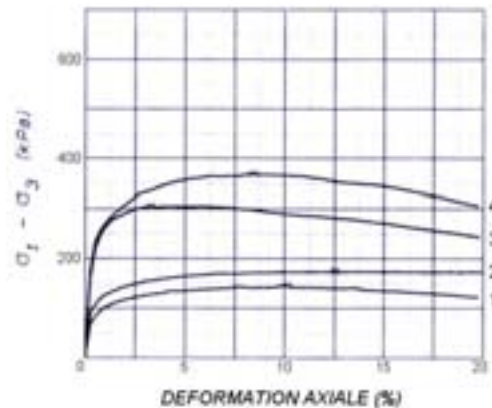


Figure 57 : Courbes obtenues dans le repère $(\sigma_1 - \sigma_3)$ en fonction de la déformation axiale ε (%) pour l'échantillon prélevé en C2 entre 2.10 et 2.30 m de profondeur. σ_3 prend successivement les valeurs de 50 kPa (courbe 1), 100 kPa (courbe 2), 200 kPa (courbe 3) et 300 kPa (courbe 4).

Afin d'obtenir la valeur du module initial correspondant à la cote de l'essai pressiométrique nous procédons :

- à la discrétisation, au mieux de nos possibilités, des courbes expérimentales (Figure 57) obtenues dans le repère $(\sigma_1 - \sigma_3)$ en fonction de la déformation axiale ε (Figure 58),
- au report des points expérimentaux dans le repère $\varepsilon / (\sigma_1 - \sigma_3) = f(\varepsilon)$, si le comportement suit le modèle théorique de Duncan, les points s'alignent sur une droite dont l'ordonnée à l'origine est égale à $1/E_i$. Nous pouvons ainsi déterminer pour chaque pression de confinement σ_3 testée au laboratoire une valeur de E_i (Figure 59).
- au calcul du rapport contrainte effective sur pression atmosphérique à la cote de l'essai pressiométrique.
- à la détermination de la régression $E_i(\sigma_3)$ permettant d'estimer le module initial pour une pression de confinement donnée. A partir de l'équation de régression obtenue peut déduire le module initial qui serait obtenu à la cote de l'essai pressiométrique (Figure 60).

Nos hypothèses de calcul sont les suivantes :

$$\gamma_{\text{sol}} = 18 \text{ kN/m}^3,$$

$$\text{la pression atmosphérique } P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa},$$

en C2 pour l'échantillon prélevé entre 2.10 et 2.30 m de profondeur, nous retiendrons $z_{\text{essai}} = 2.20 \text{ m}$ et considérerons que la contrainte exercée dans le sol est isotrope.

Ainsi $p = \frac{\sigma_v + 2\sigma_h}{3}$ peut être ramenée à $0.6 \sigma_v$ en posant $k_0=0.4$ avec $\sigma_h = k_0 \sigma_v$ et $\sigma_v =$

$\gamma_{sol} \cdot Z_{essai}$

Pour l'exemple traité C2_2.20 m, nous obtenons $p/P_{atm} = 0.24$.

Via l'équation de régression déterminée Figure 60, nous calculons $\ln(E_i/P_{atm})$ et donc E_i correspondant à la cote de l'essai pressiométrique. L'ensemble des valeurs de module E_i estimé et les modules pressiométriques mesurés correspondant sont repris dans le Tableau 10. Le détail de la procédure pour les autres éprouvettes est joint en annexe 23.

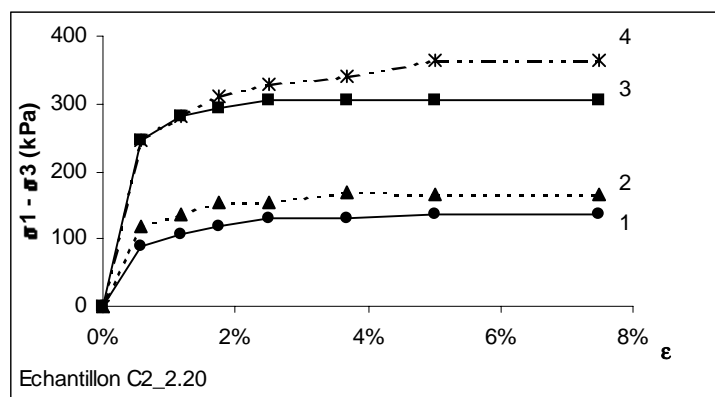


Figure 58 : Discrétisation des courbes expérimentales obtenues dans le repère $(\sigma_1 - \sigma_3)$ en fonction de la déformation axiale ϵ (%). Echantillon prélevé en C2 entre 2.10 et 2.30 m de profondeur.

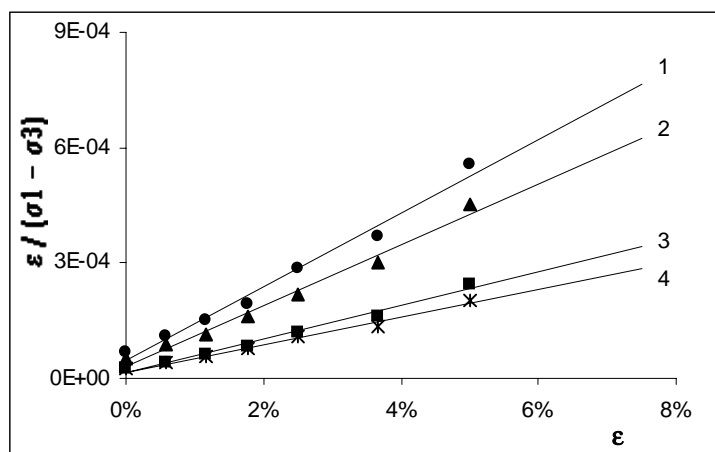


Figure 59 : Report des points expérimentaux (Figure 58) dans le repère $\epsilon / (\sigma_1 - \sigma_3) = f(\epsilon)$

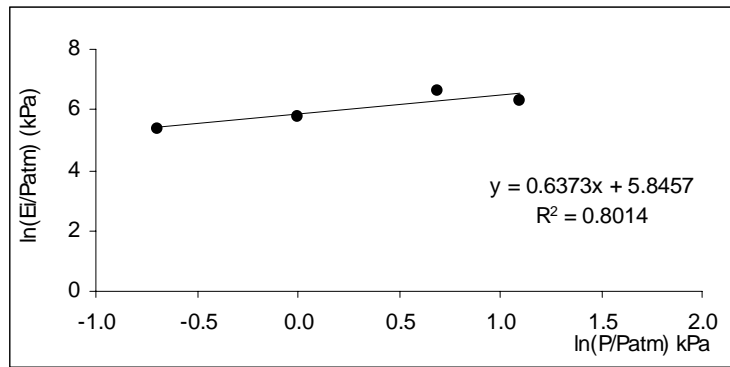


Figure 60 : Détermination de la droite de régression reliant la pression relative à la cote de l'essai pressiométrique et le module initial estimé à cette profondeur.

Sondage	Z (m)	Ei estimé (MPa)	E (MPa)
C1	2.00 - 2.20	8.2	7.5
C1	3.00 - 3.50	11.1	16.7
C1	4.10 - 4.20	10.3	23.3
C1	5.10 - 5.30	18.1	31.0
C1	8.50 - 8.60	22.4	57.0
C2	2.10 - 2.30	13.8	4.3
C2	3.70 - 4.10	34.7	8.5
C2	4.70 - 5.10	58.3	29.0
C2	10.40 - 10.80	50.2	37.0

Tableau 10 : Valeurs de E_i estimées aux cotes des essais pressiométriques

La comparaison des modules initiaux (E_i) estimés avec les modules pressiométriques (E) mesurés in situ au sein des forages pressiométriques distants d'environ 1 m par rapport aux sondages carottés (Figure 61), montre que pour les deux sondages et aux profondeurs testées, les profils des modules mesurés in situ et au laboratoire sont tout à fait cohérents et présentent la même évolution des caractéristiques mécaniques des matériaux suivant la profondeur.

La Figure 62 monte une bonne corrélation entre les valeurs de E_i et de E , toutefois aucune règle générale ne peut être établie, les relations obtenues $E = a E_i + b$ varient selon les points de sondage : les modules pressiométriques sont supérieurs aux modules triaxiaux sur C1 et inférieurs sur C2. En outre, le faible nombre de mesures ne permet pas de conclure sur la validité d'une telle relation.

Une fois de plus, on constate le caractère "relatif" des corrélations établies, cela soulève à nouveau la question de la "solution", de la "référence" à laquelle les valeurs obtenues pourraient être comparées. Pas plus que les valeurs pressiométriques, les valeurs de modules issues des essais triaxiaux ne semblent pouvoir être qualifiées de référence, la qualité relative des prélèvements conditionnant l'incertitude sur ces valeurs.

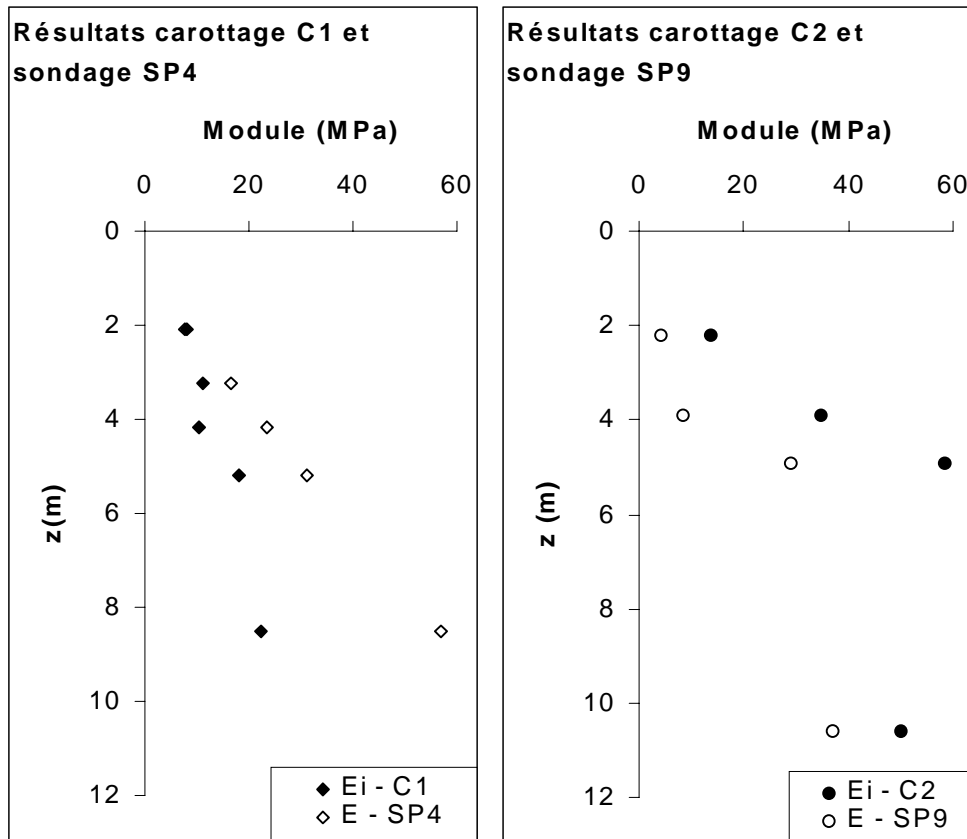


Figure 61: Comparaison des valeurs de modules obtenues par les essais triaxiaux CU menés sur des échantillons des carottages C1 et C2, et valeurs de modules pressiométriques mesurés au sein des sondages pressiométriques les plus proches SP4 et SP9.

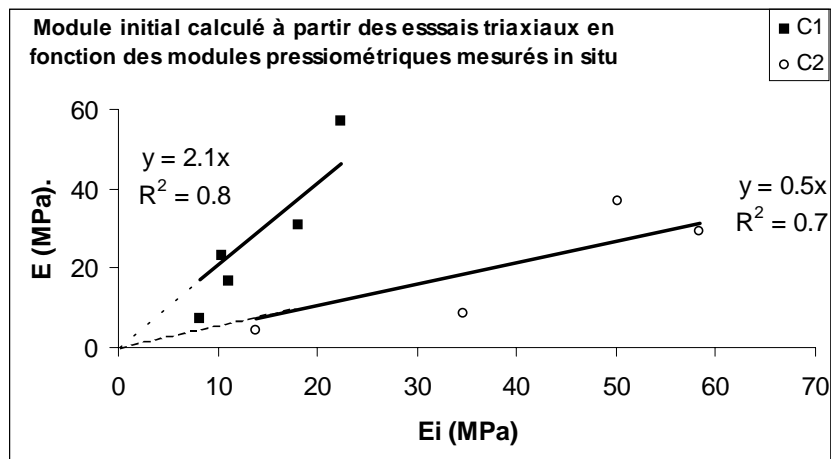


Figure 62 : Correspondance entre les valeurs de modules pressiométrique mesurés in situ et les valeurs de module obtenues au laboratoire sur des échantillons des carottages C1 et C2.

Les principaux résultats issus des essais triaxiaux sont reportés dans le Tableau 11.

Sondage	z (m)	Nature des matériaux	Wnat%	γ_d	i_e	c' (kPa)	ϕ' °	pl* (MPa)	E (MPa)
C2	2.10 - 2.30	argile sableuse	26.5	1.57	0.7	18	28	0.5	4.3
C2	3.70 - 4.10	argile calcaire	18.3	1.77	0.6	29	34	0.9	8.5
C2	4.70 - 5.10	marno-calcaire	18.9	1.76	0.6	72	26	3.7	29.0
C2	10.40 - 10.80	argile calcaire	42.5	1.28	1.2	44	17	2.8	37.0
C1	2.00 - 2.20	limon argilo-sableux	24.1	1.63	0.7	28	19	0.6	7.5
C1	3.00 - 3.50	limon argilo-sableux	21.0	1.74	0.6	21	26	1.2	16.7
C1	4.10 - 4.20	limon sableux	22.0	1.71	0.6	43	24	1.9	23.3
C1	5.10 - 5.30	argile lgt. sableuse	18.2	1.81	0.5	30	23	3.3	31.0
C1	8.50 - 8.60	argile calcaire	48.3	1.20	1.3	36	18	3.6	57.0

avec :

z (m)	profondeur de prélèvement	c' (kPa)	cohésion effective
Wnat%	teneur en eau naturelle de l'échantillon	ϕ' °	angle de frottement effectif
γ_d	densité sèche (γ_d/γ_w) initiale	pl* (MPa)	pression limite nette
i_e	indice des vides initial	E (MPa)	module pressiométrique

Tableau 11 : Principaux résultats des essais triaxiaux

La réalisation d'une analyse en composantes principales a été menée sur les 9 éprouvettes d'essai et prend en compte les variables d'étude : C', ϕ' (cohésion et angle de frottement interne effectif), la teneur en eau naturelle de l'échantillon, l'indice des vides, la densité sèche du matériau avant essai, la pression limite et le module pressiométrique. (Figure 63) :

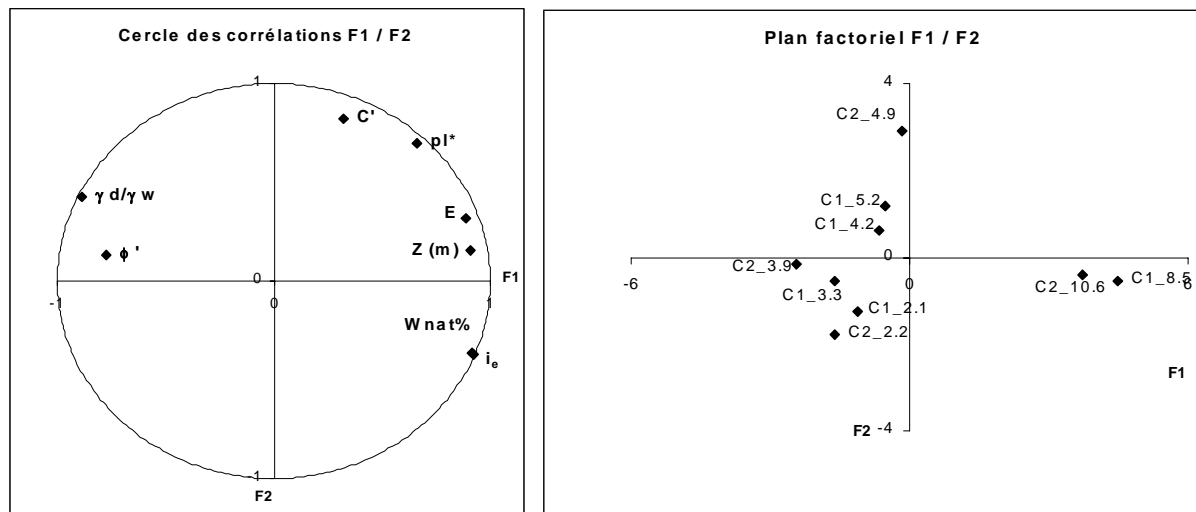


Figure 63 : cercle des corrélations et répartition des échantillons prélevés en C1 et C2 dans le plan factoriel F1 / F2

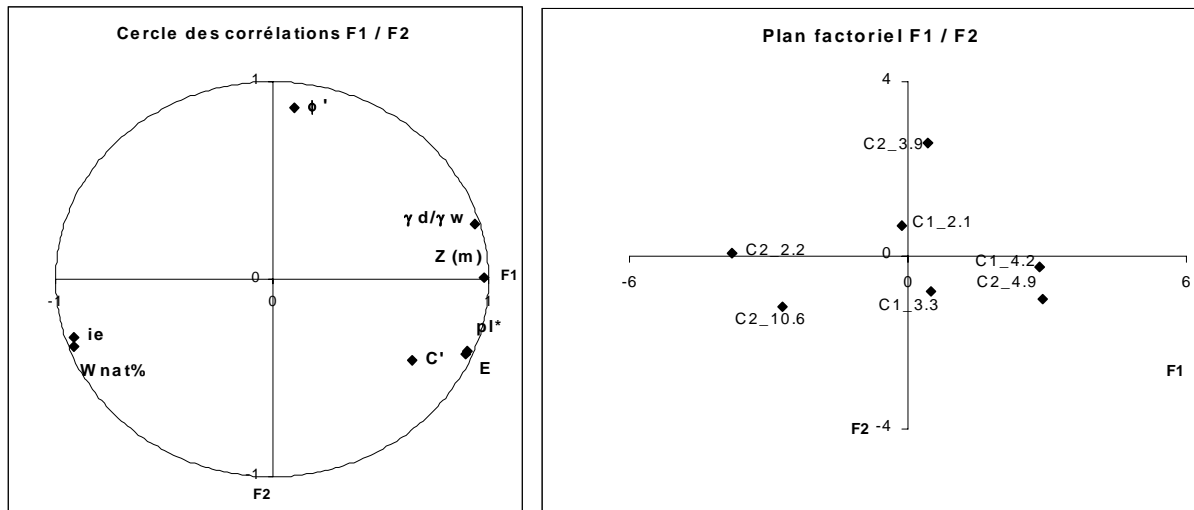


Figure 64 : cercle des corrélations et répartition des échantillons prélevés en C1 et C2 hormis les échantillons C1_8.5 et C2_10.6m dans le plan factoriel F1 / F2

L'analyse du cercle des corrélations confirme que la cohésion du matériau et la pression limite sont liées [Cassan 88]. En revanche la position de l'angle de frottement interne du matériau (ϕ') dans le cercle des corrélations n'est pas cohérente avec les valeurs pressiométriques mesurées. Les valeurs de ϕ' les plus importantes correspondant aux valeurs pressiométriques les plus faibles et vice versa.

La représentation des individus dans le plan factoriel ne conduit pas à une ségrégation des individus selon leur provenance, carottage C1 ou C2, seuls les échantillons prélevés en C1 à 8.5 m et en C2 à 10.6 m de profondeur s'individualisent du reste des échantillons suivant l'axe F1 en raison de leur teneur en eau et modules pressiométriques importants (Figure 63). Il s'agit de matériaux différents du reste de la base de données (Figure 64).

Les modules initiaux (E_i) déterminés au laboratoire confortent les profils de modules pressiométriques (E) obtenus au niveau des forages SP4 et SP9.

Les écarts entre les valeurs existent, mais l'on observe une bonne correspondance entre les valeurs de E_i et de E . Cependant ces relations de régression, établies sur seulement 4 à 5 valeurs dépendent des points de sondage.

Les paramètres C' et pl^* peuvent être reliés, ce qui est accord avec les relations empiriques établies dans la bibliographie. En revanche, les valeurs obtenues pour l'angle de frottement interne ne sont pas cohérentes avec les valeurs pressiométriques en raison de la nature différente de ces matériaux comme en témoigne notamment les valeurs de teneur en eau et de densité sèche.

3.2.2. Profil "continu" de la VBS pour les échantillons prélevés en C2

Il s'agit de comparer la variabilité et la cohérence des profils obtenus :

- pour un essai de laboratoire (détermination de la VBS) sur des échantillons prélevés tous les 0.10m au sein de la carotte C2,
- pour les essais pressiométriques,
- pour les paramètres de forage VA et Pi lissés sur une fenêtre de 0.10m.

Le prélèvement des échantillons pour les essais de laboratoire tous les 0.10 m n'a pu être véritablement mené que sur certaines passes de la carotte C2. En effet, une partie de celle-ci a été conservée intacte pour la conduite des essais triaxiaux et le taux de récupération des échantillons s'est révélé très faible au droit des passées sableuses ou au sein des remblais graveleux.

Les différents profils présentés en Figure 65, ne présentent que peu de cohérence apparente, si ce n'est pour les profils de VBS et de pression d'injection Pi, tous deux marqueurs de l'argilosité du milieu.

A 2.0 m de profondeur, à la limite inférieure des remblais sablo-graveleux, les fluctuations des valeurs de VBS, marqueur de l'argilosité du matériau, correspondent aux variations de la pression d'injection Pi. Plus en profondeur, la cohérence des deux profils est tout à fait satisfaisante, hormis au-delà de 10 m de profondeur où l'augmentation des valeurs de VBS n'est pas reportée sur le profil de la pression d'injection.

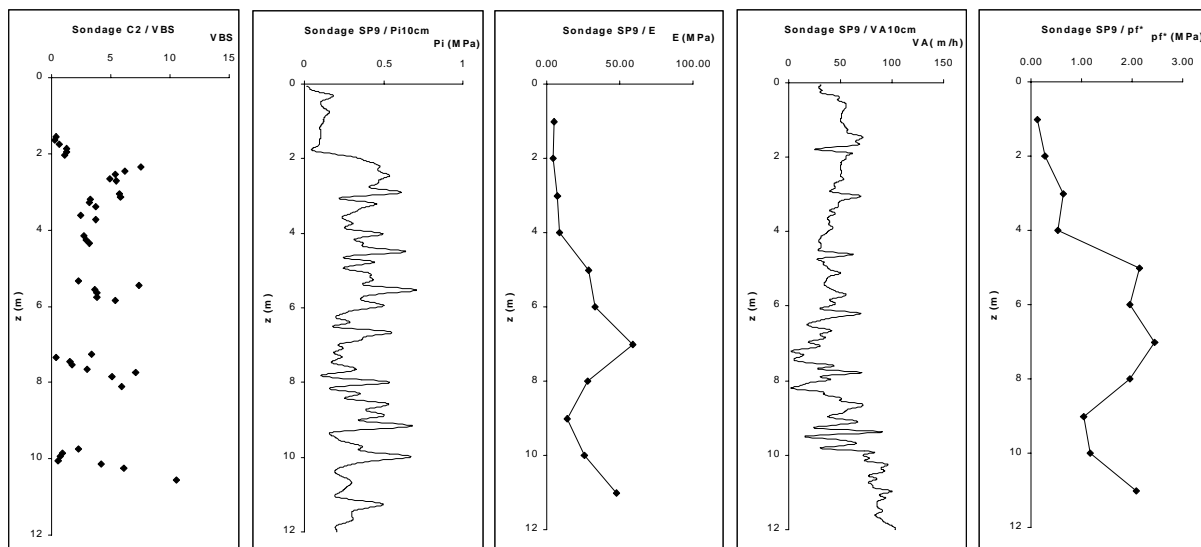


Figure 65 : Mise en parallèle des profils obtenus de droite à gauche : les valeurs de VBS sur les échantillons prélevés en C2, les valeurs de pi^* et E au sein du sondage SP9, les profils diagrammiques de VA et Pi, lissés sur une fenêtre de taille 0.10 m

On remarque aussi, qu'à l'échelle du prélèvement, la VBS varie très rapidement de 1 à 10 pour des profondeurs d'environ 0.10 m. Ces fortes variations, visibles aussi sur le profil de Pi

révèlent une variation très rapide de l'argilosité du milieu et peuvent expliquer pourquoi les échantillons prélevés à 10.40 m de profondeur manifestent un comportement différent des autres échantillons.

Chapitre II -

Exploitation des données diagraphiques et pressiométriques - Homogénéité et variabilité. Echelles d'observation et corrélations

Lors des forages destructifs, les coupes établies par les sondeurs dépendent en grande partie de l'expérience de pilotage de la foreuse. En effet, en forage roto-percussion, avec injection de fluide de forage, du GSP dans notre cas, le foreur note les changements de formations lithologiques lorsqu'il perçoit des variations de couleur ou de taille des cuttings lors de la remontée des matériaux forés ou bien des modifications des paramètres de fonctionnement de la machine en cours de forage (vitesse d'avance plus ou moins élevée selon la nature des matériaux traversés).

Toutefois, en pratique, cette coupe établie sur le chantier n'est que la base de travail du géotechnicien, qui peut la modifier en fonction des résultats des essais pressiométriques et de sa connaissance du site.

A l'issue de la phase 2, la synthèse des coupes lithologiques établies par les sondeurs lors des forages destructifs permet de proposer une coupe synthétique du sous-sol. Nous retiendrons :

- 2.00 m environ de matériaux de remblais à éléments graveleux
- une formation à prédominance argileuse. Compte tenu de son épaisseur très variable, il est bien difficile de définir une limite unique pour la formation à l'échelle du site, la base se situerait entre 3.70 m (SP6) et 8.30 m de profondeur (SP2). Au regard des sondages carottés C1 et C2, la limite de la formation peut être affinée et posée à l'échelle du site entre 4.50 m et 6.10 m.
- au-delà, le substratum calcaire altéré du Stampien, très hétérogène, à passées argileuses et sableuses

Le profil pressiométrique SP9, peut être rapporté à cette coupe type, avec :

Au sein des matériaux de remblai et argiles graveleuses, des valeurs pressiométriques médiocres : p_i^* de l'ordre de 0.2 à 0.5 MPa et E_m compris entre 4.3 et 5.0 MPa.

Les matériaux argilo-marneux traversés entre 1.70 et 4.50 m de profondeur présentent des valeurs de p_i^* de l'ordre de 1 MPa et des modules pressiométriques de l'ordre de 8 MPa.

Au sein des marno-calcaires sous-jacents, les valeurs pressiométriques mesurées marquent un niveau résistant jusqu'à 8.50 m de profondeur. Les p_i^* mesurées sont de l'ordre de 3 MPa et parfois supérieures à 4 MPa, les modules associés fluctuent entre 28 et 59 MPa, ce qui reste très modeste pour des matériaux calcaires.

Au sein du substratum calcaire, les moindres valeurs pressiométriques sont attribuées à des passées sableuses ou des niveaux argileux décrits par le sondeur et qui se vérifient au niveau du sondage carotté C2. Les valeurs de p_i^* mesurées au droit de SP9 descendent alors à 1.8 MPa, pour un module de 13.8 MPa. Précisons que les valeurs pressiométriques obtenues au sein des "calcaires" du Stampien peuvent être bien inférieures, mais se pose alors le problème de la représentativité de la valeur pressiométrique mesurée. Au sein des passées sableuses, les essais ne sont pas toujours valables, le mode de forage utilisé n'est que toléré par la norme pressiométrique et le fluide d'injection utilisé (du GSP) n'est pas aussi performant que la boue pour la bonne tenue des parois du forage.

Afin de permettre l'exploitation enregistrements de paramètres de forage, les signaux diagraphiques sont filtrés à partir du logiciel Scanner (cf. 1^{er} partie), qui permet d'éliminer la part du signal non porteuse d'information (Figure 66).

Compte tenu des différents supports de mesure, pour chaque valeur pressiométrique, nous considérons la moyenne du paramètre de forage traité sur un intervalle de 0.40 m, soit 0.20 m de part et d'autre de la cote de l'essai pressiométrique (2^{ième} partie).

A chaque cote d'essai pressiométrique correspondent quatre valeurs diagraphiques, VA, Pi, Po, CR (la vitesse d'avance, la pression d'injection, la pression sur outil et la pression de rotation), soit les paramètres diagraphiques communs à l'ensemble des conditions de forage, qui sont aussi les paramètres les plus couramment utilisés lors de campagnes de reconnaissance "standards".

Les individus pour lesquels le rapport E/p_i^* est inférieur à 5 sont considérés comme suspects et ne sont pas intégrés à la base de données. Ce critère élimine automatiquement tous les essais pour lesquels la courbe pression - volume témoigne d'un essai que nous qualifierons de "raté" qui ne doit pas être interprété, ainsi que les essais pour lesquels les pressions limites mesurées sont très importantes par rapport au module pressiométrique, ce qui peut être dû à altération des parois du sondage lors du processus de forage. Le tableau récapitulatif des données est reporté en annexe 24. Nous reconnaissons que cette méthode de sélection des données peut être contestée car nous savons que, contrairement au module pressiométrique E, les valeurs de p_r^* et p_i^* sont peu affectées par le remaniement des parois du forage. Toutefois, le rapport E/p_i^* constitue un critère rapide et efficace de sélection des "bons" essais.

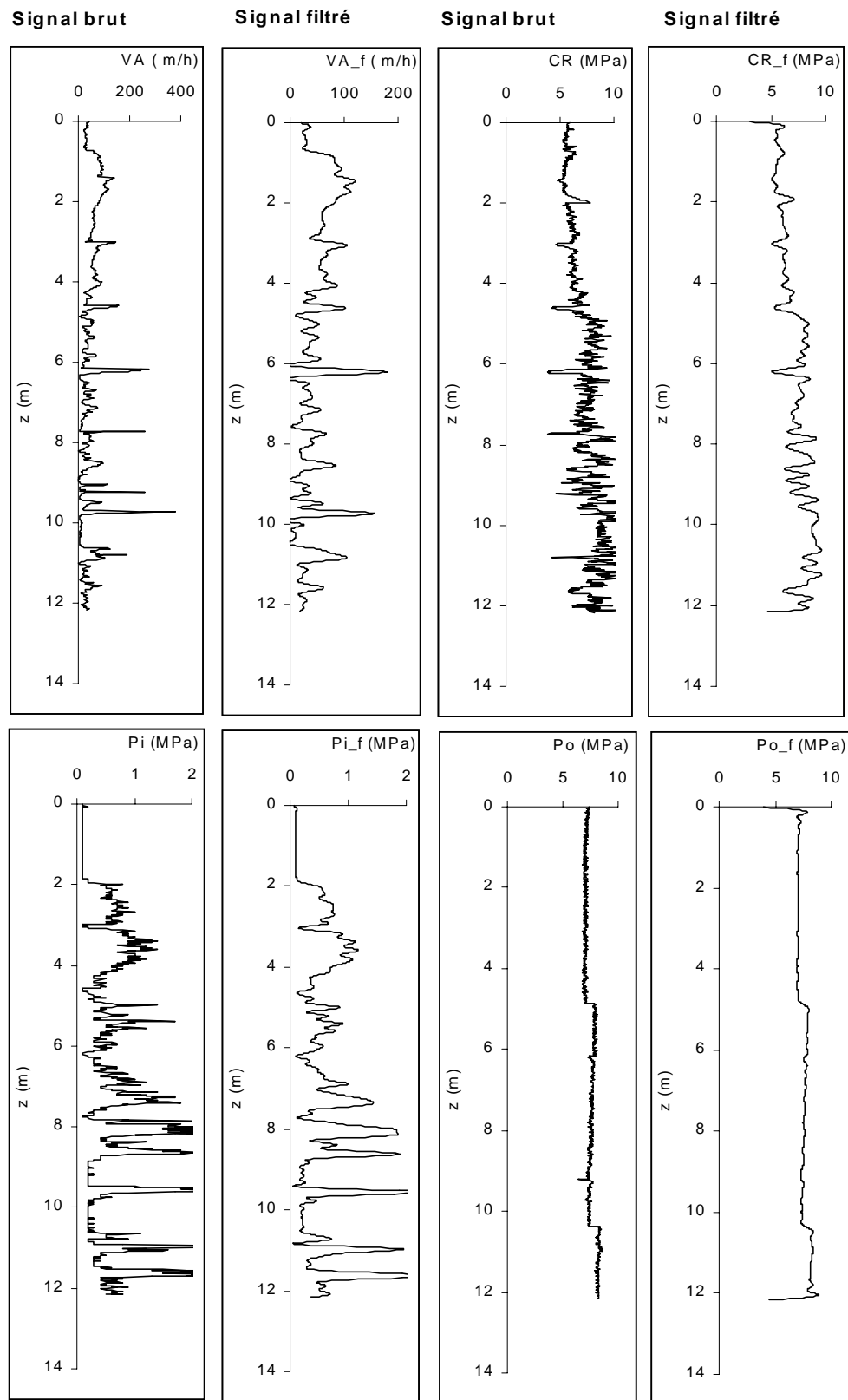


Figure 66 : Passage entre signaux bruts et signaux filtrés par le logiciel Scanner - Forage SP4

1. Choix de l'échelle de travail ?

L'analyse factorielle réalisée sur l'ensemble des données jugées représentatives permet d'apprécier les liens potentiels entre les différentes variables (analyse du cercle des corrélations) et de juger de la répartition des individus dans le premier plan factoriel. Nous avons pris en compte les variables d'étude suivantes :

- **Les conditions de forage :**

- La machine de forage utilisée : "**j**" (foreuse BE2030), "**v**" (foreuse BE3050) ou "**s**" pour la Socomafor
- L'équipe de forage : "**LL**", "**PV**" ou "**OC**"
- Le type d'outil utilisé : "**P**" (taillant à Plaquettes), "**B**" (outil à Boutons), "**T**" (Tricône)

- **La nature du sol**

- Selon la coupe établie par le sondeur :

Compte tenu de la multiplicité des termes usités dans l'établissement des log lithologiques établis en cours de sondage et pour limiter le nombre de variables, nous avons dû regrouper différents matériaux sous une même catégorie. En ce sens, la catégorie "Arg" regroupe tous les matériaux dont le premier terme descriptif est "Argile", (argile limoneuse, argile graveleuse, argile sableuse ...), mais également les matériaux limoneux.

- "**Arg**" (matériaux argileux au sens large et limoneux),
 - "**Remb**" (remblais),
 - "**MarnoC**" (marno-calcaire),
 - "**Cal**" (Calcaire),
 - "**?sond**" pour les matériaux non définis par le sondeur.
- Selon un découpage basé sur les valeurs pressiométriques, avec :
 - "**A_p**" lorsque $p_f^* < 1$ MPa et $E < 11$ MPa,
 - "**B_p**" si $p_f^* < 1$ MPa et $E > 11$ MPa,
 - "**C_p**" si $p_f^* > 1$ MPa et $E > 11$ MPa,
 - "**?_p**" pour $p_f^* > 1$ MPa et $E < 11$ MPa

Au regard des coupes lithologiques établies par les sondeurs, les groupes A_p et B_p correspondent aux matériaux de couverture (remblais et "argiles"). Ils regroupent également les très faibles valeurs obtenues dans le substratum altéré. Toutefois, dans cette formation,

les faibles valeurs pressiométriques obtenues ont été éliminées via le critère de sélection basé sur la valeur du rapport E/p_f^* .

La catégorie C_p est à mettre en relation avec les matériaux calcaire et marno-calcaire constitutifs du substratum calcaire.

- **La profondeur de l'essai pressiométrique "Zessai"**
- **Les paramètres de forage communs à l'ensemble des conditions de forage**
 - VA (vitesse d'avance)
 - P_i (pression d'injection)
 - P_o (pression sur outil)
 - CR (pression de rotation)
- **Les paramètres pressiométriques**
 - p_f^* (pression de fluage nette)
 - E (module pressiométrique)

L'analyse factorielle (Figure 67), menée sur la base de données exempte des valeurs pressiométriques jugées suspectes et avec les paramètres de forage filtrés et moyennés sur 0.20 m de part et d'autre de la cote de l'essai pressiométrique considéré, montre que les données doivent être traitées séparément, les conditions de forage constituant le critère de ségrégation prépondérant, la lithologie n'étant que secondaire.

L'examen du cercle des corrélations et de l'espace des individus met en évidence une nette séparation des individus selon les conditions de forages utilisées.

Ainsi, sur le cercle des corrélations nous observons trois pôles :

- le pôle v/P/LL essentiellement expliqué par l'axe F2,
- le pôle j/B/PV dans le quart sud-ouest du cercle des corrélations et enfin
- le pôle s/T/OC essentiellement porté par l'axe F1.

Notons que les pôles v/P/LL et j/B/PV sont constitués de 3 points, alors que le pôle s/T/OC n'est représenté que par un seul point. Ceci est dû au fait qu'aucun des paramètres constitutifs du pôle (équipe de forage (OC), outil (Tricône), machine (Socomafor)) n'a jamais été testé en dehors de ce triplet. En d'autres termes, l'équipe "LL" n'a jamais foré avec un outil Tricône ou la foreuse Socomafor.

Pour les pôles v/P/LL et j/B/PV, les points, représentant les variables (machine), (outil), (équipe de forage), sont distincts, car deux des forages de la base de données ont été réalisés en interchangeant les paramètres (outil) et (machine). Les forages SP7jPLL et SP7jBLL font intervenir le sondeur "LL" sur la machine "j" (BE2030) avec l'outil à plaquettes,

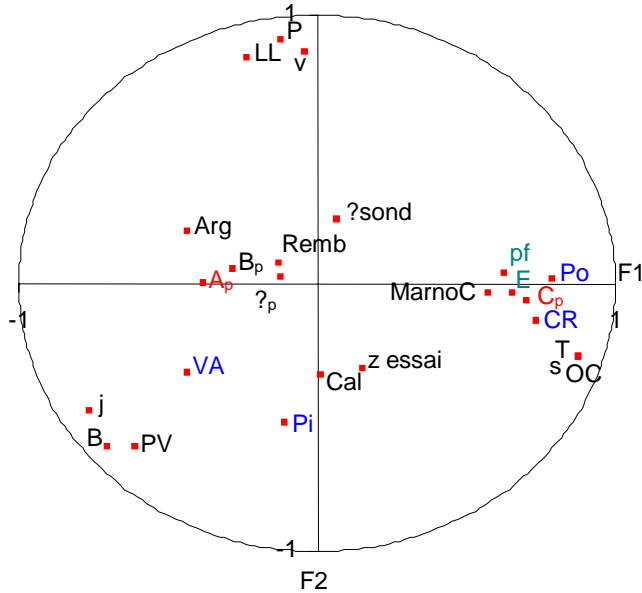
puis pour la même équipe et la même machine de forage, le forage a été exécuté à l'aide d'un outil à boutons. Ce qui explique la position intermédiaire des forages SP7jPLL et SP7jBLL dans le plan factoriel F1/F2.

L'analyse combinée du cercle des corrélations et du tableau regroupant les moyennes calculées sur les variables utilisées pour l'analyse factorielle montre que les conditions de forage "sTOC" correspondent aux moyennes des vitesses d'avance les plus faibles et ce malgré une pression sur outil et un couple de rotation des plus élevés. Toutefois, les faibles vitesses d'avance sont à mettre en relation avec les paramètres pressiométriques les plus importants (Tableau 12).

L'information lithologique obtenue à partir de la coupe établie par le sondeur ne permet pas de scinder de façon évidente les individus en plusieurs groupes. En revanche les groupes établis à partir des valeurs pressiométriques se distinguent plus aisément, notamment les individus appartenant à la formation A_p , de ceux regroupés dans la formation C_p , la formation B_p ne se distinguant que très peu de la formation A_p .

Remarquons que par rapport à la coupe établie par le sondeur, les variables "Arg" et " A_p " sont très proches ainsi que les variables "MarnoC" et " C_p ". Ceci confirme que les valeurs pressiométriques permettent de distinguer deux classes de matériaux : les matériaux de couverture et les marno-calcaire et calcaire du Stampien. Le critère de classement repose sur la pression de fluage nette : pour les matériaux de couverture, $p_f^* < 1$ MPa et pour le substratum $p_f^* > 1$ MPa.

Cercle des corrélations ensemble du site de l'IUT
plan F1/F2



Espace des individus - Ensemble du site de l'IUT
Plan factoriel F1 / F2

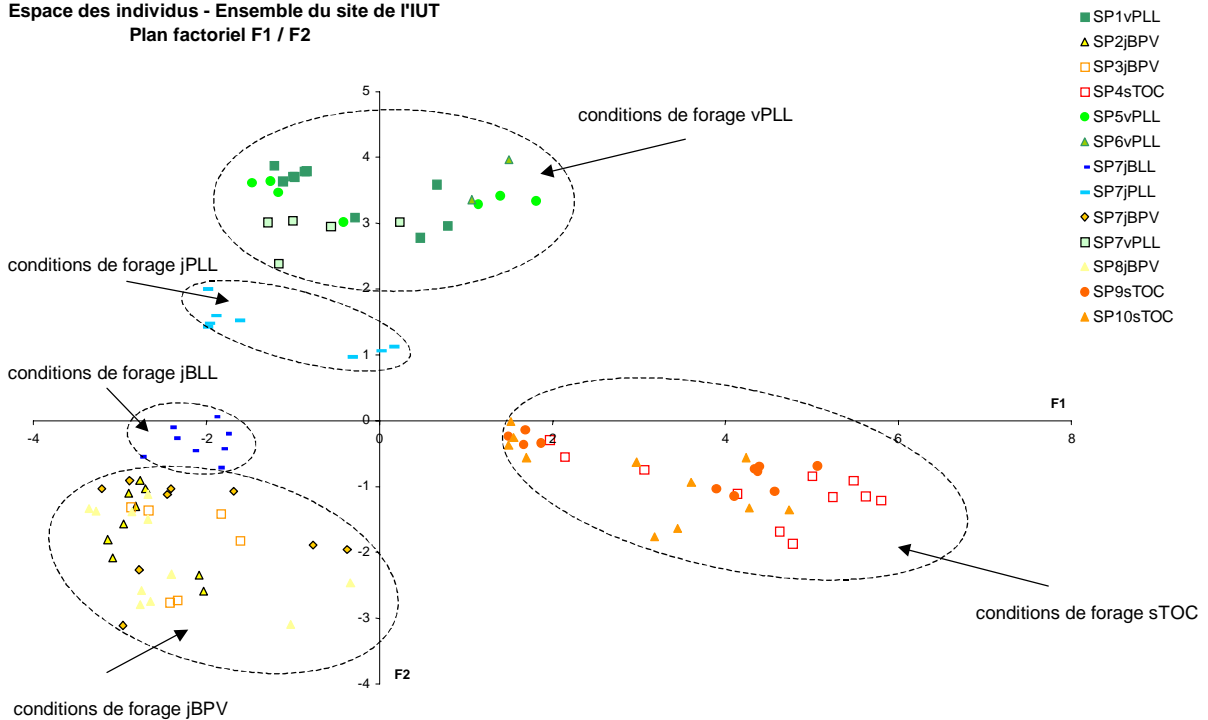


Figure 67 : Plan factoriel F1/F2 et cercle des corrélations obtenus sur l'ensemble des données pressiométriques et diagraphiques à la fin du chantier.

vPLL	VA (m/h)	Pi (MPa)	Po (MPa)	CR (MPa)	pf* (MPa)	E (MPa)
moyenne	48.8	0.3	3.5	2.5	1.2	16.3
écart type	40.8	0.3	1.5	2.5	0.9	12.9
CV	84%	112%	42%	99%	74%	79%
N	24	24	24	24	24	24

jBPV	VA (m/h)	Pi (MPa)	Po (MPa)	CR (MPa)	pf* (MPa)	E (MPa)
moyenne	86.8	0.6	1.9	1.7	0.8	11.3
écart type	43.4	0.4	1.4	0.5	0.5	7.9
CV	50%	62%	76%	31%	70%	70%
N	35	35	35	35	35	35

Socomafor	VA (m/h)	Pi (MPa)	Po (MPa)	CR (MPa)	pf* (MPa)	E (MPa)
moyenne	49.3	0.5	5.9	5.8	1.3	28.2
écart type	22.4	0.3	1.3	1.3	0.8	22.3
CV	45%	61%	23%	23%	61%	79%
N	33	33	33	33	33	33

jBLL	VA (m/h)	Pi (MPa)	Po (MPa)	CR (MPa)	pf* (MPa)	E (MPa)
moyenne	95.8	0.6	2.8	3.2	0.6	12.6
écart type	53.6	0.1	1.4	0.3	0.1	5.6
CV	56%	19%	49%	8%	23%	45%
N	8	8	8	8	8	8

jPLL	VA (m/h)	Pi (MPa)	Po (MPa)	CR (MPa)	pf* (MPa)	E (MPa)
moyenne	70.4	0.5	2.5	2.6	1.0	19.4
écart type	32.3	0.2	1.7	0.4	0.7	11.3
CV	46%	38%	70%	16%	71%	58%
N	9	9	9	9	9	9

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des valeurs statistiques obtenues sur les paramètres pressiométriques et moyennes des paramètres de forage pour les différentes conditions de forage.

Si l'on revient sur les données, le tableau récapitulatif (Tableau 12) met en évidence des coefficients de variation importants tant pour les paramètres de forage que pour les paramètres pressiométriques.

Contrairement à ce que nous attendions pour les paramètres pressiométriques, les coefficients de variations pour les pressions de fluage sont aussi importants que ceux obtenus pour les modules pressiométriques. Toutefois, ceci s'explique par le fait que les grandeurs regroupées dans le tableau sont calculées pour l'ensemble des individus sans distinction lithologique. Les coefficients de variations reflètent donc les écarts de valeurs entre les deux grands ensembles de sol : les "matériaux de couverture" pour lesquels $p_f^* < 1\text{MPa}$ et les matériaux dits "marno-calcaires" où $p_f^* > 1\text{MPa}$).

Pertinence de la répartition statistique en deux formations types

Nous avons donc scindé la base de données suivant deux groupes : les matériaux pour lesquels $p_f^* < 1$ MPa, soit les "matériaux de couverture", le second groupe est constitué par les individus restants, ils correspondent globalement au substratum "marno-calcaire".

Les moyennes et écart types obtenus pour ces deux types de matériaux et selon les conditions de forage sont repris Tableau 13 et Tableau 14.

	pf* <1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* <1 MPa	pf* >1 MPa
vPLL	pf* (MPa)		E (MPa)	
moyenne	0.6	2.1	10.5	25.9
écart type	0.2	0.6	9.0	12.7
CV	35%	28%	86%	49%
N	15	9	15	9
jBPV				
moyenne	0.5	1.6	9.9	15.8
écart type	0.2	0.5	8.0	5.4
CV	35%	33%	81%	34%
N	27	8	27	8
Socomafor				
moyenne	0.4	1.8	8.2	39.7
écart type	0.3	0.5	4.7	20.2
CV	59%	28%	57%	51%
N	12	21	12	21
jBLL				
moyenne	0.6	*	12.6	*
écart type	0.1	*	5.6	*
CV	23%	*	45%	*
N	8	0	8	0
jPLL				
moyenne	0.5	1.9	15.2	28.0
écart type	0.1	0.1	10.6	7.0
CV	16%	5%	70%	25%
N	9	3	6	3
Ensemble du site fin phase 2.2 (essais suspects exclus)				
moyenne	0.5	1.9	10.5	31.1
écart type	0.2	0.6	8.0	18.5
CV	38%	30%	76%	60%
N	68	41	68	41

Tableau 13 : Tableau récapitulatif des valeurs statistiques obtenues pour les paramètres pressiométriques p_f^ et E à la fin de la phase de reconnaissance 2.2.*

Si l'on considère une ségrégation des individus suivant la valeur de p_f^* (inférieure ou supérieure à 1 MPa), il est rassurant de constater que les valeurs pressiométriques ne dépendent pas des conditions de forage.

Ainsi les écarts observés (Tableau 12) résultaient uniquement de l'hétérogénéité du sous-sol, selon les points de sondages. La part des individus appartenant au substratum marno-calcaire étant plus ou moins importante selon les points de reconnaissance.

	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa
vPLL	VA (m/h)		Pi (MPa)		Po (MPa)		CR (MPa)	
moyenne	63.7	24.1	0.2	0.3	3.3	3.9	3.0	1.7
écart type	45.3	6.8	0.3	0.3	1.4	1.4	2.7	1.9
CV	71%	28%	115%	108%	44%	36%	90%	108%
N	15	9	15	9	15	9	15	9
jBPV								
moyenne	88.3	81.8	0.6	0.7	1.5	3.2	1.6	2.1
écart type	44.1	40.3	0.4	0.4	0.9	1.9	0.4	0.6
CV	50%	49%	62%	58%	63%	59%	27%	29%
N	27	8	27	8	27	8	27	8
Socomafor								
moyenne	51.7	47.9	0.3	0.5	5.3	6.2	4.9	6.3
écart type	18.4	24.3	0.2	0.3	1.1	1.3	0.8	1.3
CV	36%	51%	53%	58%	21%	22%	17%	20%
N	12	21	12	21	12	21	12	21
jBLL								
moyenne	95.8	*	0.6	*	2.8	*	3.2	*
écart type	53.6	*	0.1	*	1.4	*	0.3	*
CV	56%	*	19%	*	49%	*	8%	*
N	8	0	8	0	8	*	8	*
jPLL								
moyenne	82.2	46.9	0.5	0.3	3.0	1.4	2.8	2.1
écart type	33.9	1.9	0.2	0.1	1.9	0.3	0.3	0.2
CV	41%	4%	35%	25%	63%	19%	9%	11%
N	6	3	6	3	6	3	6	3
Ensemble du site fin phase 2.2 (essais suspects exclus)								
moyenne	76.7	49.2	0.5	0.5	2.8	4.8	2.8	4.2
écart type	44.4	31.3	0.3	0.4	1.8	2.1	1.8	2.5
CV	58%	64%	70%	71%	65%	45%	65%	61%
N	68	41	68	41	68	41	68	41

Tableau 14 : Tableau récapitulatif des valeurs statistiques obtenues sur les paramètres pressiométriques et moyennes des paramètres de forage selon les conditions de forage et pour deux classes de matériaux ($p_f^* < 1$ MPa et $p_f^* > 1$ MPa).

La comparaison des tableaux 3 et 5 montre que les coefficients de variation des paramètres de forage, obtenus en distinguant deux groupes d'individus selon les valeurs de p_f^* sont peu différents de ceux obtenus pour l'ensemble des matériaux sans distinction de p_f^* .

Cela signifie que la dispersion des mesures diagraphiques inter-formation est du même ordre de grandeur que la variabilité des mesures intra-formation.

Nous retiendrons qu'entre les deux groupes d'individus, marqués par des propriétés mécaniques différentes ($p_f^* < 1$ MPa et $p_f^* > 1$ MPa), les paramètres de forage permettant de distinguer les deux ensembles varient selon les conditions de forage.

Ainsi, en moyenne la vitesse d'avance (VA) est un paramètre permettant de distinguer les deux groupes d'individus pour les conditions de forage vPLL et jPLL. La pression de rotation (CR) est discriminante pour les configurations vPLL et jBPV. En revanche, pour les valeurs acquises avec la Socomafor, aucun paramètre de forage ne permet, en moyenne, de séparer clairement les individus selon leur groupe d'appartenance ($p_f^* < 1$ MPa ou $p_f^* > 1$ MPa).

Variabilité mécanique à petite échelle

Si l'on retient uniquement les paramètres pressiométriques (Tableau 15), sur les 109 individus conservés dans la base de données représentant :

1. le site dans son ensemble,
2. le site en omettant les forages implantés au niveau de la zone "SP7" et
3. les seuls forages de la zone "SP7"

Ensemble du site	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* (MPa)	E (MPa)
	pf* (MPa)		E (MPa)			
moyenne	0.5	1.9	10.5	31.1	1.0	18.3
écart type	0.2	0.6	8.0	18.5	0.8	16.4
CV	38%	30%	76%	60%	73%	90%
N	68	41	68	41	109	109

Ens. site moins forages de la zone SP7	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* (MPa)	E (MPa)
	pf* (MPa)		E (MPa)			
moyenne	0.6	1.9	8.7	33.0	1.1	18.5
écart type	0.2	0.6	5.0	20.5	0.8	18.0
CV	37%	31%	57%	62%	70%	97%
N	40	27	40	27	67	67

Forages de la zone SP7	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* < 1 MPa	pf* > 1 MPa	pf* (MPa)	E (MPa)
	pf* (MPa)		E (MPa)			
moyenne	0.5	1.8	13.1	27.5	0.9	17.9
écart type	0.2	0.5	10.5	13.3	0.7	13.4
CV	35%	26%	80%	48%	78%	75%
N	28	14	28	14	42	42

Tableau 15 : Principales valeurs statistiques concernant les paramètres pressiométriques.

Nous observons qu'à l'échelle du site, en moyenne, les p_i^* sont de l'ordre de 0.5 à 0.6 MPa au sein des matériaux de couverture ($p_i^* < 1$ MPa) et de 1.8 à 1.9 MPa au sein du substratum dit "marno-calcaire" ($p_i^* > 1$ MPa). Les modules pressiométriques forment une plage de valeurs plus importante selon le nombre de forages considérés. Ils varient en moyenne entre 8.7 MPa et 13.1 MPa dans la formation "matériaux de couverture" et de 27.5 à 33 MPa dans le "marno-calcaire".

La comparaison des coefficients de variation selon l'échelle d'observation considérée : globale (2) ou locale (3) montre que la dispersion des valeurs à l'échelle du site est du même ordre de grandeur que celle obtenue pour les forages implantés dans la zone "SP7".

Pour la formation "matériaux de couverture", les coefficients de variation évoluent entre 35 - 37 % pour la pression de fluage et entre 57 et 80 % pour les modules pressiométriques. Pour la formation "marno-calcaire", ils prennent les valeurs de 26 et 31 % pour la pression de fluage et 48 et 62 % pour les valeurs de module pressiométrique.

La mise en parallèle des log diagraphiques (vitesse d'avancement, pression sur outil et couple de rotation) et log pressiométriques pour les forages de la zone "SP7" témoigne de la dispersion des informations obtenues au niveau d'une zone de mesures restreinte (Figure 68).

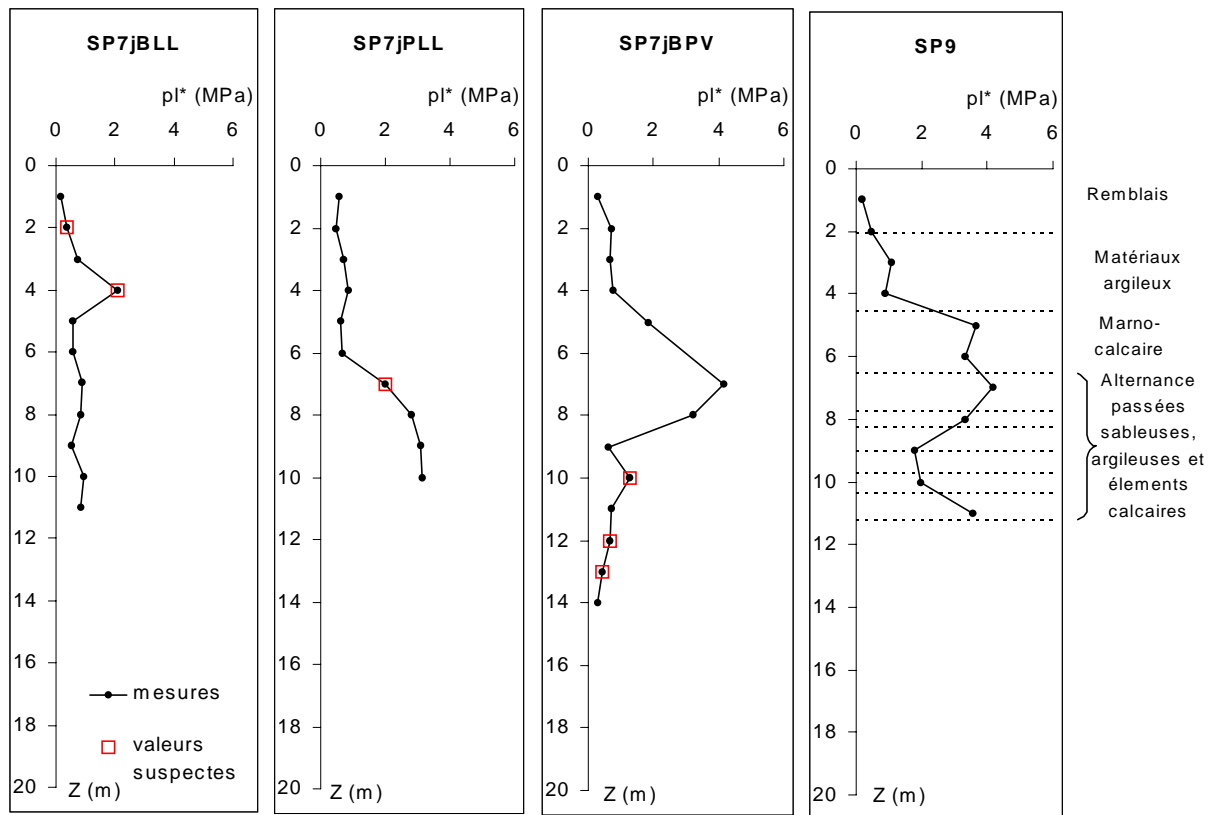
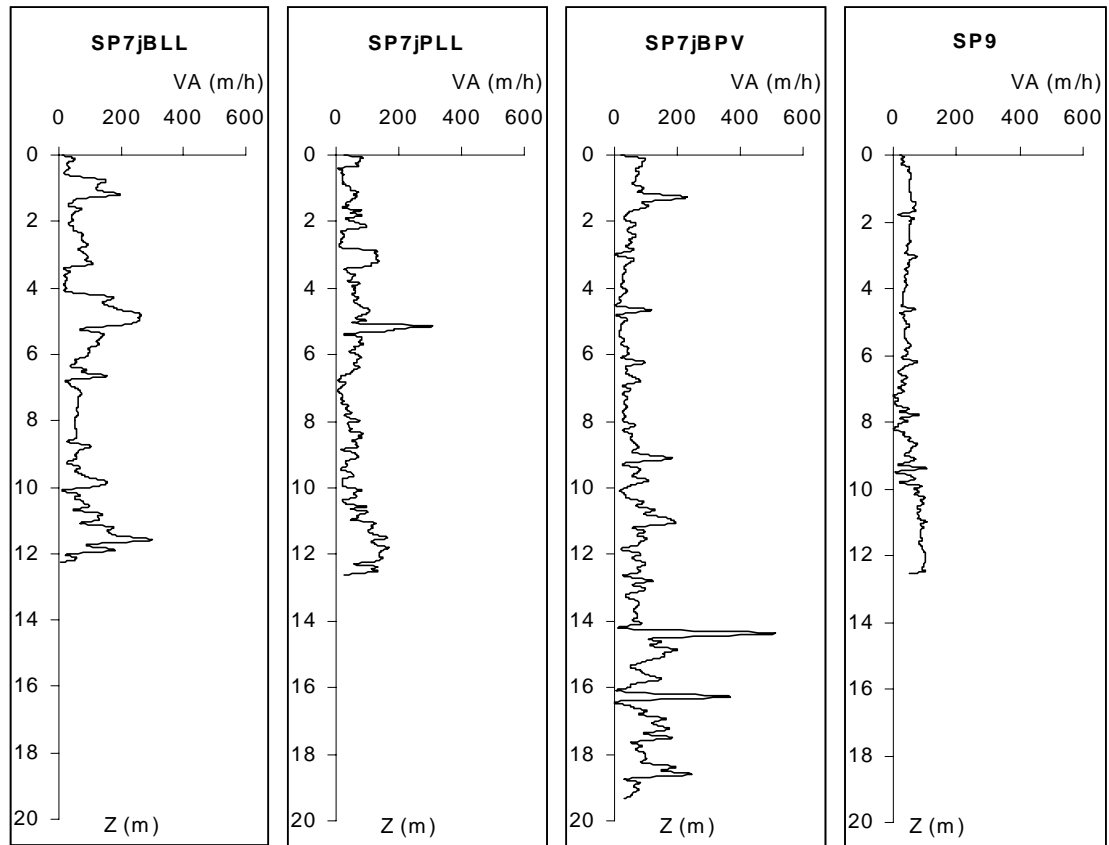


Figure 68 : Log des vitesses d'avance, log pressiométriques et coupe lithologique simplifiée obtenue au niveau du carotté C2 pour une zone restreinte de mesures, la zone "SP7".

La variabilité à l'échelle de la zone "SP7" est aussi importante qu'à l'échelle du site. Il se peut également que le "bruit de mesure" accentue les effets de la variabilité réelle des propriétés mécaniques des matériaux.

Une analyse détaillée des données montre qu'un nombre relativement important ($n=6$) de modules pressiométriques de la zone SP7 sont plus de 20 fois supérieurs à la pression limite correspondante. ($E = 40 \text{ à } 50 \times p_i^*$ en SP7jPLL à 5 m et en SP7jBPV à 4 m de profondeur. En revanche, à l'échelle du site le rapport E/p_l ne dépasse pas 20, sauf pour un individu repéré en SP8 à 5 m de profondeur.

Suite à l'analyse des données pressiométriques et diagraphiques selon les conditions de forage et à l'échelle du site nous retiendrons que :

- lorsque la base de données est scindée suivant deux groupes d'individus : les "matériaux de couverture" ($p_i^* < 1 \text{ MPa}$) et les matériaux "marno-calcaire" ($p_i^* > 1 \text{ MPa}$), les caractéristiques pressiométriques mesurées ne dépendent pas des conditions de forage. Ce résultat est tout à fait conforme à nos attentes, les essais pressiométriques étant conduits suivant une procédure normalisée.
- les deux ensembles caractérisés par la pression de fluage présentent, en moyenne, des réponses diagraphiques différentes et des paramètres de forages discriminants variables selon les conditions de forage. Ainsi, la vitesse d'avance explique les variations de propriétés mécaniques pour les conditions de forage vPLL et jPLL. C'est le couple de rotation, qui différencie le mieux les deux formations pour les conditions d'exécution jBPV. En revanche, les données diagraphiques acquises avec la Socomafor ne permettent pas de différencier les deux ensembles qui possèdent pourtant des propriétés mécaniques différentes pour les matériaux forés.
- la dispersion des valeurs diagraphiques est aussi importante intra-groupes qu'inter-groupes ("matériaux de couverture" et "marno-calcaire"). De même la dispersion des valeurs pressiométriques à l'échelle de la zone SP7 est voisine celle obtenue à l'échelle du site. Cette importante dispersion des mesures rend compte d'une réelle hétérogénéité des matériaux et des bruits attachés à la mesure.

2. Etablissement des corrélations utilisées dans l'estimation des paramètres pressiométriques

Les corrélations (paramètres de forages / paramètres pressiométriques) étant établies en cours d'investigation, nous avons choisi de rechercher des relations significatives entre paramètres pressiométriques et paramètres diagraphiques pour chaque condition de forage au sein des matériaux dit "argileux", regroupant les individus mesurés au sein des argiles, argiles sableuses, argiles graveleuses, limons ... et au sein des matériaux dit "calcaire" regroupant les éléments mesurés au sein des calcaires plus ou moins altérés, marno-calcaire... selon la description lithologique établie par le sondeur en cours de forage.

Les corrélations ont été établies au cours de l'exécution de la phase de reconnaissance 2.1, soit une partie des forages menés dans les conditions de forage vPLL et une partie de ceux exécutés suivant les conditions de forage jBPV.

A partir des seuls profils diagraphiques obtenus à l'issue de la reconnaissance phase 2.2 et des corrélations établies en phase 2.1, nous estimerons l'intervalle des valeurs pressiométriques probables pour les forages réalisés dans les conditions sTOC (phase 2.2). Les résultats de cette estimation seront confrontés aux profils pressiométriques mesurés (4^{ième} partie).

Nous verrons également si l'estimation des paramètres pressiométriques pour les forages de la seconde phase (phase 2.2) à partir de corrélations différentes, construites sur ces mêmes forages, permet de retrouver les valeurs pressiométriques mesurées.

L'idée de rechercher une corrélation entre paramètres de forage et paramètres pressiométriques n'est pas contre nature. En effet, on montre qu'une relation entre pression de fluage et vitesse d'avance est possible à l'échelle du site.

Bien que les gammes de valeurs de VA soient très différentes selon les conditions de forage et que la vitesse d'avance dépende de multiples paramètres de pilotage, une relation peut être établie pour chaque type de conditions de forage entre la moyenne des p_f^* mesurées sur le site et les moyennes de VA. Précisons que chacun des "points moyens" de la Figure 69 regroupe des valeurs correspondant à des lithologies différentes.

Il apparaît que plus la vitesse d'avancement est importante, plus les caractéristiques mécaniques du matériau sont faibles (Figure 69).

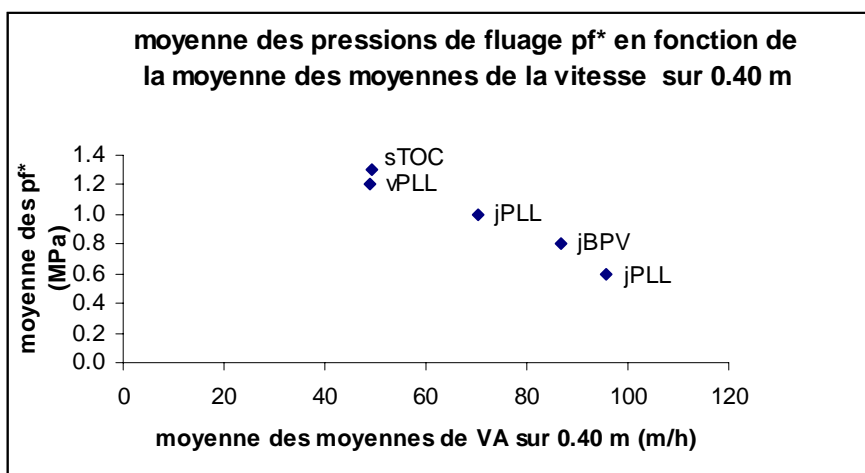


Figure 69 : Moyennes des pf^* obtenues pour chaque condition de forage en fonction des moyennes des moyennes des vitesses d'avance calculées sur un intervalle de 0.20 m de part et d'autre des cotes d'essais pressiométriques.

Toutefois, si l'on considère les résultats obtenus à partir de l'analyse factorielle, établir des relations entre les paramètres exige de distinguer les conditions de forage et les natures des matériaux.

Afin de prendre en considération un nombre de valeurs le plus important possible et en accord avec le fait que le sous-sol peut être divisé en 2 sous-ensembles, nous avons considéré, à partir des coupes établies par les sondeurs en cours d'exécution, les matériaux dit "argileux" et les matériaux dit "calcaires". Notons qu'ici la base de données est séparée suivant la coupe établie par le sondeur et ne correspond pas exactement, bien quelle en soit très proche, à une division des individus suivant le critère établi sur la valeur de p_f^* .

Pour les conditions de forage "vPLL", la sélection des **matériaux dits "argileux"** suivant la coupe établie par le sondeur et après élimination des valeurs suspectes, conduit à conserver 10 individus, nous obtenons (Figure 70) :

$$\ln (pf^*) = -0.09 \ln (VA/P_0) - 0.26 \quad r = - 0.32$$

$$\ln (E) = 0.49 \ln (CR) + 2.06 \quad r = 0.69$$

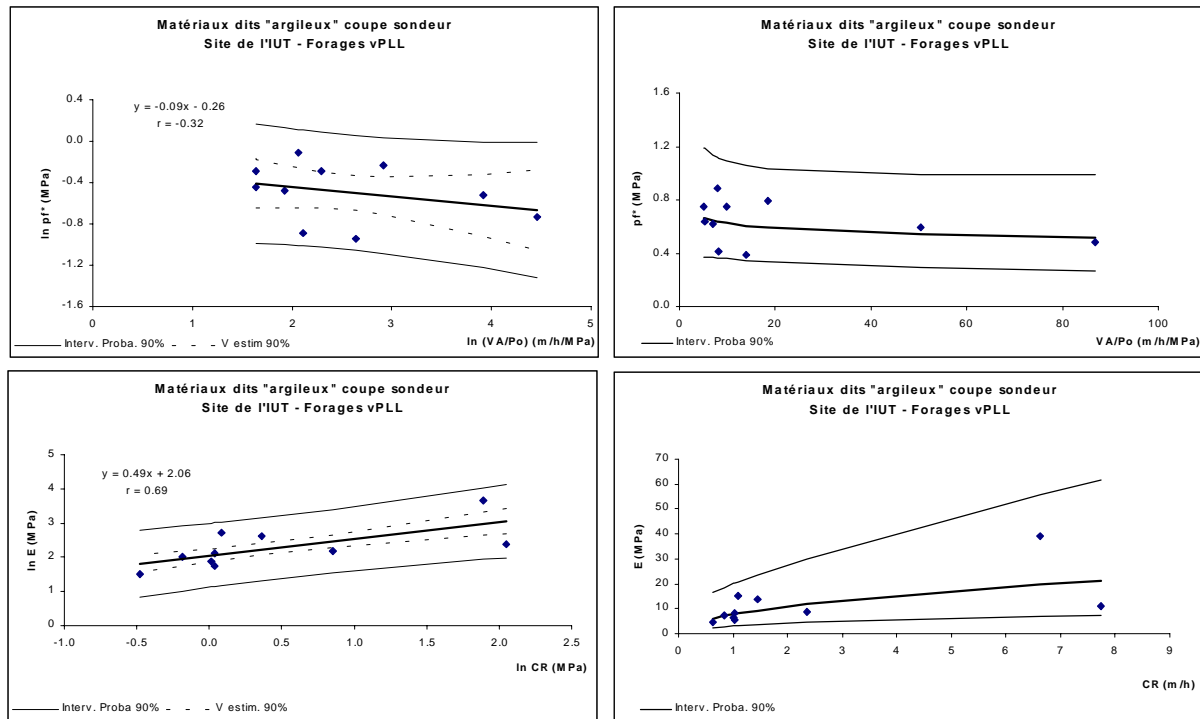


Figure 70 : Corrélations obtenues à partir des individus des forages vPLL - Matériaux dits "Argileux".

Les relations établies sur 10 individus sont médiocres, les tests réalisés suivant l'équation 5 du chapitre II montrent que l'existence d'une liaison entre $\ln(p_f^*)$ et $\ln(VA/Po)$ peut être admise au niveau de probabilité de 0.600 seulement, l'existence d'une liaison entre $\ln(E)$ et $\ln(CR)$ peut être admise au niveau de probabilité de 0.95.

Les intervalles notés (IP) sur les figures correspondent aux limites de confiance relatives aux valeurs individuelles. Les courbes situées de part et d'autre de la droite de régression définissent une zone de prédiction pour un niveau de confiance de $(1 - \alpha)$. Cela signifie par exemple que pour les conditions de forage vPLL et les matériaux argileux une valeur de VA/Po de 50 m/h/MPa permettra de prédire une valeur de p_f^* comprise entre 0.34 et 0.85 MPa pour un niveau de confiance de 80% [Dagnelie 98].

Suivant les mêmes conditions de forage, pour les **matériaux dits "Calcaires"** nous obtenons (Figure 71) :

$$\begin{aligned} \ln(p_f^*) &= -0.73 \ln(VA) + 3.02 & r &= -0.67 \\ \ln(E) &= -0.86 \ln(VA) + 5.92 & r &= -0.66 \end{aligned}$$

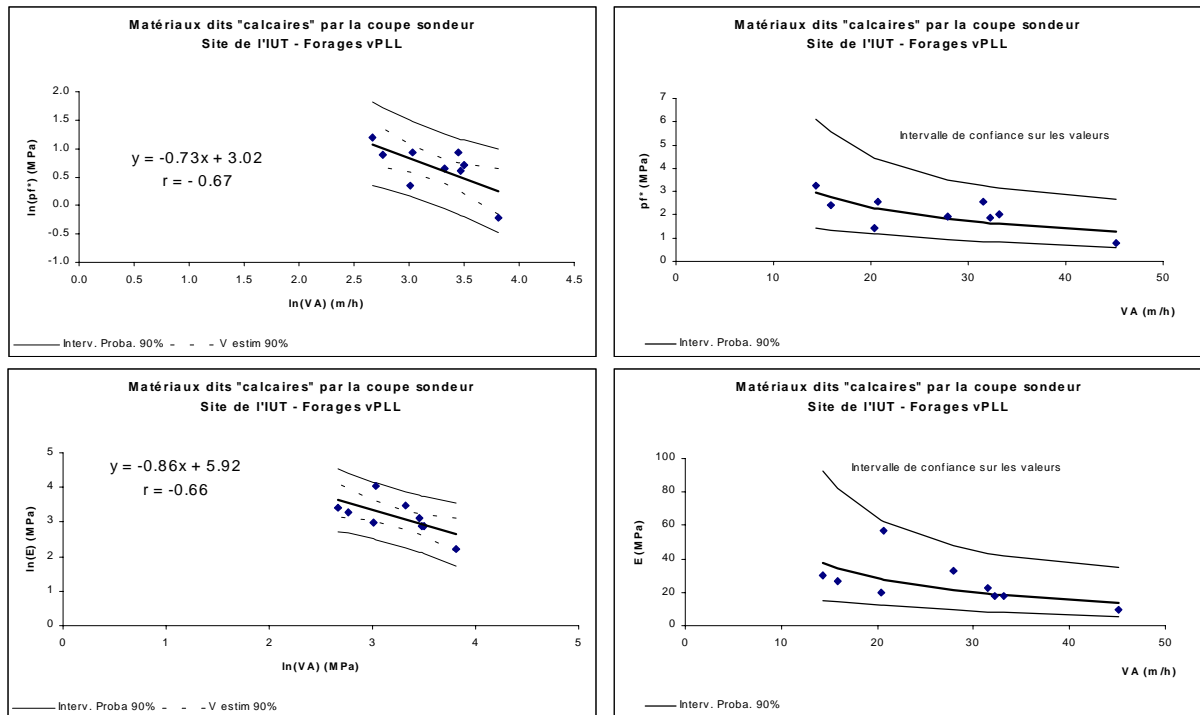


Figure 71 : Corrélations obtenues à partir des individus des forages vPLL - Matériaux dits "Calcaires" à partir de coupe établie en cours d'exécution des sondages)

Les relations établies pour les pressions de fluage et les modules pressiométriques peuvent être admises au niveau de probabilité 0.95.

Pour les conditions de forage "jBPV", les matériaux dits "argileux" suivant la coupe établie par le sondeur regroupent 18 individus (Figure 72).

Les relations obtenues sont :

$$\begin{aligned} \ln(pf^*) &= 0.55 \ln(CR) - 0.70 & r &= 0.37 \\ \ln(E) &= -0.28 \ln(Pi) + 2.21 & r &= -0.33 \end{aligned}$$

Les relations établies peuvent être admises, dans les deux cas, au niveau de probabilité de 0.800.

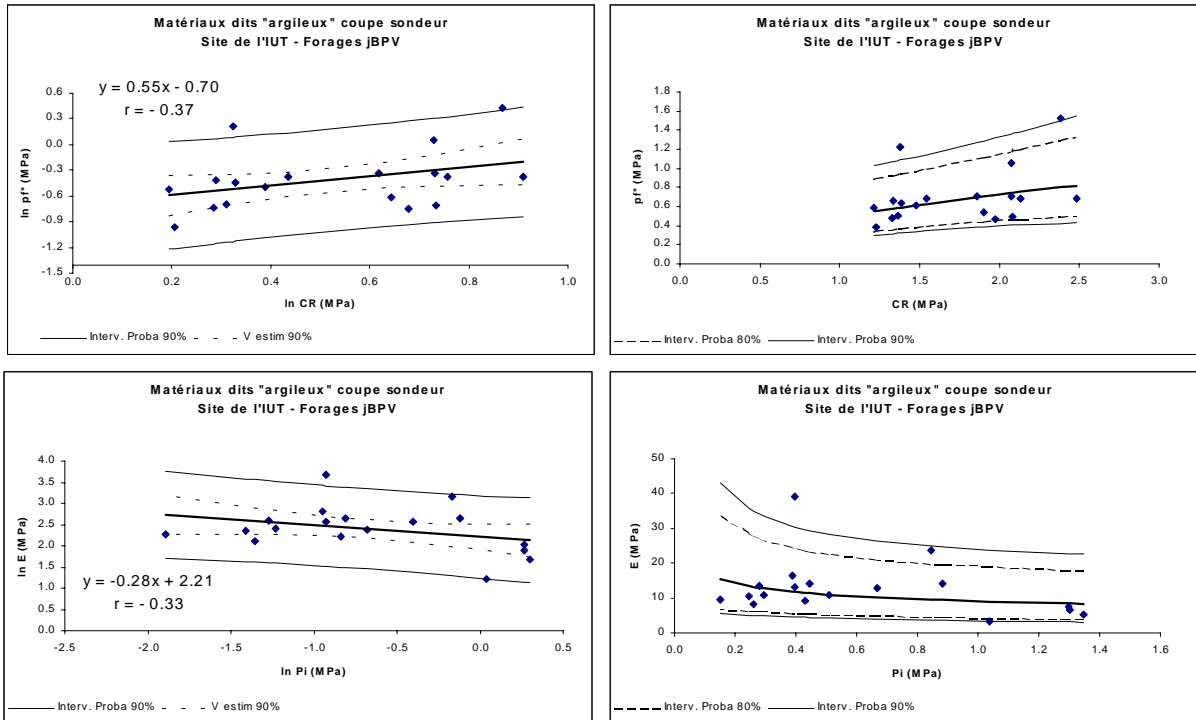


Figure 72 : Corrélations obtenues à partir des individus des forages jBPV - Matériaux dits "Argileux".

Pour les matériaux dits "Calcaires" (N= 10) nous obtenons (Figure 73) :

$$\ln (pf^*) = 1.80 \ln (CR) - 1.34 \quad r = 0.62$$

$$\ln (E) = 2.05 \ln (CR) + 0.84 \quad r = 0.68$$

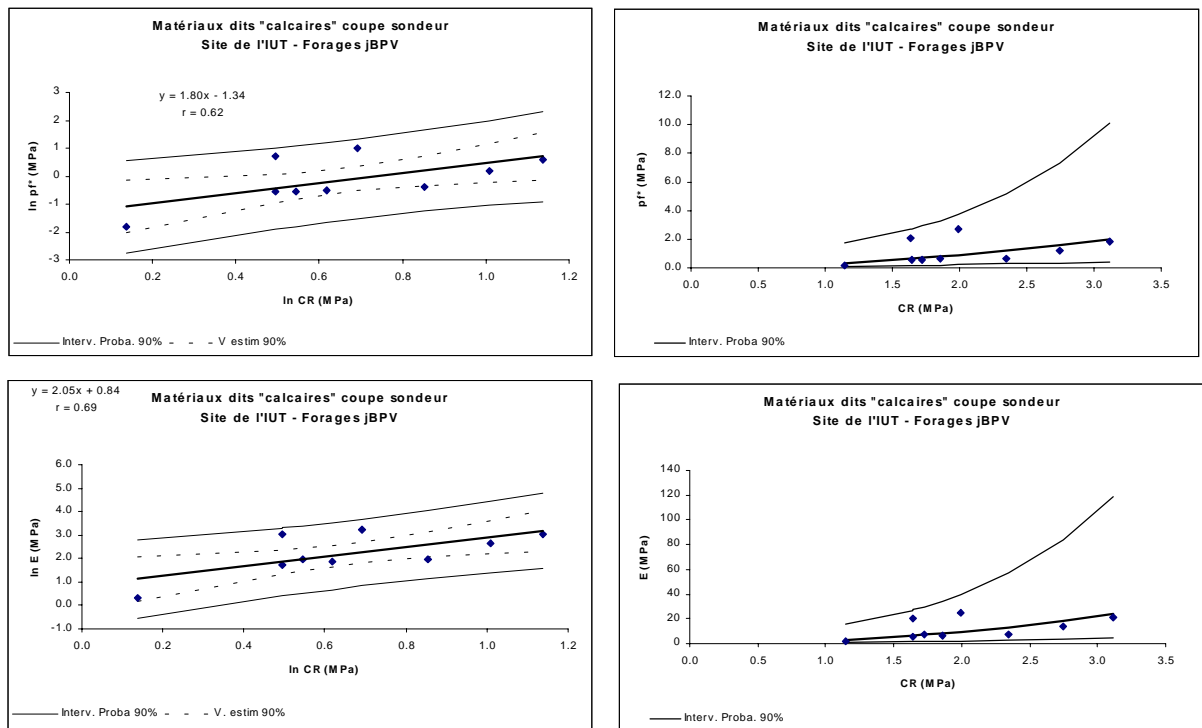


Figure 73 : Corrélations obtenues à partir des individus des forages jBPV - Matériaux dits "Calcaires"

Les relations peuvent être admises aux niveaux de probabilité de 0.900 pour la pression de fluage et 0.950 pour le module pressiométrique.

Pour les conditions de forage jBLL et jPLL, compte tenu du nombre restreint d'essais pressiométriques pour chaque condition de forage (8 valeurs en jBLL et 9 valeurs en jPLL), il n'a pas été possible de distinguer les matériaux dits "argileux" des matériaux dits "calcaires".

Nous obtenons les relations suivantes :

Pour jBLL :

$$\ln(pf^*) = -0.46 \ln(VA) + 1.24 \quad r = -0.40$$

$$\ln(E) = -3.77 \ln(Pi) + 6.55 \quad r = -0.45$$

Les relations peuvent être admises pour niveau de probabilité de 0.600.

Pour jPLL :

$$\ln(pf^*) = -2.53 \ln(CR) + 2.20 \quad r = -0.66$$

$$\ln(E) = -2.11 \ln(CR) + 4.70 \quad r = -0.52$$

Le niveau de probabilité permettant d'admettre la relation établie entre $\ln(pf^*)$ et $\ln(CR)$ est de 0.950, il n'est plus que de 0.800 pour le logarithme népérien du module pressiométrique.

Au regard de l'ensemble des relations établies pour le site lors de la phase de reconnaissance 2.1, pour les différentes conditions de forage et selon la lithologie, il apparaît une importante variabilité quant au paramètre explicatif des logarithmes népériens de la pression de fluage et du module pressiométrique.

Dans les argiles :

- $\ln(pf^*)$ est expliqué par $\ln(VA/Po)$ pour les conditions de forage "vPLL" et $\ln(CR)$ pour les conditions de forage jBPV
- $\ln(E)$ est expliqué par $\ln(CR)$ pour les conditions vPLL et $\ln(Pi)$ pour les conditions jBPV

Dans les calcaires

- $\ln(pf^*)$ est expliqué par $\ln(VA)$ pour les conditions de forage "vPLL" et $\ln(CR)$ pour les conditions de forage jBPV
- $\ln(E)$ est expliqué par $\ln(VA)$ pour les conditions vPLL et $\ln(CR)$ pour les conditions jBPV

Lorsqu'il n'y a pas de distinction lithologique,

- $\ln(pf^*)$ est expliquée par $\ln(VA)$ pour les conditions de forage jBLL et $\ln(CR)$ pour les conditions jPLL
- $\ln(E)$ est expliqué par $\ln(Pi)$ pour les conditions jBLL et $\ln(CR)$ pour les conditions jPLL

Dans tous les cas, la qualité des relations obtenues est médiocre et les intervalles de probabilité importants. Par exemple, pour les conditions de forage jBPV et les matériaux dits "argileux", une valeur de CR de 2MPa pourra conduire, pour un niveau de confiance de 80%, à une valeur de pf^* comprise entre 0.45 et 1.00 MPa.

Le récapitulatif des relations retenues pour l'estimation des intervalles pressiométriques est repris dans le tableau reporté en annexe 26.

Chapitre III -

Résultats

1. Propositions lithologiques à l'issue de la reconnaissance approfondie - Phase 2.1

Dans le cadre d'une étude géotechnique, le découpage du sous-sol peut être réalisé suivant différents critères et échelles d'observation. Les paramètres de décision peuvent être lithologiques ou mécaniques et considérés à l'échelle du forage ou à un niveau d'observation plus global, à l'échelle du site.

Voyons quelles sont les représentations lithologiques du site obtenues :

- à partir des coupes établies par les sondeurs,
- à partir des résultats pressiométriques et
- via le processus de découpage proposé en seconde partie de ce document.

Il faut bien comprendre que cette dernière proposition lithologique, construite par le processus algorithmique itératif et pour un seuil de convergence fixé, ne correspond pas à la lithologie réelle du sous-sol, mais représente une "image du milieu" intégrant la lithologie proposée par le sondeur ou le géotechnicien et la réponse diagraphique du sol vis à vis du processus de forage.

Les représentations lithologiques obtenues selon les critères de découpage (sondeur, résultats pressiométriques, processus itératif) sont considérées à l'échelle du forage, puis à l'échelle du site.

1.1. Etablissement d'une lithologie à l'échelle du forage

- **A partir de la coupe établie par le sondeur**

Devant les log lithologiques établis par le sondeur, le premier problème auquel nous sommes confrontés résulte de la multiplicité des termes employés. Ceux-ci reflètent :

- une réelle variabilité des terrains traversés
- la grande part de subjectivité entrant dans le choix des termes descriptifs. Rappelons que les coupes sont établies à partir des cuttings remontant par le fluide de forage, ce qui demande une grande part d'interprétation de la part du foreur et dans ces conditions, le mode de prélèvement n'est pas suffisamment précis pour faire une réelle différence entre une formation marno-calcaire ou un calcaire altéré (Figure 74).

Les log lithologiques établis pour deux sondages distants d'environ 3 mètres montrent que jusqu'à 8 m de profondeur, les profils pressiométriques présentent des tendances similaires, en revanche les coupes lithologiques établies par deux sondeurs différents sont sensiblement différentes. Au niveau du sondage SP7 le sondeur porte le toit du calcaire à 5.60 m de profondeur, alors qu'au niveau du sondage SP9, le toit du marno-calcaire est reporté à 4.50 m de profondeur, ce qui est tout à fait cohérent avec les profils pressiométriques obtenus. A ce stade, l'interprétation du géotechnicien sera déterminante.

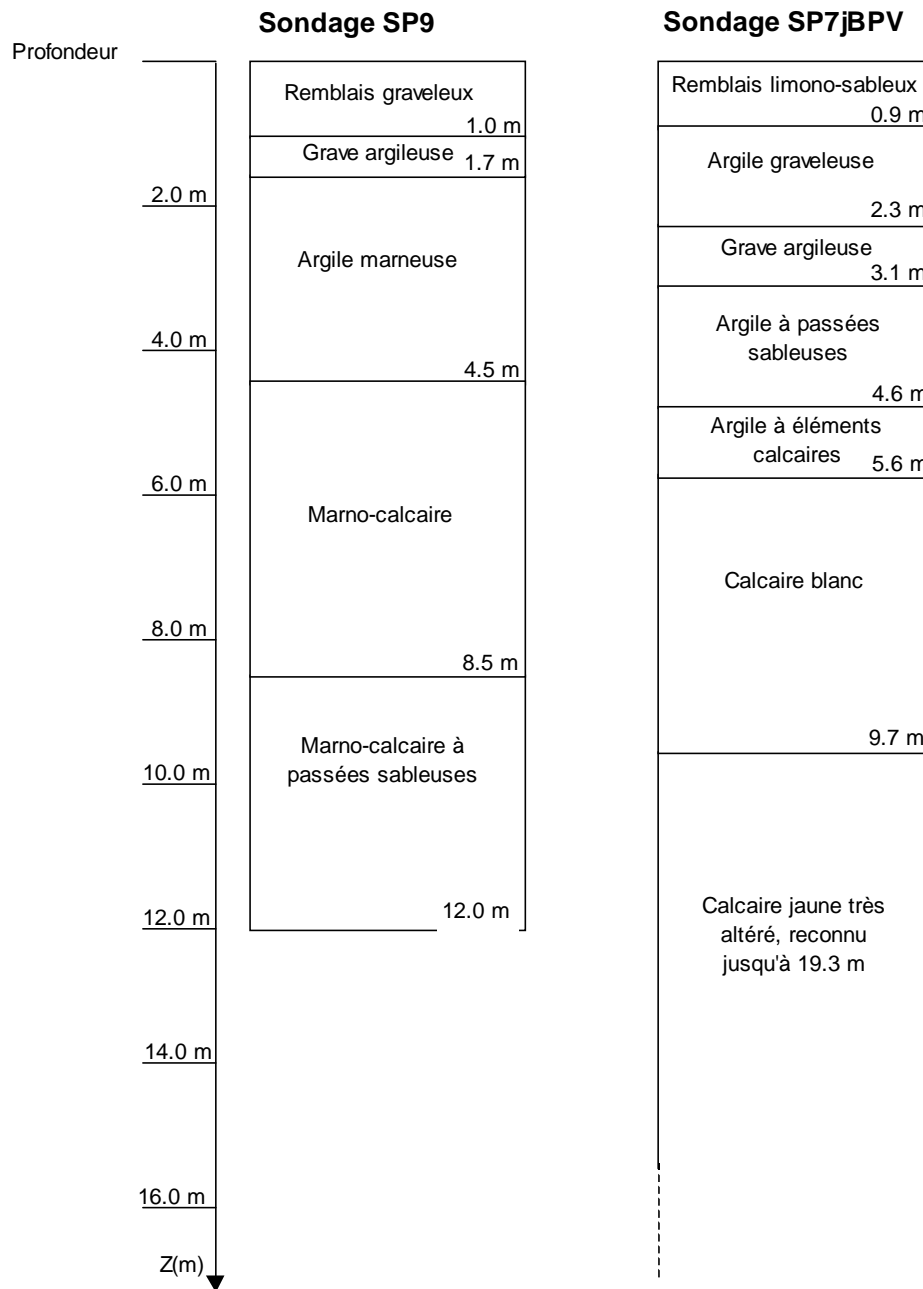


Figure 74 : Log lithologiques établis par deux équipes de sondage à partir de forages destructifs menés à environ 3 m l'un de l'autre.

Pour l'ensemble des forages, les coupes établies par les sondeurs et les log pressiométriques, montrent que la limite entre le substratum "calcaire" et les matériaux de couverture se situe, pour les valeurs extrêmes, entre 3.90 m (forage SP5) et plus de 14 m de profondeur forage SP2. Notons qu'en SP2 les faibles valeurs pressiométriques obtenues au sein de ce forage ne sont pas caractéristiques d'un matériau calcaire ou marno-calcaire. Toutefois à partir de 8.20, le foreur note la présence d'éléments calcaires dans les cuttings.

- **A partir du processus algorithmique proposé dans la méthodologie (2^{ième} partie)**

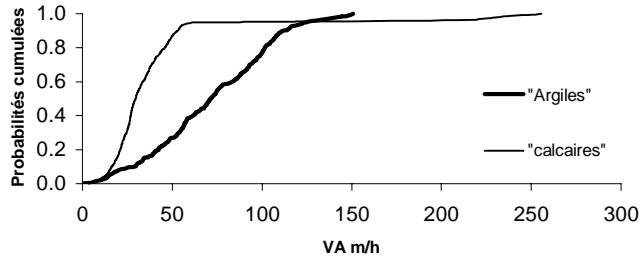
Afin de prendre en compte la réponse diagraphique du sol dans la détermination d'une proposition de coupe lithologique, nous avons retenu une conception bicouche du site. En effet, les corrélations disponibles pour le site ne concernent que deux classes de matériaux et un découpage lithologique plus fin ne serait pas utilisable pour l'estimation des intervalles de valeurs pressiométriques via les équations de régression.

Le choix des paramètres diagraphiques introduits dans le processus de calcul est indépendant des corrélations établies. L'utilisateur, sélectionne au plus deux paramètres de forage discriminants vis-à-vis des deux formations dont on souhaite établir le log des probabilités.

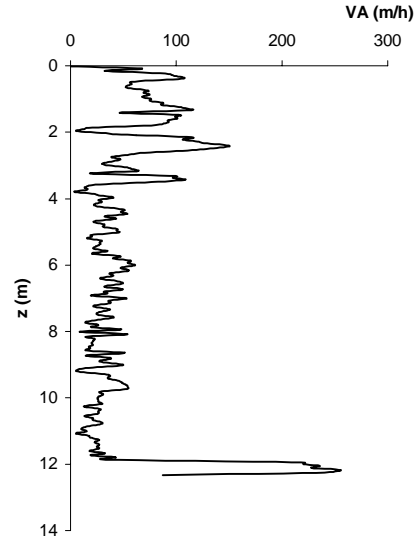
Pour le forage SP6, nous voyons que les réponses obtenues pour la vitesse d'avance et la pression sur outil permettent de séparer le milieu en deux formations distinctes (Figure 75). La distinction entre "argile" et "calcaire" est faite à partir de la coupe établie par le sondeur et des résultats pressiométriques. C'est pourquoi, la fonction de répartition des "calcaire" prend en compte les valeurs acquises au-delà de 12 m de profondeur où les vitesses enregistrées sont supérieures à 200 m/h et marquent très vraisemblablement la présence d'une passée sableuse au sein des matériaux dits "calcaires".

La répartition des individus suivant les groupes "argile" et "calcaire" sert de base au processus itératif et aide le géotechnicien à choisir les paramètres de forage à impliquer dans le processus itératif.

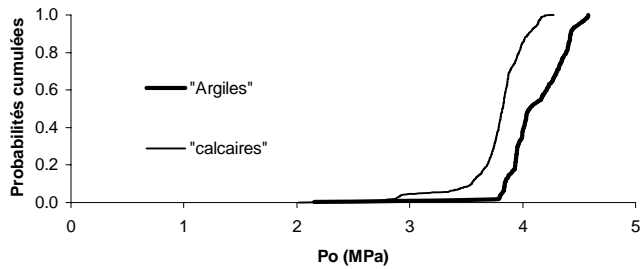
Fonction de répartition de VA - Forage SP6



Vitesse d'avance - Forage SP6



Fonction de répartition de Po



Pression sur outil - Forage SP6

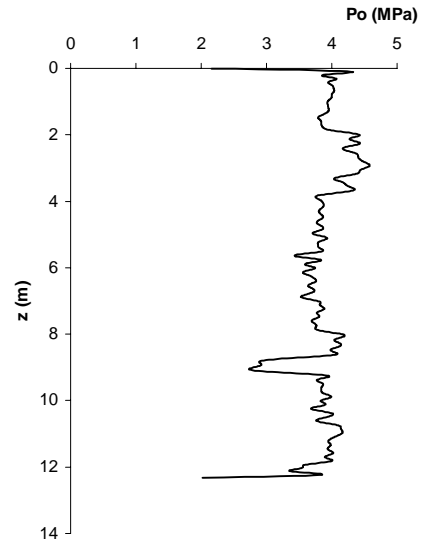


Figure 75 : Fonctions de répartition des paramètres de forage pour les formations A ($p_r^* < 1$ MPa) et C ($p_r^* > 1$ MPa) du forage SP6.

Si au regard de la vitesse d'avance la séparation entre les deux formations paraît évidente, il n'en est pas de même pour la pression sur outil où l'écart entre les deux formations est

relativement faible. Toutefois, l'établissement de la fonction de répartition de ce paramètre suivant deux formations montre qu'il apporte une information complémentaire à la vitesse d'avance, il est donc pris en compte dans le processus de découpage lithologique.

Pour le forage SP6, la proposition lithologique pose a priori une limite de couche à 3.70 m de profondeur et une zone d'incertitude de 2.00 m. Le processus itératif permet de proposer dès la seconde itération, un seuil de convergence inférieur au seuil de convergence de référence établi à $2 \cdot 10^{-2}$ dans la seconde partie du document. La lithologie probable est présentée Figure 76. La coupe proposée a priori (coupe "sondeur") présentant déjà une très bonne correspondance avec le signal de VA, le processus itératif n'apporte pas là de modifications majeures.

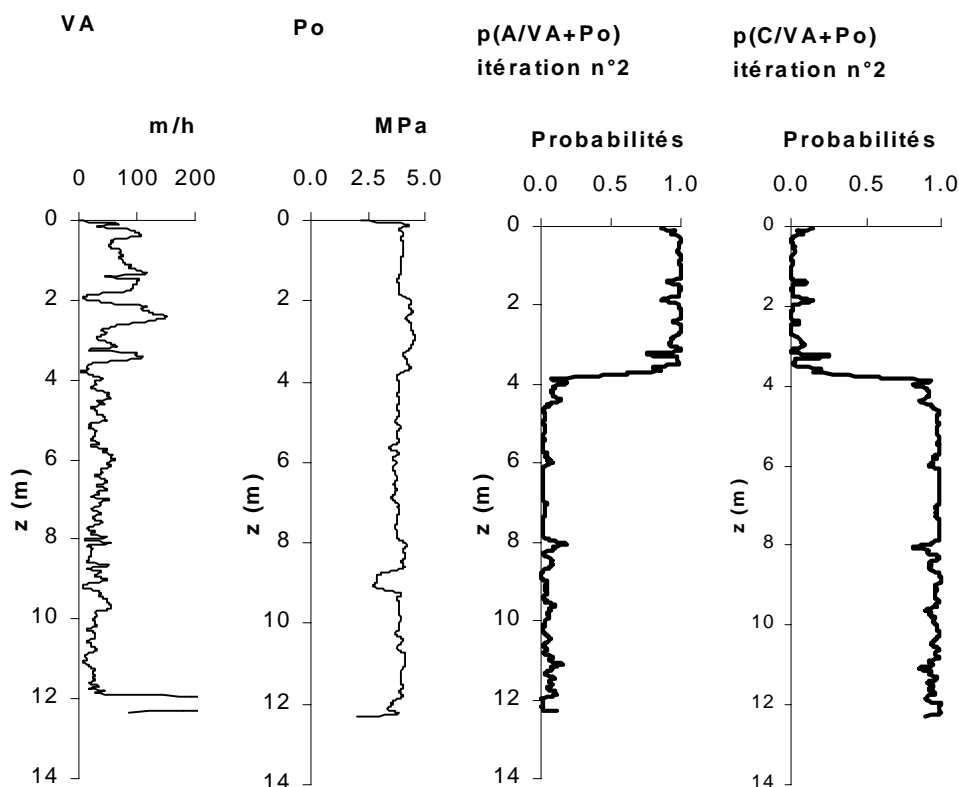


Figure 76 : Lithologie probable obtenue pour le forage SP6 (site expérimental) à partir des paramètres de forage VA et Po,

Les propositions lithologiques établies selon la même procédure pour l'ensemble des forages du site de l'IUT sont reportées en annexe 25. Compte tenu des paramètres d'entrée, qui fixent la limite entre les deux formations selon la coupe établie par le sondeur, qui est déjà en bon accord avec l'information diagraphique, le seuil de convergence choisi de $2 \cdot 10^{-2}$ est atteint dès les premières itérations.

A l'échelle du forage les probabilités d'appartenance aux formations A et C sont notées $p(A)_{xz}$ et $p(C)_{xz}$, où x est l'indice du forage et z indique la profondeur.

1.2. Proposition d'une lithologie à l'échelle du site

Dans le but d'obtenir une image globale du sous-sol, il est intéressant de rapporter l'ensemble des probabilités $p(A)_{xz}$ et $p(C)_{xz}$ établies pour chacun des forages pris en compte à l'échelle du site. Nous présenterons l'image obtenue en cours d'exécution de la phase 2.1 de reconnaissance, l'image du site prenant en compte un ensemble de sept forages.

A l'échelle du site la probabilité d'appartenance à la formation "argile" est notée $p(A)_z$, elle est prépondérante jusqu'à environ 7 m de profondeur, au delà $p(C)_z$, probabilité d'appartenance aux matériaux marno-calcaire, son complémentaire, est supérieure à 0.5. (Figure 77).

Cette proposition lithologique, obtenue à l'échelle du site via les signaux diagraphiques et l'algorithme procédant au découpage lithologique, est tout à fait cohérente avec un découpage lithologique effectué à partir des mesures pressiométriques, pour lequel nous avons considéré $p(A) = 1$, lorsque $p_r^* < \text{ou} = 1$ MPa, $p(A) = 0$, lorsque $p_r^* > 1$ MPa. $p(A)_z$ et $p(C)_z$ sont calculés comme suit :

$$p(A)_z = \frac{\text{cas possibles à la profondeur } z}{N}$$

$$\text{en pratique : } p(A)_z = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 p(A)_{xz} \quad \text{et} \quad p(C)_z = 1 - p(A)_z$$

$p(A)_{xz}$ est considéré selon les découpes réalisées à partir des diagraphies instantanées (annexe 25) ou selon les valeurs pressiométriques.

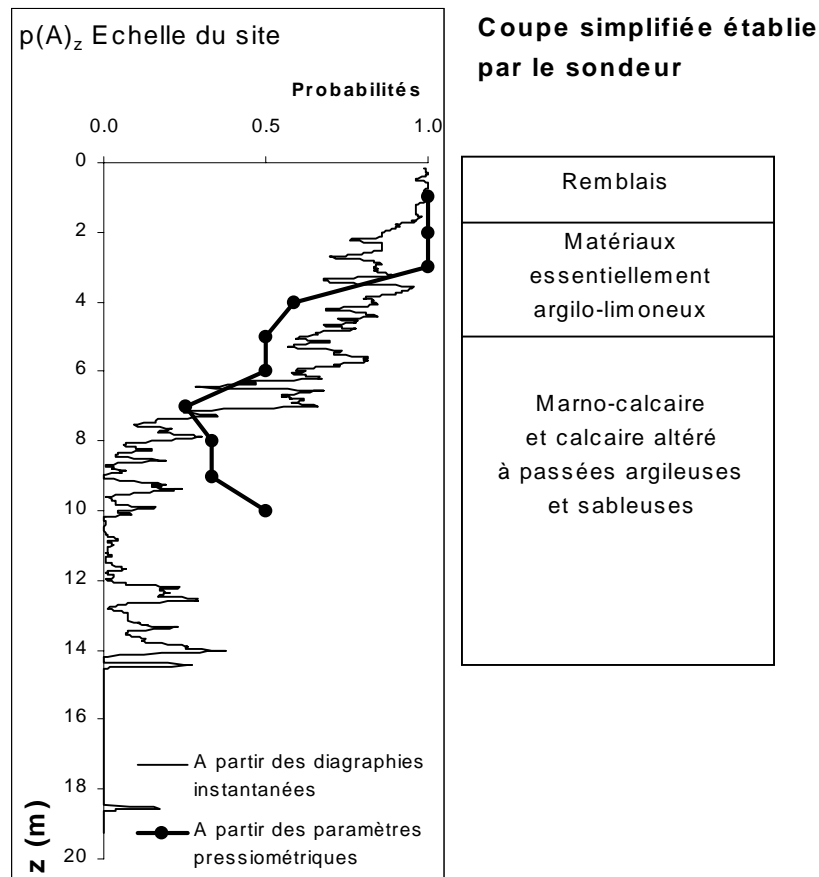


Figure 77 : Propositions lithologiques à l'échelle du site, en prenant en compte l'information diagraphique (à partir des DI) et considérant un découpage suivant pf^* (PP).

2. Estimation du risque attaché à une valeur géotechnique

2.1. La démarche

On souhaite déterminer le risque attaché à l'évaluation de la portance du sol, définie par l'ingénieur suivant les recommandations des documents de référence. Nous avons choisi sur cet exemple la contrainte ultime q_u , donnée par un bureau d'études géotechniques pour une semelle filante et un niveau d'assise donné.

En pratique cette valeur est calculée par l'ingénieur à partir d'un nombre limité de forages et est affectée d'un facteur de sécurité F prenant, respectivement, les valeurs 2 et 3 à l'état limite ultime, et aux états limites de service. Selon le nombre, l'implantation des forages et l'expérience du géotechnicien, la valeur de q_u peut être variable, les points de sondage ne constituant qu'un échantillonnage du site.

L'enjeu est de construire une image plus complète du site, statistiquement représentative des valeurs pressiométriques et diagraphiques mesurées et d'estimer les valeurs de q_u les

plus faibles, qui ne sont pas forcément prévues à partir des quelques mesures usuelles. Une fonction de répartition permet d'accéder au risque associé à chaque valeur de q_u . Ainsi, suivant les étapes de la méthodologie proposée dans la partie précédente et pour rester conforme aux règles de calcul du DTU 13.12, appliquer les règles de calcul à des profils pressiométriques nous procédons :

- A la génération d'un grand nombre de profils pressiométriques (50 profils simulés par forage diagraphique) à partir des équations de corrélation établies au sein des matériaux dits "argileux" et matériaux dits "calcaire". La part de chacune des relations est fixée par la probabilité d'appartenance à la formation "A (argile au sens large)" ou à la formation "C (calcaire au sens large)" et suit la relation établie précédemment (équation 1-9). L'ensemble des équations de régression utilisées pour chaque condition de forage est joint en annexe 26. Nous avons choisi de considérer $p(\text{form}_i)_{x,z}$ déterminé pour chaque forage à partir des informations diagraphiques.
- Au calcul de q_u mené suivant les recommandations du DTU pour chacun des profils simulés.
- A l'établissement de la fonction de répartition des q_u , calculée sur les profils virtuels
- A l'extrapolation de la queue de distribution de la fonction de répartition des q_u
- A la lecture :
 - du risque associé à la valeur déterminée par l'ingénieur à partir des quelques forages pressiométriques réalisés sur le site
 - de la valeur de contrainte à prendre en compte pour le projet pour un niveau de risque donné

Les hypothèses de calcul pour la contrainte ultime q_u concernent une fondation superficielle de type semelle filante établie à 2.9 m de profondeur (bâtiment avec sous-sol), de base $B = 0.70$ m.

Au regard des règles de calcul énoncées dans le DTU 13.12, pour le calcul de p_{ie}^* (pression limite équivalente), la valeur maximale de p_i^* (pour nous $1.7p_i^*$) est limitée à 1.5 fois la valeur de p_i^* minimale sur une hauteur de $1.5B$ sous la base de la fondation. Compte tenu de la géométrie de la fondation retenue dans cet exemple, nous considérons donc les essais simulés à 3 et 4 m de profondeur.

2.2. L'estimation de l'ingénieur

Pour chaque forage pressiométrique réalisé sur le site, le calcul "traditionnel" permet à l'ingénieur d'évaluer une valeur de q_u . La fonction de répartition de ces valeurs est reportée sur la Figure 78.

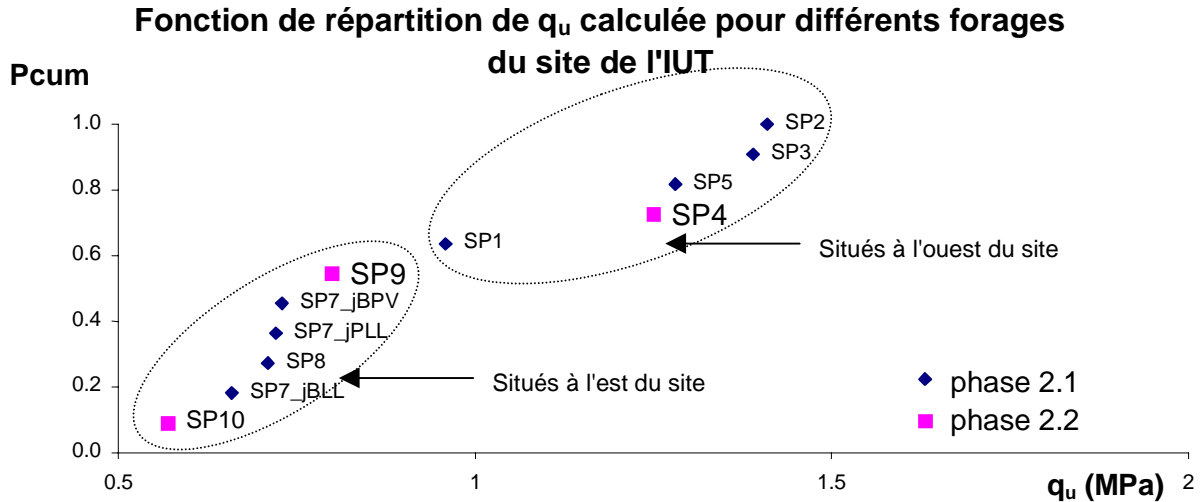


Figure 78 : Fonction de répartition de la contrainte ultime q_u pour le site de l'IUT pour une fondation superficielle de base $B = 0.70$, niveau d'assise = 2.90 m /terrain actuel, ancrage de 0.50 par rapport à la plate forme terrassée.

	Site (N =8)	Zone SP7 (N=3)
min_ q_u (MPa)	0.66	0.66
max_ q_u (MPa)	1.41	0.73
moyenne_ q_u (MPa)	0.98	0.70
écart type_ q_u (MPa)	0.31	0.03
CV_ q_u (MPa)	31%	4%

	Site	Zone SP7
q_u_k	0.48	0.65

Tableau 16: Contraintes ultimes obtenues pour l'ensemble du site et au niveau de la zone SP7 (phase 2.1 de la reconnaissance géotechnique).

Notons que le coefficient de variation important relevé au niveau de la zone "SP7" au regard des mesures pressiométriques est fortement réduit par le filtre de l'ouvrage retenu. En effet, le type de fondation retenu ne considère que les essais pressiométriques à 3 et 4 m de profondeur et le mode de calcul de la pression limite équivalente (p_{ie}^*) impose de limiter la valeur de pl_{max}^* à 1.5 fois la valeur de pl_{min}^* , ce qui naturellement réduit fortement la variabilité des résultats.

A partir de l'ensemble de forages réalisés sur le site, l'ingénieur pourra retenir comme valeur de référence :

- la valeur minimale des q_u obtenue, soit ici 0.66 MPa. On conçoit cependant que, selon le stade d'avancement de la campagne ou le nombre de sondages réalisé, cette valeur puisse être très variable,
- s'il est plus "ambitieux", une valeur caractéristique correspondant par exemple, pour un fractile à 5%, à la valeur moyenne des q_u moins 1.64 fois l'écart type. Cette valeur pourra se révéler, si l'écart type des valeurs mesurées est important, très pénalisante pour le projet. Ici $q_{u,k}$ vaut 0.48 MPa, et reste tout à fait compatible avec le projet et la nature des matériaux d'assise.

2.3. L'estimation proposée via la méthodologie mise en œuvre

Pour chaque profil simulé, nous calculons, suivant la relation précitée (Partie I - Chapitre I - § 3.42), la contrainte ultime correspondante. La considération de l'ensemble des profils permet alors d'établir la fonction de répartition de la contrainte ultime q_u pour la fondation spécifiée à l'échelle du site. (Figure 79). Pour les simulations, nous avons retenu l'ensemble des forages de la phase de reconnaissance 2.1, hormis les sondages SP5 et SP8. En effet pour ces deux sondages, le découpage lithologique suivant deux formations n'est pas satisfaisant et l'utilisation de relations supplémentaires au sein des graves et au sein des matériaux du Stampien particulièrement altéré est nécessaire, mais non disponible compte tenu du nombre limité des mesures et de médiocre qualité des essais au niveau de ces formations.

Ainsi, l'établissement de la fonction de répartition des q_u est réalisé à partir de 50 x 7 forages, soit 350 profils pressiométriques simulés.

La valeur minimale obtenue sur l'ensemble des simulations a été de 0.14 MPa. Nous proposons, dans le cadre d'une première approche, de modéliser la queue de distribution par extrapolation suivant un modèle exponentiel établi sur le fractile à 10%, soit les 35 valeurs de q_u les plus faibles.

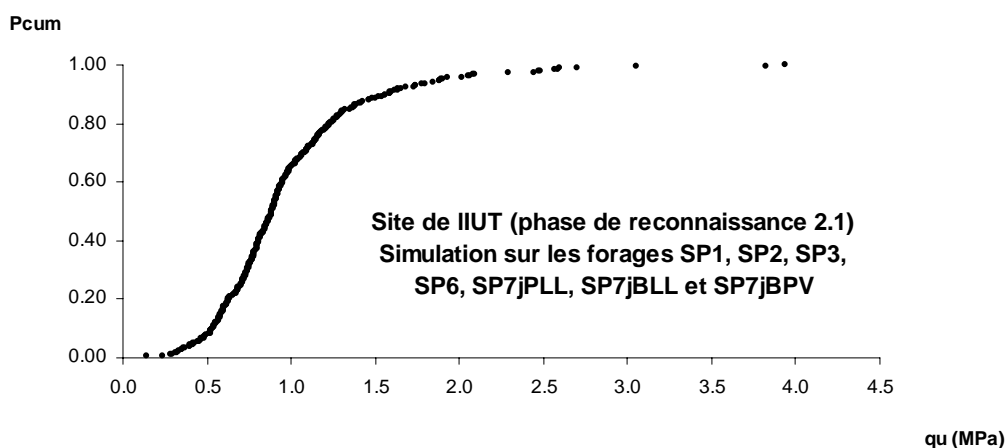


Figure 79 : Fonction de répartition des q_u pour le site de l'IIUT et la fondation étudiée (7 x 50 = 350 simulations).

Pour ce site et la fondation étudiée, le modèle retenu est de la forme :

$$p(q_u \text{ réelle} < q_u \text{ ing}) = a.e^b.q_u$$

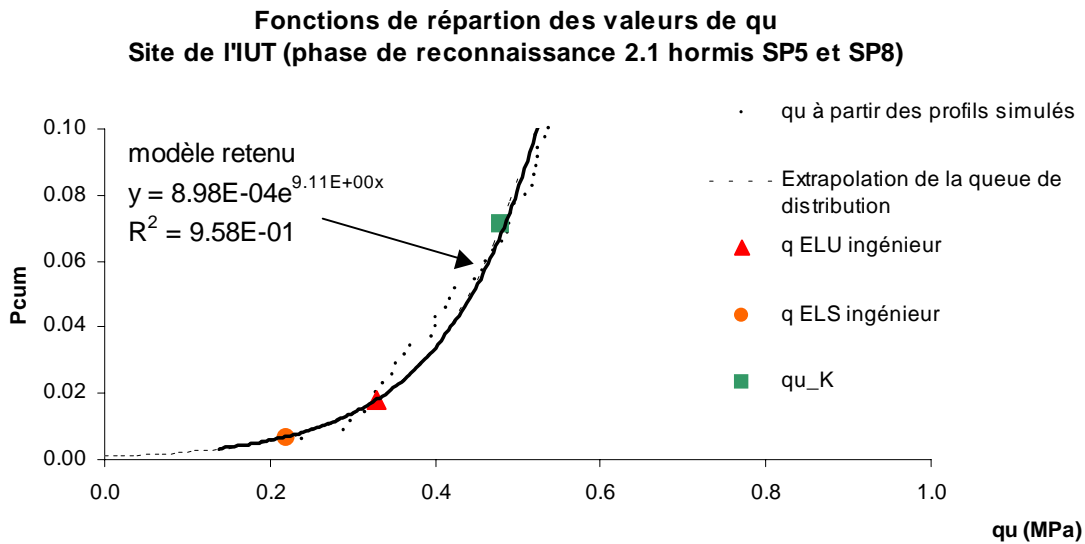


Figure 80 : Modèle établi pour la queue de distribution de q_u , à l'issue de la phase de reconnaissance 2.1, hormis les forages SP5 et SP8.

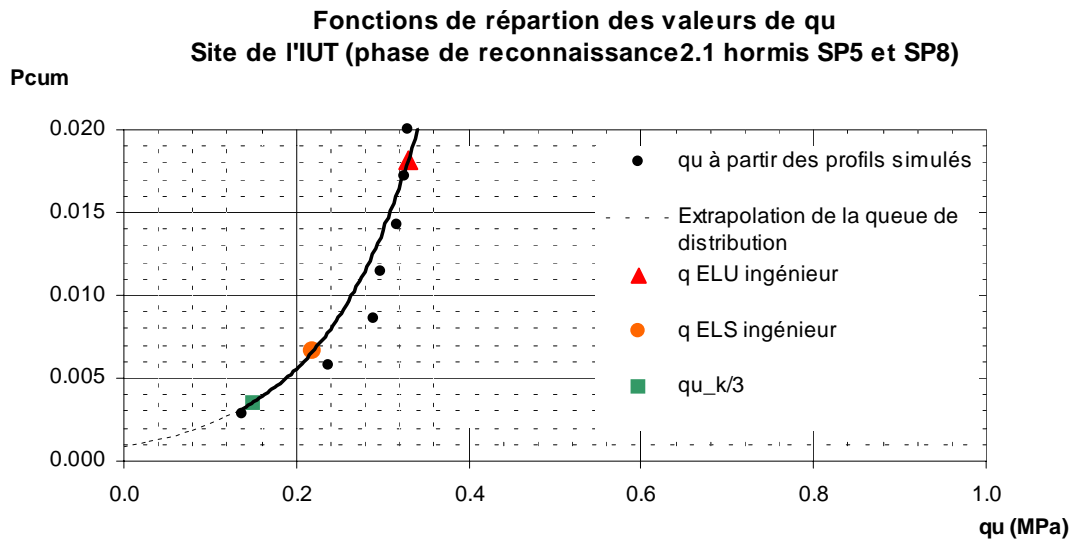


Figure 81 : Détermination du risque associée à chaque valeur de portance du sol définie par l'ingénieur.

2.4. Evaluation des risques

La contrainte ultime définie par l'ingénieur à partir des profils mesurés est égale à 0.66 MPa. Elle correspond à la valeur minimale obtenue pour l'ensemble de la campagne. L'application des coefficients partiels de sécurité usuels $F = 2$ aux états limites ultimes (ELU) et $F = 3$ aux états limites de service (ELS) [Philipponat & al 97] engendre les valeurs de $q_{ELU} = 0.33$ MPa et $q_{ELS} = 0.22$ MPa.

Le report de la valeur de q_{ELS} sur la fonction de répartition permet d'associer à la valeur donnée par l'ingénieur (0.22 MPa), un **niveau de risque de $5.5 \cdot 10^{-3}$** . Cette valeur ingénieur permet de travailler en interpolation au niveau du modèle établi sur le fractile à 10%.

En revanche, si l'on considère la valeur caractéristique de $q_{u,k}$, affectée d'un coefficient de sécurité $F = 3$, nous obtenons, $q_{ELS} = 0.15$ MPa, valeur située en limite du domaine d'interpolation, le risque que la valeur réelle soit inférieure à $q_{ELS} = 0.15$ MPa donnée par l'ingénieur est de $3.5 \cdot 10^{-3}$.

Ainsi la démarche proposée permet dans ce cas de figure de déterminer des niveaux de probabilités de l'ordre de 10^{-3} avec moins de 10 forages.

Les forages menés en phase 2.2 seront exploités ultérieurement dans la quatrième partie de ce document et permettront du juger du caractère prédictif de la méthodologie.

Bien entendu, selon les cas, la valeur aux états limites de service proposée par l'ingénieur peut être inférieure à la valeur minimale issue des profils simulés, la détermination du risque associé à cette valeur se situe alors dans le domaine de l'extrapolation, le résultat est donc à considérer avec prudence et particulièrement ici où la modélisation de la queue de distribution n'est pas suffisante dans le sens où la courbe ne passe pas par zéro, ce qui physiquement n'a pas de sens.

Afin d'apprécier la stabilité du niveau de risque déterminé par la méthodologie en fonction du nombre de forages pris en compte dans l'établissement de la fonction de répartition, nous avons supprimé de la base de données les forages SP1 et SP7jBLL, soit les 2 sondages de la phase de 2.1 fournissant les valeurs de q_u les plus faibles. Le forage SP7jBLL à l'est du site, le sondage SP1 à l'ouest.

Les valeurs de probabilités obtenues telles que la valeur définie par l'ingénieur soit supérieure à la portance réelle du sol sont reprises dans le Tableau 17. Selon le nombre de sondages pris en compte à l'issue de la phase de reconnaissance 2.1 ou en éliminant les forages SP1 et SP7jBLL, le niveau de risque pour les valeurs q_{ELS} ou $q_k/3$ sont de l'ordre de 10^{-3} , à l'issue de la phase 2.1, la non réalisation des forages SP1 et SP7jBLL, conduit à une très sensible diminution des probabilités, elles sont alors de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} (Figure 82).

Valeur ingénieur	$p(q_{\text{ingénieur}} > q_{\text{réelle}})$	
	Phase 2.1 hormis SP5 et SP8	Phase 2.1 hormis SP5 et SP8 et sans SP1 et SP7jBLL
q_{ELU}	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$6.4 \cdot 10^{-3}$
q_{ELS}	$5.5 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$
$q_{u_k/3}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$9.8 \cdot 10^{-4}$

Tableau 17: Probabilités obtenues pour que les valeurs proposées par l'ingénieur soient supérieures à la valeur de portance réelle du sol pour le site selon le nombre de sondages pris en compte.

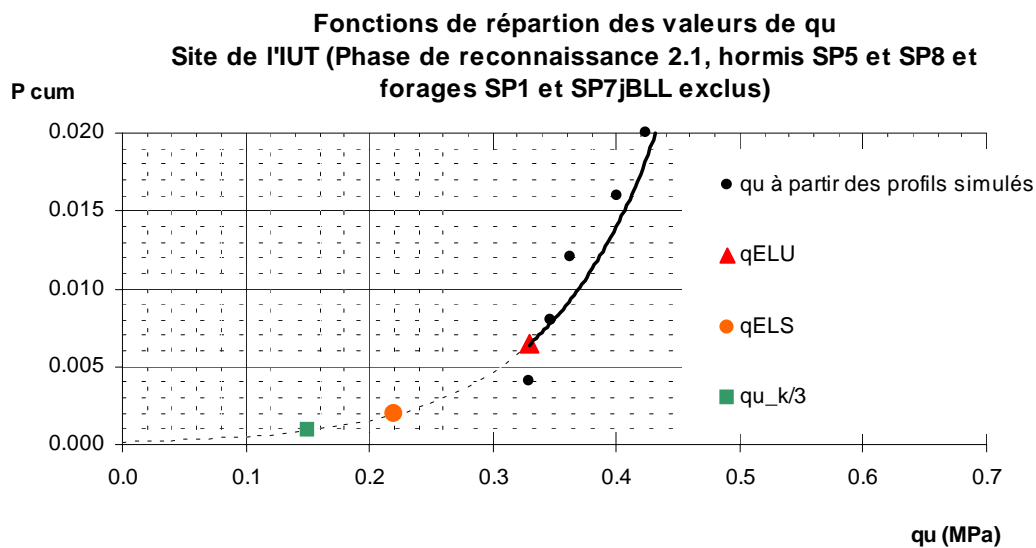


Figure 82 : Détermination de la valeur de risque pour les valeurs de contrainte proposées par l'ingénieur reconnaissance phase 2.1 moins les forages SP1 et SP7jBLL

La détermination du niveau de risque attaché à la valeur géotechnique définie par l'ingénieur (dans cet exemple, la portance du sol pour une fondation superficielle) est fonction du stade de la campagne de reconnaissance et dépend des forages considérés. L'augmentation du nombre de forages réduit l'incertitude d'estimation de la probabilité réelle.

Toutefois, les valeurs de probabilités obtenues restent du même ordre de grandeur et varient pour la contrainte aux états limites de service entre $2 \cdot 10^{-3}$ et $5 \cdot 10^{-3}$, même si des modèles théoriques plus affinés devraient être employés pour modéliser les queues de distribution.

Chapitre IV -

Portabilité de la méthodologie - Chantier de BOULOGNE

Il s'agit de vérifier dans quelle mesure la méthodologie, mise en œuvre à partir des données acquises sur le site expérimental de l'IUT de Bordeaux I, peut être transposée à un autre cas d'étude, extérieur à la région bordelaise. Pour un type de fondation fixé, nous déterminons la fonction de répartition de la valeur géotechnique relative au site et à la fondation étudiés.

Nous avons choisi de traiter les données acquises lors de la campagne de reconnaissance menée par la société Solétanche Bachy dans le cadre du projet d'extension du port de Boulogne (France). Les sondages se sont déroulés entre le 20 avril et le 2 juin 1998 et comprennent un ensemble de forages destructifs avec enregistrements de paramètres de forages au sein desquels des essais pressiométriques ont été exécutés suivant la norme NFP 94 110.

Une partie des forages a été implantée à terre, une autre partie sur ponton. Dans le but de vérifier la portabilité de la méthode nous ne retiendrons que les données acquises à terre. En effet, le rapport d'étude géotechnique précise que, pour les sondages effectués sur ponton, compte tenu des variations du plan d'eau non relevées lors des investigations, les niveaux des essais pressiométriques ont dû être réajustés par rapport aux enregistrements Enpasol. Ainsi, les recalages minimes pour certains sondages, peuvent atteindre 1.50 à 2.00 m pour d'autres points d'investigation. Cette opération est tout à fait justifiée dans le cadre du rapport géotechnique et montre un nouvel intérêt pratique des enregistrements de paramètres de forage, permettant de mettre en cohérence essais pressiométriques et caractéristiques lithologiques signalées par les profils diagraphiques. Cependant nous n'avons pas jugé souhaitable d'intégrer ces forages dans notre base de données.

Pour la campagne terrestre de sondages, nous disposons des données diagraphiques et log pressiométriques établis pour les sondages PR1, PR6, PR7 et PR9 à PR11. Le plan d'implantation des sondages, les log. pressiométriques et diagraphiques sont reportés annexe 27.

Les forages réalisés préalablement aux essais pressiométriques ont été conduits par rotation au tricône Ø 63 mm et à la boue. Les profondeurs d'investigation sont comprises entre 25 et 33 m. Les enregistrements de paramètres de forage, numérisés par le système Enpasol III, font état de la pression d'injection, du couple de rotation, de la pression sur outil, de la pression de retenue, de la vitesse d'avance et du temps de perforation correspondant à une avance de 5 mm.

Les différences d'altimétrie entre les sondages considérés ne dépassent pas 0.22 m.

La synthèse des log lithologiques établis pour les forages retenus rend compte d'une épaisseur variable de matériaux de remblais comprise entre 2.40 et 8.00 m, surmontant une couche de sable discontinue reconnue jusqu'à 8.00 m en PR11 et 10.30 m en PR1. Elle n'est pas relevée au droit du sondage PR10.

Cet ensemble couvre un substratum marneux présentant des lentilles ou passées gréseuses ou sableuses. Des bancs rocheux discontinus (notés A'-A-B et C sur les coupes lithologiques établies par l'ingénieur chargé de l'étude) sont remarquables dans le substratum, ils surmontent par endroits des bancs sableux peu compacts.

Ne connaissant pas les caractéristiques des vérins installés sur la machine de sondage, nous n'avons pas pu réaliser le calcul de la pression effectivement exercée sur l'outil. Toutefois, ce paramètre composé étant reporté graphiquement dans le rapport d'étude géotechnique, nous avons noté les valeurs lues sur le graphique. Comme l'exploitation des paramètres de forage pour le site expérimental, nous avons considéré une plage de valeurs de 0.40 m, soit 0.20 m de part et d'autre de la cote de chaque essai pressiométrique. Le tableau correspondant aux valeurs considérées est reporté en annexe 28.

1. Etablissement des corrélations

La première étape du travail consiste à déterminer les relations entre paramètres de forage et paramètres pressiométriques qui seront retenues pour l'estimation de l'intervalle de valeurs pressiométriques probables à un niveau de confiance donné.

Après traitement des données diagraphiques par le logiciel Scanner, permettant d'éliminer les artefacts liés aux changements de tiges et bruits de mesure, l'élimination des couples de valeurs pressiométriques pour lesquelles le rapport E/pl paraissait suspect (nous avons choisi de ne pas tenir compte des essais pour lesquels le rapport E/pl était inférieur à 5), nous avons retenu la relation établie entre la pression de fluage nette et la vitesse d'avance pour l'ensemble des matériaux.

En effet, la tentative de considérer séparément les matériaux sableux et les matériaux marneux à passées sableuses ou gréseuses s'est révélée inutile dans le sens où les corrélations obtenues au sein de ces deux groupes d'individus étaient très voisines l'une de l'autre et proches de la corrélation obtenue pour l'ensemble des points constitutifs des forages retenus pour l'étude. (Figure 83).

Les nuages de points établis en considérant pression de fluage en fonction de la vitesse spécifique ou du couple unitaire définis en annexe 25, ne permettent pas d'obtenir de meilleures corrélations et conduisent à des résultats tout à fait similaires.

Nous retiendrons donc la relation suivante :

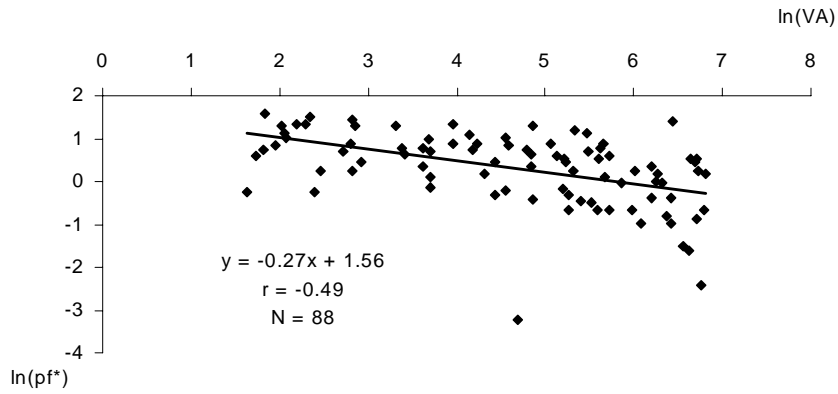
$$\ln(pf^*) = -0.35 \ln(VA) + 1.84 \quad r = -0.51 \quad N = 150$$

avec :

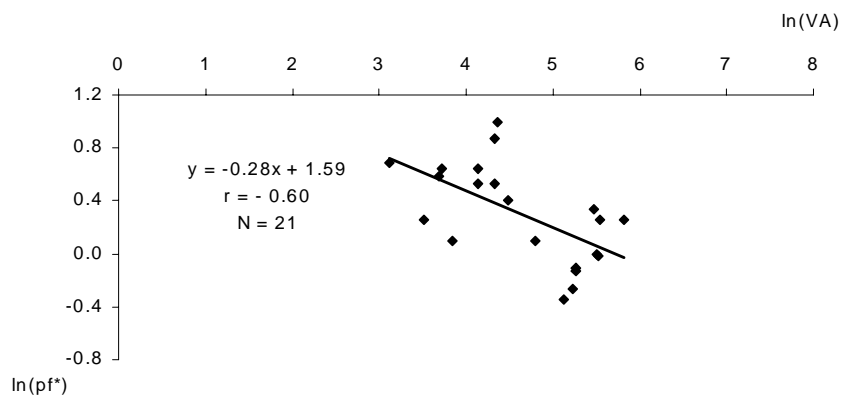
pf^* = pression de fluage nette, VA = vitesse d'avance, r = coefficient de corrélation et
 N = nombre d'individus.

Le test de Fisher permet d'admettre l'existence d'une relation entre $\ln(pf^*)$ et $\ln(VA)$ au niveau de confiance de 0.990.

Au sein des matériaux marneux



Au sein des matériaux sableux



Ensemble des points : matériaux, sableux, remblais sableux et matériaux marneux

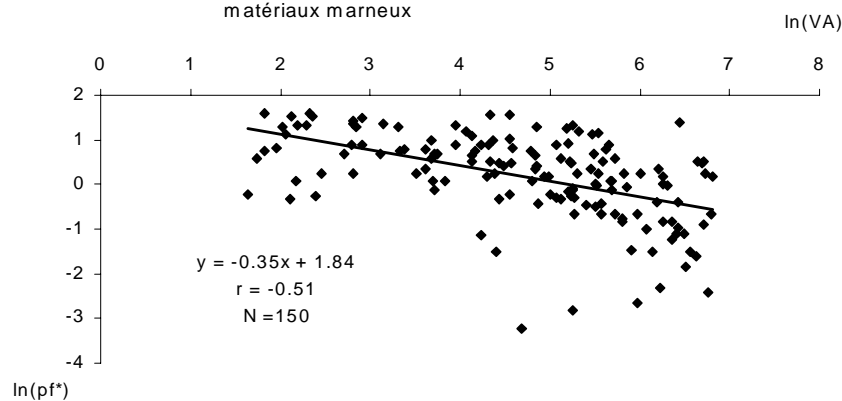


Figure 83 : Corrélations établies au sein des sables ; au sein des matériaux marneux à passées ou lentilles sableuses ou gréseuses.

2. Estimation des intervalles de valeurs pressiométriques probables

La seconde étape du processus consiste à estimer les intervalles de valeurs pressiométriques probables pour chaque forage considéré et constitue l'étape initiale quant à la définition du risque attaché à une valeur géotechnique donnée. Elle permet de définir une valeur de portance du sol pour un niveau de confiance choisi.

La relation retenue étant indépendante de la nature des matériaux, l'estimation de l'intervalle de valeurs probables pour le paramètre p_f^* pour chaque forage suit les équations 9 et 10 données en 2^{ième} partie du document avec $p(\text{form}_i) = 1$.

Nous obtenons pour chaque forage considéré, les intervalles des valeurs portés sur la Figure 84.

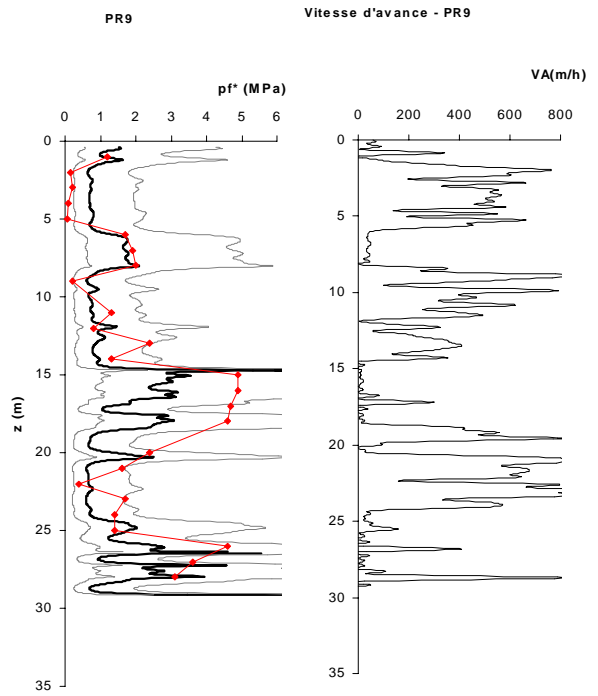
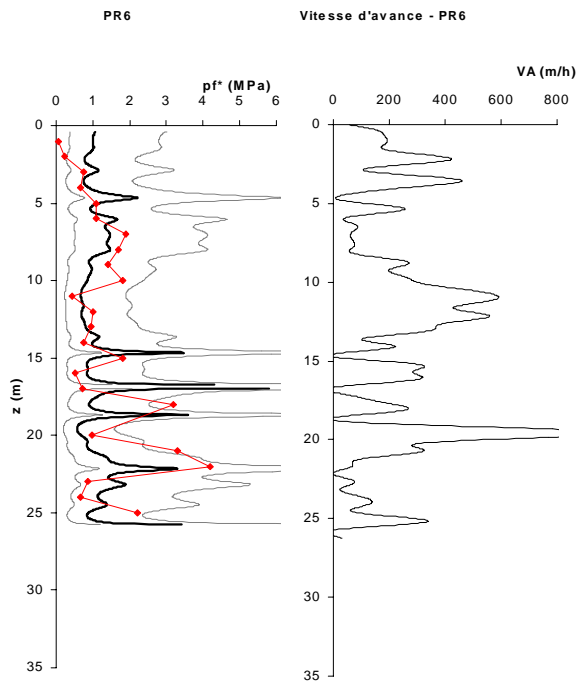
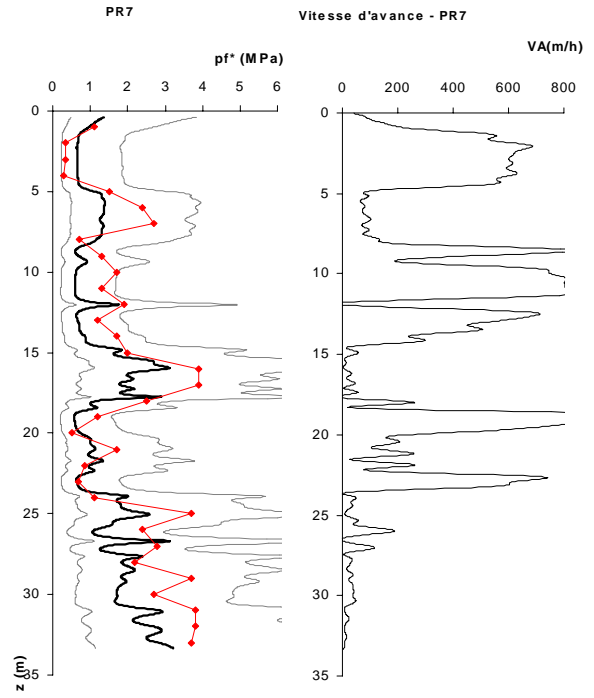
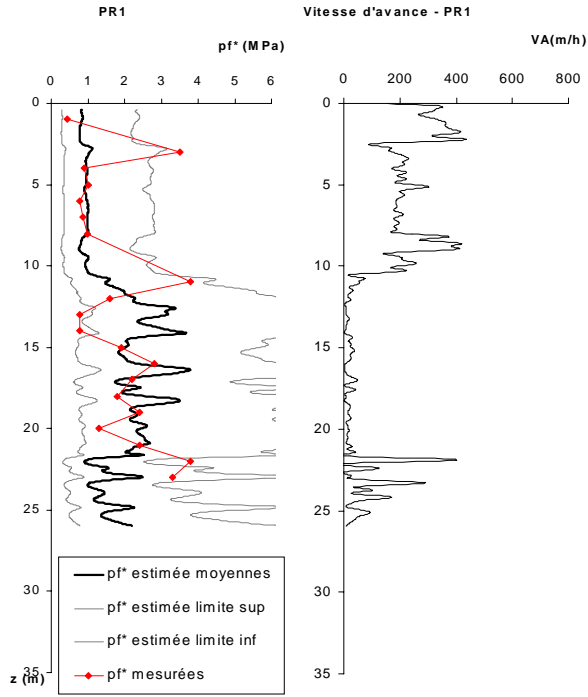
Nous noterons que les profils pressiométriques mesurés étaient déjà en bon accord avec les profils de vitesse d'avance, les valeurs de VA importantes correspondant à des faibles valeurs de p_f^* . L'utilisation des corrélations reliant p_f^* et VA accentue cette tendance et permet :

- d'obtenir des plages de valeurs probables pour des niveaux de faible épaisseur où, compte tenu de la taille de la sonde pressiométrique, les essais ne sont pas réalisables
- de s'affranchir des essais pressiométriques non représentatifs des caractéristiques des matériaux (sondage PR1 au delà de 22 m de profondeur).

Pour l'ensemble des sondages, les profils mesurés sont tout à fait cohérents avec les intervalles de valeurs probables estimés au risque de 20%. Les valeurs mesurées n'appartenant pas à l'intervalle prédictif sont ponctuelles.

Par exemple au sein du forage PR1 à 3 m de profondeur, la valeur mesurée p_f^* de l'ordre de 3.5 MPa au sein des sables paraît excessive compte tenu de la lithologie relevée. Nous avons pensé à un passage induré des matériaux sableux, cependant, l'enregistrement de la vitesse d'avance ne révèle aucune signature particulière témoignant d'un niveau plus résistant. De même, à 13 et 14 m, les faibles pressions de fluage mesurées ne sont pas prévisibles au vu du signal de la vitesse d'avance.

Enfin, l'intervalle des valeurs probables couvre une plage relativement importante, mais ceci est à mettre en relation avec l'écart type des logarithmes népériens des p_f^* mesurées et le faible coefficient de corrélation de l'ordre de - 0.5.



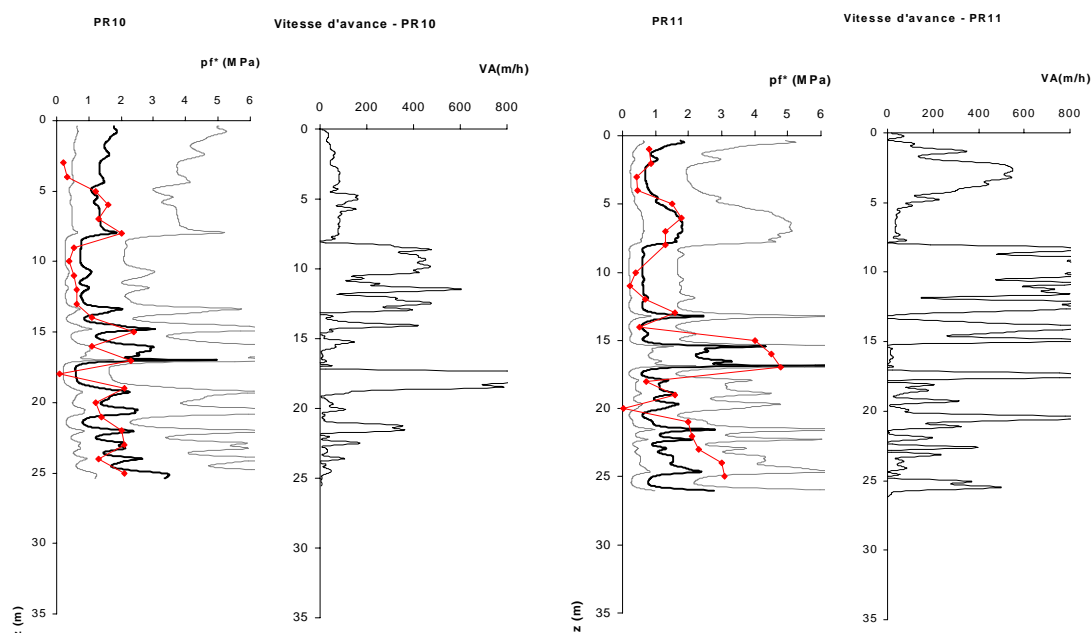


Figure 84: Intervalle de valeurs probables de la pression de fluage pour un niveau de confiance de 80 % et profils pressiométriques mesurés.

3. Estimation du risque attaché à chaque valeur nominale pour une fondation profonde donnée

Nous avons choisi de calculer le risque attaché à la valeur de la charge nominale calculée pour un micropieu de 15 m de longueur et de 200 mm de diamètre. Nous avons considéré pour les valeurs de frottement latéral unitaire limite (q_s), les valeurs préconisées dans le DTU 13.2 avec :

- sur la hauteur des remblais : $q_s = 0$ kPa
- dans les sables :
 - $q_s = 120$ kPa lorsque $1 \text{ MPa} < 1.7 p_f^* \leq 2.5 \text{ MPa}$ (Courbe B)
 - q_s suit l'équation de la première partie de la courbe B⁸, lorsque $1.7 p_f^* \leq 1 \text{ MPa}$
 - $q_s = 150$ kPa lorsque $1.7 p_f^* > 2.5 \text{ MPa}$ (Courbe C)
- dans les matériaux marneux et grès :
 - $q_s =$ suit l'équation de la courbe E établie dans le DTU, lorsque $1.7 p_f^* > 1.5 \text{ MPa}$.

La simulation de profils pressiométriques suivant la procédure énoncée au chapitre II, peut conduire, dans les matériaux marneux, à des valeurs de p_f^* supérieures aux

⁸ Soit $q_s = -24.49 p_l^{*3} - 16.83 p_l^{*2} + 141.19 p_l^*$, avec dans notre cas $p_l^* = 1.7 p_f^*$

valeurs reportées dans les abaques du DTU. Nous avons donc limité q_s à 400 kPa, lorsque $1.7p_i^*$ prenait des valeurs supérieures à 7 MPa.

- $q_s = 80$ kPa (courbe A), lorsque $1 \text{ MPa} < 1.7 p_i^* \leq 1.5 \text{ MPa}$
- $q_s =$ suit l'équation de la première partie de la courbe A⁹, lorsque $1.7 p_i^* > 1 \text{ MPa}$

Les expressions choisies, dont la forme est rappelée à la Figure 85, correspondent à des calages polynomiaux des courbes réglementaires.

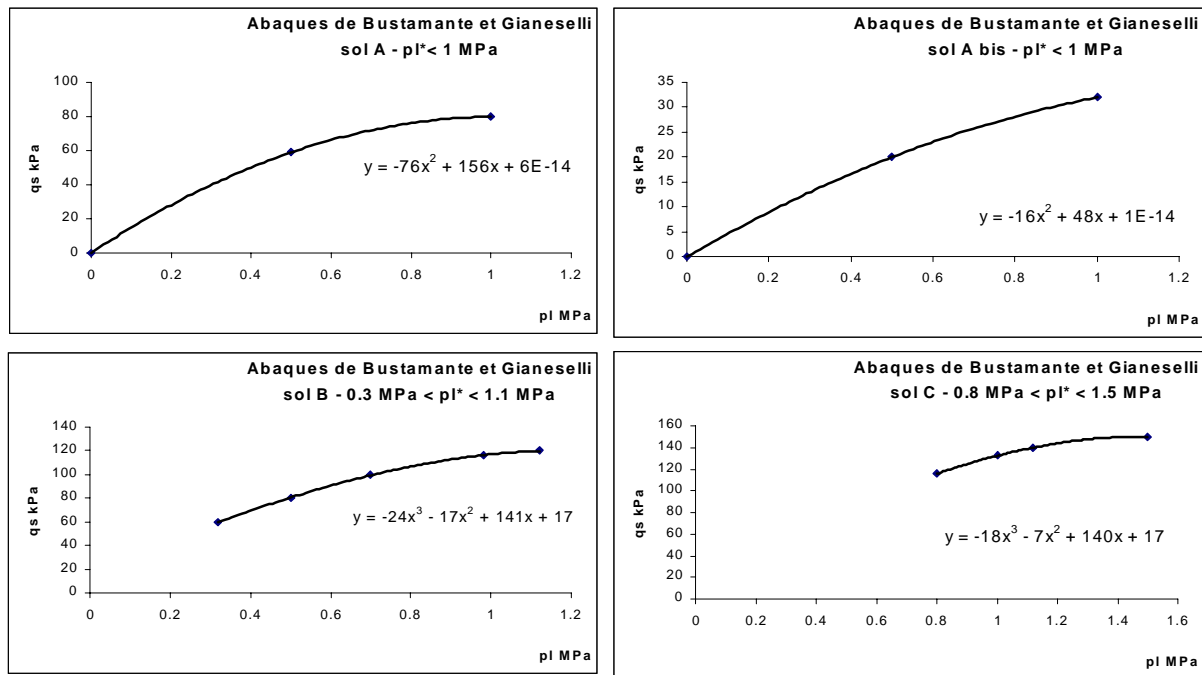


Figure 85 : Courbes proposées dans le DTU 13.12 pour la détermination des valeurs de frottement latéral unitaire limite compte tenu de la nature des matériaux et des valeurs de p_i^* (dans notre cas $1.7p_i^*$)

Nous savons qu'en pratique le géotechnicien ne numérise pas les courbes de frottement latéral unitaire limite (q_s) proposée dans le DTU 13.2. Toutefois, la procédure de calcul automatique des q_s , qui pourrait paraître ici comme un raffinement superflu, n'est là que pour enlever toute part de subjectivité du géotechnicien dans l'attribution des valeurs de q_s .

La construction de la fonction de répartition des valeurs de charge nominale prises pour un ensemble de 300 profils simulés (50 simulations par forage réalisé) est comparée à la fonction de répartition des Q_n relatives au site étudié (Figure 86).

⁹ $q_s = -76 p_i^{*2} + 156 p_i^*$, avec dans notre cas $p_i^* = 1.7 p_i^*$

Fonction de répartition des valeurs de Qn pour le site de Boulogne - micropieux L = 15 m et Ø 200 mm

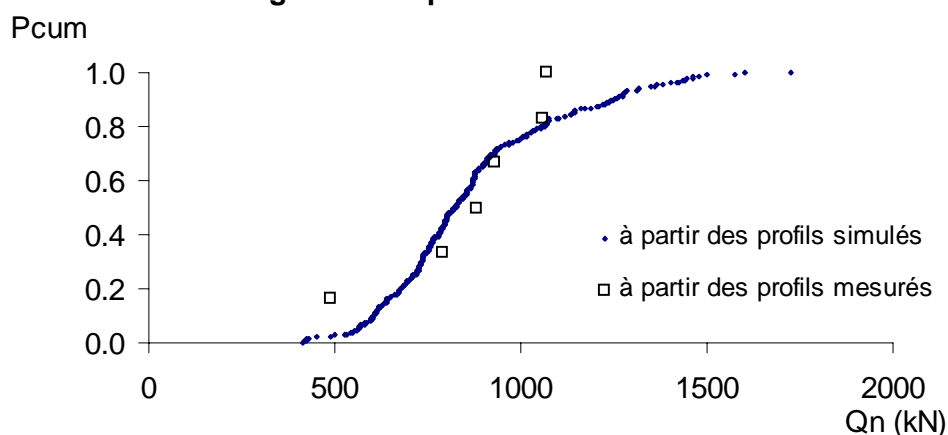


Figure 86 : Fonction de répartition des valeurs de charge nominale prises pour un micropieu de longueur L = 15 m et de Ø 200 mm, site de Boulogne.

C'est sur le fractile à 10% que le modèle exponentiel est calé et extrapolé afin de déterminer le risque attaché aux valeurs de Qn inférieures à la plus petite valeur de Qn simulée.

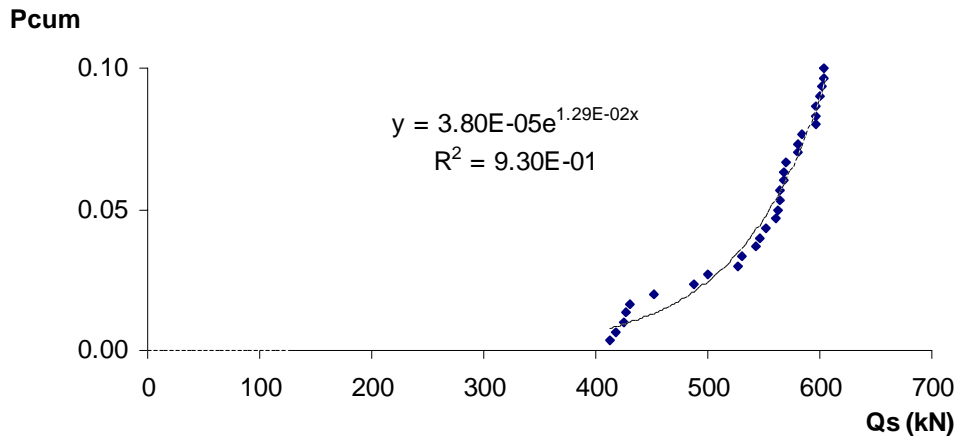
Qn est calculé pour chaque profil selon la procédure "usuelle" de l'ingénieur. Les valeurs obtenues sont reprises dans le Tableau 18 et portées sur la Figure 86.

	Qn (kN)	Qn ELU (kN)	Qn ELS (kN)
PR1	1069	802	535
PR6	882	662	441
PR7	1059	794	530
PR9	931	698	466
PR10	490	368	245
PR11	789	592	395
moyenne	870	653	435
écart type	196	147	98
min	490	368	245
Qn k	486	365	243

Tableau 18: Valeurs de Qn, Qn_{ELU} et Qn_{ELS} calculées à partir des profils pressiométriques mesurés.

Le report de valeurs choisies sur le modèle établi permet d'associer un risque inférieur à 10^{-3} à la valeur Qn_{ELS} obtenue à partir du profil mesuré le plus pessimiste (PR10 Qn_{ELS} = 245 kN) et de proposer une valeur de Qn égale à 380 kN pour un niveau de risque de $5 \cdot 10^{-3}$ (Figure 87).

**Modèle proposé pour le site et micropieux L = 15 m
et Ø 200 mm**



**Risque associé aux valeurs de Q_n pour le site de
Boulogne - micropieux L = 15 m et Ø 200 mm**

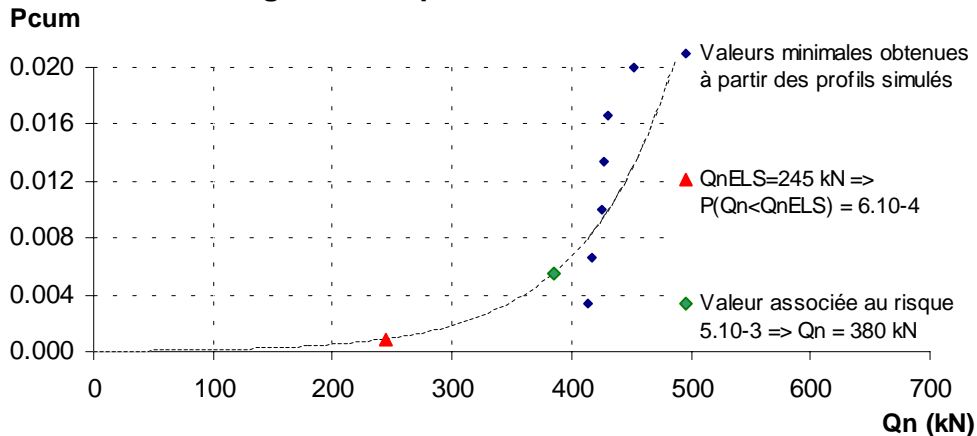


Figure 87 : Modèle proposé et risque associé à la valeur de $Q_{nELS} = 245 \text{ kN}$ et valeur de Q_n associée au risque 5.10^{-3} .

La procédure appliquée aux données acquises sur un chantier réel a permis d'estimer la probabilité que la valeur définie par l'ingénieur (ici Q_{nELS}) soit supérieure à la portance réelle du sol, en d'autres termes, le risque de défaillance dû à un défaut de portance du sol pour la fondation envisagée.

La méthodologie proposée au chapitre II a été simplifiée. L'établissement des corrélations ne prenant pas en compte de distinction lithologique des matériaux, le processus algorithmique permettant de proposer un log. lithologique probable en adéquation avec l'information diagraphique n'a pas été utile lors du traitement de cet exemple.

Le niveau de risque obtenu, comme pour le cas de la fondation superficielle traitée pour le site de l'IUT est de l'ordre de 10^{-3} . L'amélioration de la modélisation de la queue de distribution permettrait de voir si ce niveau de risque reste constant pour les deux types de

fondations et s'il est lié au nombre de forages considéré (pour cet exemple, comme pour le site expérimental, le nombre de forages pris en compte était inférieur à 10).

Partie IV

Analyse critique des résultats, perspectives

Qu'il s'agisse des résultats obtenus sur le site de l'IUT en région bordelaise ou de ceux acquis sur le site de Boulogne, nous avons pu établir un intervalle de valeurs pressiométriques probables pour un niveau de risque donné et estimer le risque attaché à une valeur de calcul définie par l'ingénieur pour une fondation donnée à l'échelle du site.

Les premiers résultats obtenus sont positifs dans le sens où ils démontrent la faisabilité de la méthodologie, qui tend à donner des outils à l'ingénieur pour apprécier la prise de risque relative à la détermination d'une valeur de portance du sol.

Cependant il nous semble utile d'apporter quelques éléments complémentaires concernant :

- l'impact de la lithologie sur les résultats,
- la qualité médiocre des corrélations,
- l'estimation de profils pressiométriques à partir de forages destructifs avec enregistrement de paramètres de forage,
- l'absence de prise en compte de la corrélation spatiale des données,
- l'apport réel des diagrapies instantanées dans l'estimation du risque associé à une valeur géotechnique.

Enfin, nous parlerons des moyens à mettre en œuvre pour accroître la fiabilité des estimations.

1. Impact de l'interprétation lithologique sur les résultats

Au-delà de la qualité d'acquisition des données, problème sur lequel nous reviendrons ultérieurement, la première difficulté à laquelle est confronté l'utilisateur de la méthode concerne le découpage lithologique. Ce découpage influence le résultat à deux stades de la méthodologie :

- lors de l'établissement des corrélations puis
- lors de la l'estimation des valeurs pressiométriques à partir des corrélations. En effet, l'influence des corrélations, dépendantes de la lithologie, est pondérée par les probabilités d'appartenance aux formations i , $p(\text{form}_i)$

L'outil est développé pour être utilisé à terme en cours de campagne. Nous avons donc choisi de nous baser sur la coupe établie par le sondeur et de ne considérer que les grandes classes d'individus. En effet, différentes natures de sol sont susceptibles d'être gérées par des relations différentes entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage.

C'est ce que nous avons constaté pour le site de l'IUT entre les matériaux argileux de couverture et le substratum dit "calcaire". De même, en partie II, les données issues du chantier de la Bourse de Moscou permettaient d'individualiser les matériaux sableux des matériaux argileux. En revanche, le site de Boulogne n'a pas permis de faire de distinction lithologique dans l'établissement des corrélations. Ceci peut s'expliquer par le fait que, pour ce site, les matériaux dits "marneux" étaient composés de passées sableuses et bancs gréseux pour lesquels la réponse vis à vis du processus de forage s'est révélée très voisine de celle des matériaux sableux.

Ces cas de figure montrent qu'il paraît difficile d'établir une règle générale. L'établissement des corrélations dont dépend toute la faisabilité de la méthode est à étudier au cas par cas, et peut être fonction des conditions de forage ou de la lithologie.

Selon l'état d'avancement de la campagne de reconnaissance, la lithologie peut être intégrée différemment dans l'estimation des paramètres pressiométriques. L'utilisateur peut estimer l'intervalle des valeurs pressiométriques en utilisant la lithologie à l'échelle du forage $p(\text{form}_i)_{xz}$, comme nous l'avons développé précédemment (3^{ème} partie) ou à l'échelle du site $p(\text{form}_i)_z$.

Rappelons également que, selon les experts et les critères de décision, plusieurs découpages sont envisageables, c'est le géotechnicien, fort de son expérience, qui devra privilégier la proposition lithologique la plus cohérente avec l'histoire géologique du site. Toutefois, sauf erreur d'interprétation des résultats des essais, il est rare que les découpages lithologiques soient réellement discordants, ils sont plutôt plus ou moins fins et découpent le sol en un nombre variable de catégories.

Lorsque les corrélations établies sont fonction de la lithologie, afin de conserver un nombre d'individus suffisamment important pour être représentatif, il est alors nécessaire, dans le cadre d'une reconnaissance usuelle, d'effectuer un découpage grossier de la base de données. L'utilisateur devra donc adapter l'échelle d'observation au nombre de mesures et de corrélations disponibles. Généralement, l'établissement de corrélations fiables doit être mené sur environ une vingtaine d'individus, mais nous avons vu que diviser la base de données suivant les conditions de forage, selon la lithologie et exclure les valeurs suspectes conduit à un nombre restreint d'individus (pour le cas le l'IUT, environ une dizaine seulement).

Pour le site de l'IUT, nous avons procédé au calcul de la fonction de répartition de la contrainte ultime q_u pour une fondation superficielle de deux manières, en considérant :

- la lithologie à l'échelle du forage $p(\text{form}_i)_{xz}$, puis
- la lithologie à l'échelle du site $p(\text{form}_i)_z$.

Dans chacun des deux cas, la valeur locale de p_f^* est simulée en exploitant la probabilité (p_{xz} ou p_z) d'appartenir aux différentes formations et corrélations correspondantes.

A partir de 10 % des valeurs de q_u les plus faibles, l'établissement de modèles des queues des fonctions de répartition, conduit à deux résultats différents. Selon la lithologie retenue, le risque associé à la valeur géotechnique varie du simple au double, sans que les ordres de grandeur ne soient bouleversés (Figure 88 et Figure 89).

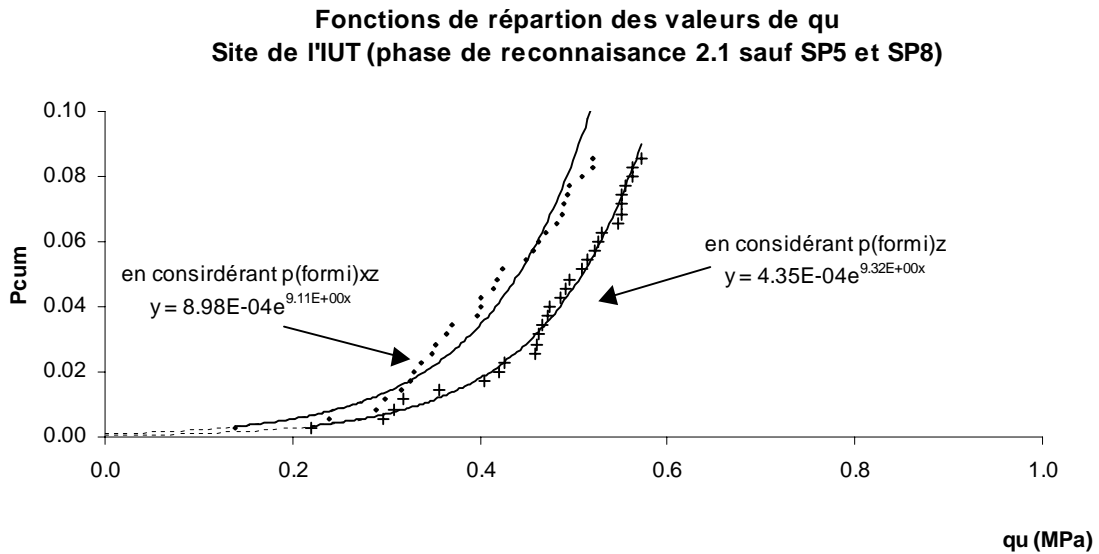


Figure 88 : Fonctions de répartition obtenues pour le site de l'IUT selon deux échelle d'observation, à l'échelle du forage et à l'échelle du site.

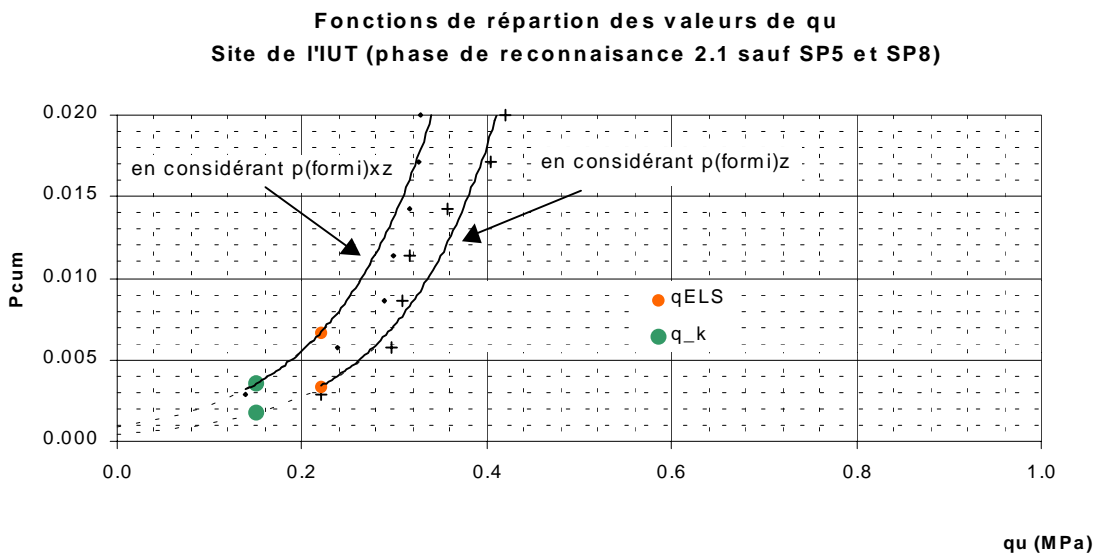


Figure 89 : Risque associé aux valeurs de q_{ELS} et q_k selon la considération de la lithologie à l'échelle du forage ou à l'échelle du site.

	p(q réel < q ingénieur)	
	si p(formi)xz	si p(formi)z
q_ELS	3.8 10 ⁻³	1.9 10 ⁻³
qk/3	6.7 10 ⁻³	3.3 10 ⁻³

Figure 90 : valeurs de $p(q_{réel} < q_{ingénieur})$ selon le choix de considérer la lithologie à l'échelle du forage ($p(formi)xz$) ou à l'échelle du site ($p(formi)z$).

Considérer une lithologie moyenne pour l'ensemble du site, ne permet pas de rendre compte des hétérogénéités locales à l'origine des plus faibles valeurs de q_u . La prise en compte d'une lithologie adaptée à la localisation des points de sondages permet, si elle est possible, de faire ressortir les particularités relevées au droit de chaque point de sondage en relation avec les signaux diagraphiques enregistrés. Si l'on excepte les rares cas de sites homogènes, l'approche lithologique locale paraît donc plus pertinente car elle permet, en respectant les hétérogénéités locales, de générer des faibles valeurs de q_u plus proches de la réalité et de mieux évaluer le risque.

2. Qualité médiocre des corrélations employées

Lors de la mise en œuvre de la méthode, la première difficulté intervient lors de l'établissement des corrélations significatives entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage. Celles-ci sont souvent médiocres pour plusieurs raisons.

Les paramètres du sol que l'on cherche à estimer par les essais pressiométriques sont différents de ceux qui conditionnent les diagraphies instantanées. Même si les deux méthodes d'information permettent d'évaluer, qualitativement pour les enregistrements de paramètres de forage et quantitativement pour les essais pressiométriques, les caractéristiques mécaniques des géomatériaux, ce n'est pas la même physique qui est mise en jeu.

De plus, les relations entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage sont très vraisemblablement masquées par les bruits de mesure. Les bruits sont importants sur les enregistrements de paramètres de forage et le filtrage des signaux ne permet d'en éliminer qu'une partie. Sur les essais pressiométriques, nous avons vu, au niveau de la zone SP7, une faible répétabilité des mesures et à l'échelle du site d'importants coefficients de variation intra-formation tant pour les paramètres de forages que pour les paramètres pressiométriques.

Faibles coefficients de corrélation et écart-types importants pour les paramètres pressiométriques conduisent à un fuseau de valeurs pressiométriques probable important, mais qui reflète en grande partie les écarts mesurés sur le terrain.

Enfin, nous regrettons que pour les deux cas tests, nous n'ayons pas pu utiliser des combinaisons de paramètres de forage, mis à part la vitesse effective ou le couple unitaire

pour le chantier de Boulogne. La vitesse de rotation, paramètre essentiel dans l'utilisation des combinaisons de paramètres n'a pu être mesurée de façon fiable et systématique sur le chantier de l'IUT et n'a pas été enregistrée sur le chantier de Boulogne. Il faut reconnaître que dans le cadre de reconnaissances usuelles, compte tenu de la fragilité de certains capteurs, ce paramètre est très rarement fourni, ce qui limite grandement l'utilisation de paramètres combinés plus complexes intégrant le mode de foration et révélant peut-être des corrélations plus riches que celles mises en évidence. L'espoir d'obtenir de telles corrélations reste toutefois limité, principalement, par l'absence de mesure de l'usure de l'outil de forage, paramètre qui peut être déterminant pour la valeur de la vitesse d'avancement.

3. Estimation de profils pressiométriques pour des forages où seules les diagraphies instantanées sont disponibles

Un nouvel aspect de l'utilisation combinée des essais pressiométriques et paramètres de forage a été abordé après réalisation des forages de la phase 2.2.

Dans un premier temps, nous avons cherché à estimer pour un sondage destructif exécuté en phase 2.2, les valeurs de p_f^* probables à partir des corrélations établies pour le site à l'issue de la phase de reconnaissance 2.1.

Dans l'optique d'appliquer les relations de correspondance établies lors de la phase 2.1 aux forages exécutés en phase de reconnaissance 2.2, pour laquelle les conditions de forages diffèrent de celles mises en œuvres lors de la phase 2.1, nous avons considéré l'ensemble des données issues de la phase 2.1. Une relation entre $\ln(p_f^*)$ et $\ln(VA/Po)$ a été obtenue indépendamment de la lithologie, aucune relation utilisable n'a pu être établie dans les matériaux de couverture ($p_f^* < 1$ MPa).

L'application de cette relation aux valeurs de $\ln(VA/Po)$ mesurées en SP4, montre qu'au-delà des matériaux de remblais reconnus jusqu'à environ 2 m de profondeur, l'estimation de l'intervalle de valeurs de p_f^* au risque de 20% est cohérente avec le profil pressiométrique mesuré en SP4. Cependant, compte tenu de la variabilité des paramètres pressiométriques mesurés, il est regrettable que l'intervalle des valeurs probables occupe une plage de valeurs importante et ne soit donc pas véritablement prédictif.

L'écueil de la stratégie provient du fait que les forages menés en phase 2.2, ont été exécutés avec de nouvelles conditions de forage (sTOC) et nous avons vu que les gammes de valeurs de VA obtenues avec la combinaison (socomafor / tricône / équipe de sondage OC) ne permettent pas a priori de distinguer les matériaux argileux de couverture ($p_f^* < 1$ MPa) des matériaux du substratum calcaire ($p_f^* > 1$ MPa) (3^{ième} partie - chapitre II).

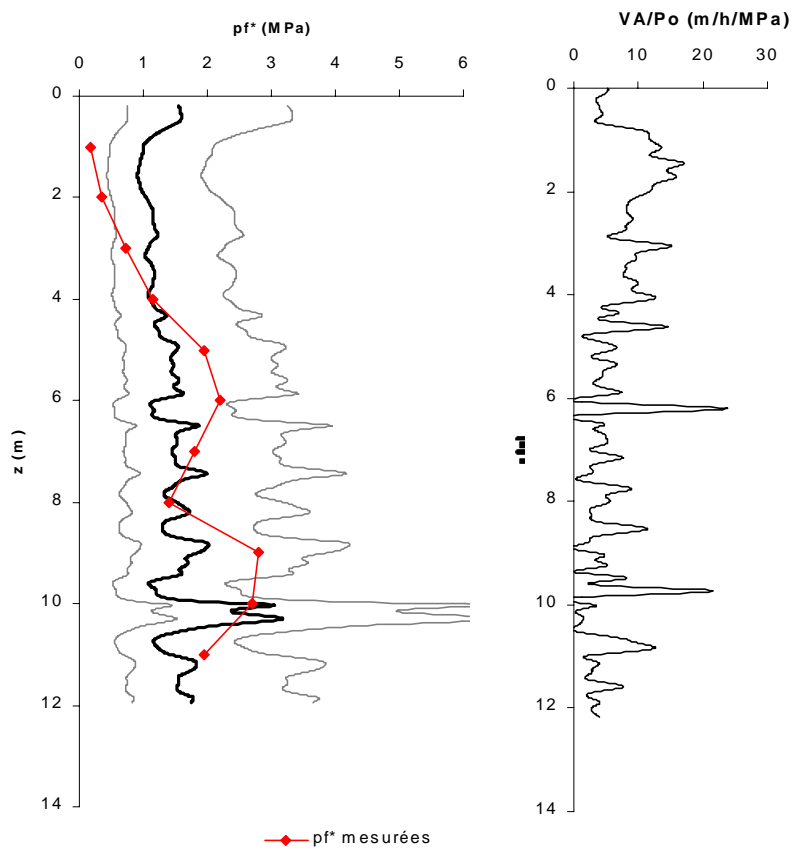
Dans un second temps, nous avons considéré la relation entre $\ln(p_f^*)$ et $\ln(VA)$ établie pour les conditions de forage sTOC et selon la lithologie établie par le foreur. Le forage SP4 n'est alors pas inclus dans la base de données.

Le résultat obtenu est plus positif qu'à l'issue de la première estimation effectuée à partir des corrélations obtenues à l'issue de la phase 2.1 ne tenant compte ni des conditions de forage, ni de la lithologie.

L'intervalle estimé des valeurs de p_f^* est, globalement, en bon accord avec le profil mesuré et le fuseau prédictif plus étroit. Seules les valeurs mesurées à 3 et 4 m de profondeur s'écartent sensiblement des estimations (Figure 91).

Estimation des p_f^* - IUT SP4
Corrélation ensemble du site
(phase 2.1) / pas de distinction
lithologique

VA/Po - Sondage SP4



Estimation des pf^* à partir de VA - IUT
 SP4
 Corrélation Socomafor moins SP4 /
 marne et argile jusqu'à 4.50 m et
 morno-calcaire au-delà

VA - Sondage SP4

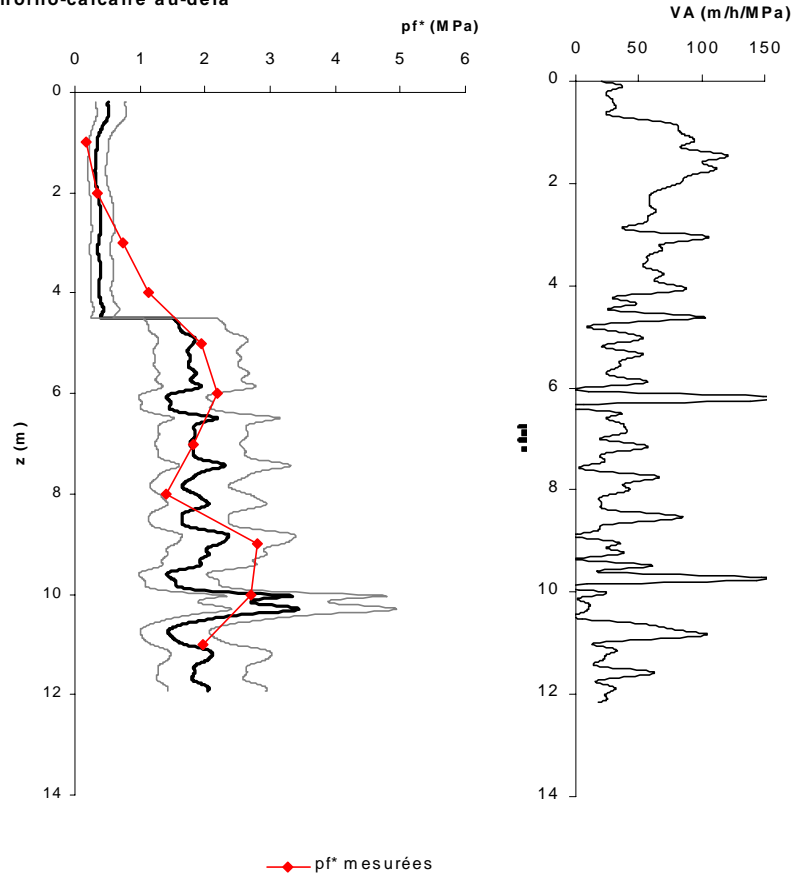


Figure 91 : Estimation de l'intervalle de valeurs de pf^* au droit de SP4 au risque de 20%

4. Prise en compte de la répartition spatiale des données

La méthodologie mise en œuvre propose, à partir de l'information diagraphique, de construire une image globale des caractéristiques pressiométriques du site. A l'échelle du forage l'utilisateur peut également estimer, un intervalle de valeurs pressiométriques probable pour un niveau de risque donné. Le profil pressiométrique mesuré peut alors être comparé à cet intervalle de valeurs afin d'apprécier l'adéquation des mesures pressiométriques acquises in situ et les informations portées par les signaux diagraphiques.

La méthode développée ne tient pas compte de la répartition spatiale des données pressiométriques, autrement dit, le processus n'intègre pas les distances de corrélations entre les valeurs pressiométriques mesurées au sein et entre les points de forage.

En effet, il est naturel de penser que des i points proches présentent des valeurs voisines. Plus la distance augmente entre les points de mesure plus la ressemblance diminue. Le variogramme est un outil qui permet d'estimer la distance au-delà de laquelle deux points de mesure sont indépendants l'un de l'autre (1^{ère} partie - Chapitre I).

Afin d'apprécier si la fiabilité des résultats obtenus peut être accrue par la prise en compte des structures de corrélations entre les points de mesure, nous avons conduit une étude variographique sur les paramètres pressiométriques et paramètres diagraphiques.

Dans un premier temps, nous avons cherché à identifier une éventuelle structure de corrélation pour les différents paramètres mesurés à l'issue de la phase de reconnaissance 2.2.

Dans un second temps, à partir de la modélisation du variogramme expérimental des p_i^* acquises à l'issue de la phase de reconnaissance 2.1, nous avons voulu tester la possibilité d'estimer les valeurs pressiométriques des forages de la phase 2.2 en ne conservant au droit de ces forages qu'une valeur pressiométrique sur deux. Ceci revient à se placer dans la configuration suivante : une structure de corrélation a été identifiée pour le site à partir d'un certain nombre de forages (phase 2.1), on réalise quelques forages supplémentaires (phase 2.2) en ne prenant en compte qu'un essai pressiométrique sur deux et l'on estime, par krigeage, à partir du modèle de structure des données établi pour le site, les essais manquants. Les essais pressiométriques estimés par krigeage sont ensuite comparés aux mesures et aux intervalles des valeurs probables estimés à partir des signaux diagraphiques.

4.1. Identification d'une structure de corrélation

Les variogrammes ont été calculés suivant les directions D1 (axe x), D2 (axe y) et D3 (axe z) de l'espace. Les directions D1 et D2 constituent le plan horizontal du terrain, D1 est orientée nord-sud, D2 ouest-est. La direction D3 perpendiculaire au plan horizontal suit la profondeur. Les variogrammes ont été calculés à l'aide du logiciel ISATIS¹⁰ sur les données diagraphiques et pressiométriques constitutives de la matrice de données obtenue à l'issue de la reconnaissance menée sur le site expérimental (fin de la phase 2.2).

A l'échelle du site, le pas (h) choisi est de 1 m, puisque c'est l'ordre de grandeur de la distance entre deux forages de la zone SP7, la tolérance sur le pas est de 0.5 (proportion de la valeur du pas), ce qui signifie que les points séparés d'une distance comprise entre 0.5 et 1.5 m pourront former un couple de points pour un pas de 1 m. Le nombre de pas est limité à 70, ce qui porte l'abscisse des variogrammes expérimentaux à 70 m, soit environ la moitié de la distance séparant les deux forages extrêmes (SP1 et SP10).

Pour le calcul des variogrammes suivant la profondeur (direction D3), les paramètres de calcul considèrent un pas (h) de 1 m avec une tolérance sur le pas de 0.5. En effet, les essais pressiométriques sont réalisés environ tous les mètres, avec de possibles décalages de 0.5m. Le nombre de pas est limité à 8, ce qui porte l'abscisse du variogramme à 8 m, soit un peu plus de la moitié de la profondeur d'un forage.

Il apparaît que compte tenu de la dispersion des points de mesures dans le plan xoy, aucune structure de corrélation ne peut être identifiée. Cela signifie qu'à l'échelle du site, où les forages sont distants d'une vingtaine de mètres ou même au niveau de la zone SP7 où les distances dans le plan horizontal n'excèdent pas 3 m, les données ne présentent pas d'agencement remarquable suivant les directions D1 et D2 (Figure 92).

Ainsi, pour le site expérimental et, compte tenu de l'implantation des sondages, l'estimation de valeurs pressiométriques entre les points de forage par krigeage ou simulation conditionnelle ne peut être envisagée au sens où l'incertitude sur les valeurs estimées serait trop importante pour être prédictive.

¹⁰ Logiciel de géostatistique

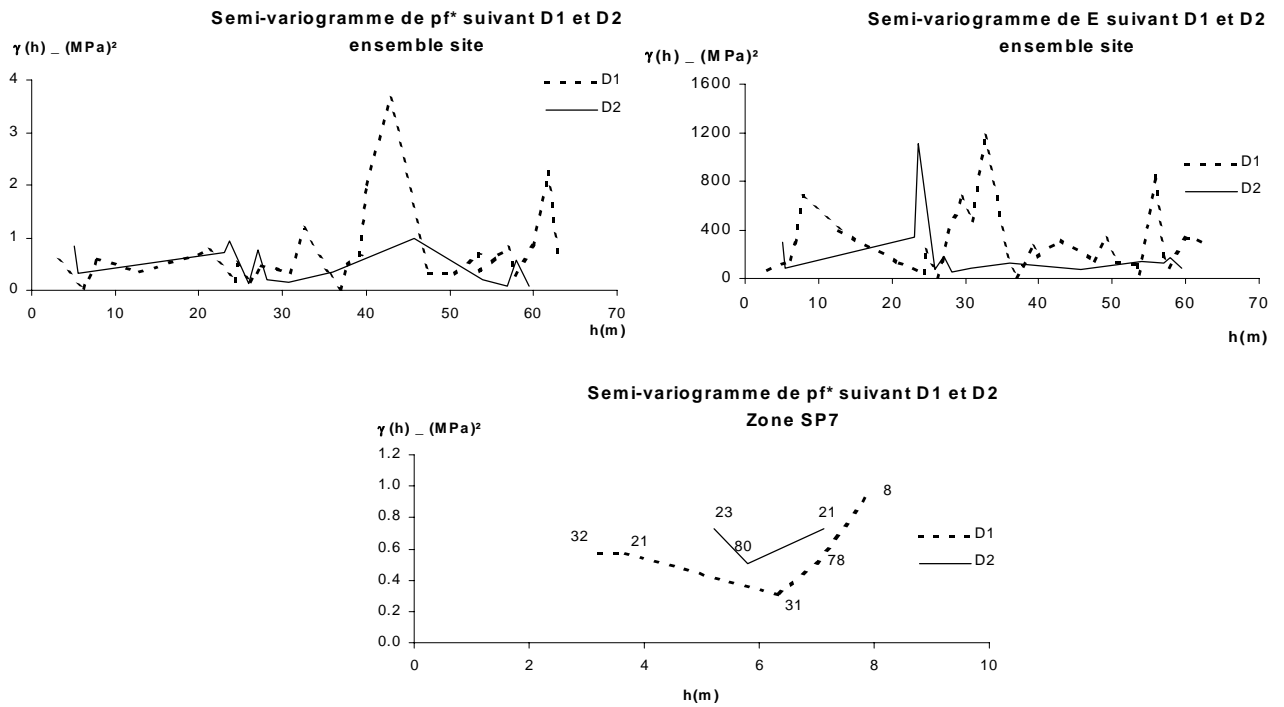
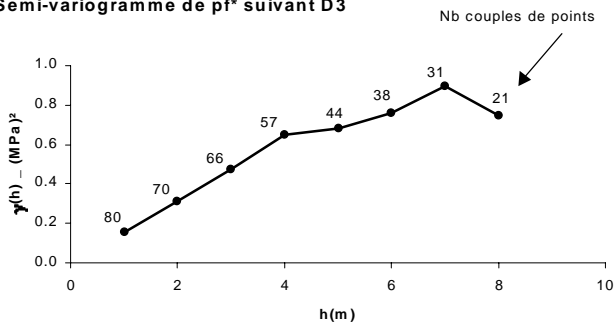


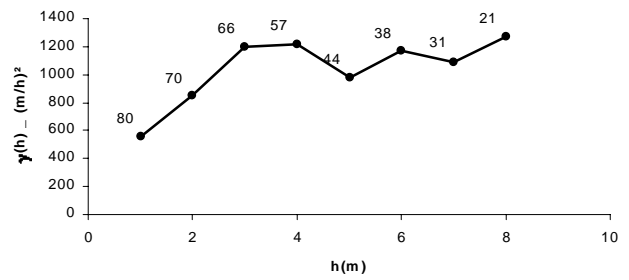
Figure 92 : Variogrammes expérimentaux suivant les directions x et y pour la pression de fluage pf^* , le module pressiométrique à l'échelle du site et au niveau de la zone SP7..

En revanche, le calcul des variogrammes expérimentaux suivant la profondeur (direction D3), permet de mettre en évidence différentes structures de corrélation des données pour l'ensemble des paramètres pressiométriques et diagraphiques (Figure 93).

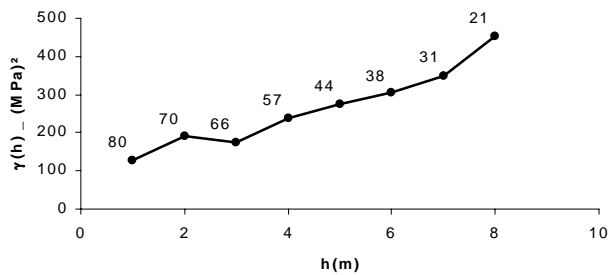
Semi-variogramme de pf^* suivant D3



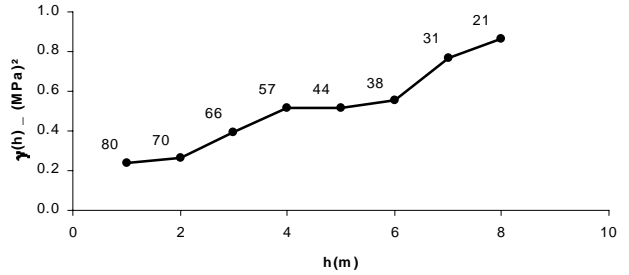
Semi-variogramme de VA suivant D3



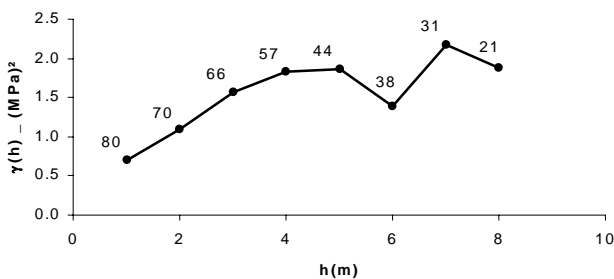
Semi-variogramme de E suivant D3



Semi-variogramme de CR suivant D3



Semi-variogramme de Po suivant D3



Semi-variogramme de Pi suivant D3

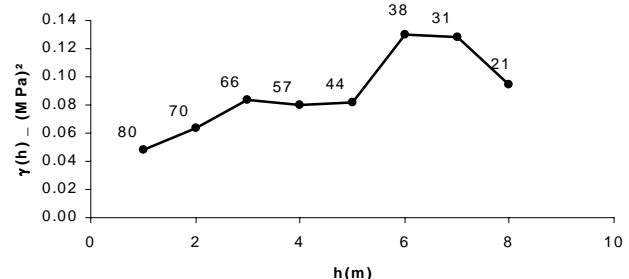


Figure 93 : Variogrammes expérimentaux de pf^* , E, VA, Po, Pi et CR suivant la direction D3 pour l'ensemble du site

Si l'on excepte la pression de fluage, pour laquelle le variogramme suivant l'axe vertical passerait par l'origine, les autres variogrammes sont marqués par des effets de pépité, ce qui traduit une variance de répétabilité des mesures ou l'existence de possibles structures pour un pas de mesures inférieur au mètre.

Les variogrammes du couple de rotation et du module pressiométrique sont marqués par un phénomène de dérive, ce qui constitue un obstacle quant à la détermination de la portée et du palier des variogrammes.

Pour la pression de fluage (p_f^*), nous mettons en évidence, pour le site expérimental, une portée de l'ordre de 4 m et un palier de 0.6 MPa² environ. Ce qui signifie que les valeurs distantes de moins de 4 m sont liées. Au-delà de 4 m, les mesures n'ont plus aucune relation entre elles.

Ce nouvel éclairage sur les données pressiométriques laisse penser, que connaissant la structure de corrélation des pressions de fluage pour un site donné, la distance entre deux

essais pressiométriques peut être espacée, tout en restant inférieur à la portée définie sur le variogramme.

Vitesse d'avance (VA), Pression d'injection (Pi) et Pression sur outil (Po), permettent de déterminer des portées de l'ordre de 3 à 4 m, ce qui est tout à fait cohérent avec la portée déterminée à partir de la pression de fluage. Cette valeur de portée correspondrait à la limite entre les formations superficielles et le substratum à l'échelle du site, et montre qu'à cette échelle, l'ensemble des paramètres acquis, hormis E et CR, respectent ce découpage lithologique. Seules la pression sur outil et la pression d'injection présentent des effets de trou vers 6 et 8 m, ce qui peut être mis en relation avec l'hétérogénéité des matériaux calcaires. Cette interprétation est à mettre en relation avec les profils de p_f^* et E mesurés sur l'ensemble du site, où le découpage du sous-sol suivant trois ensembles apparaît clairement (Figure 94),

- 1^{er} ensemble, jusqu'à 4.0 m de profondeur (matériaux de couverture)
- entre 4.0 et 11.0 m de profondeur, le substratum marno-calcaire
- au-delà de 11.0 m, l'altération très marquée du substratum avec passées sableuses.

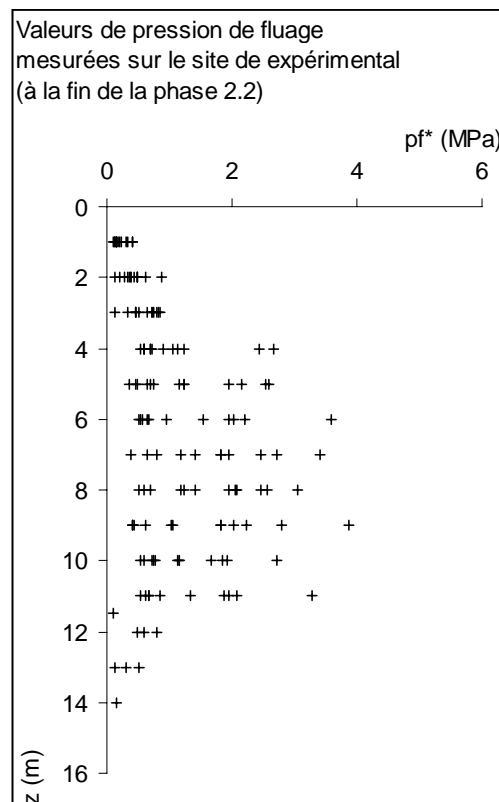


Figure 94 : Ensemble des profils des p_f^* mesurés sur l'ensemble du site

L'étude variographique suivant l'axe z n'est pas rigoureuse car le signal n'est manifestement pas stationnaire suivant la profondeur (Figure 94).

Si l'on procède au calcul des variogrammes de pf^* suivant la direction D3 (z), en les réduisant à la tranche de sol comprise entre 4 et 11 m de profondeur, (Figure 95) les pf^* mesurées dans ce domaine (matériaux marno-calcaire exempts de passées sableuses manifestes) ont visiblement une certaine structure, une portée pouvant être identifiée à 3 m environ.

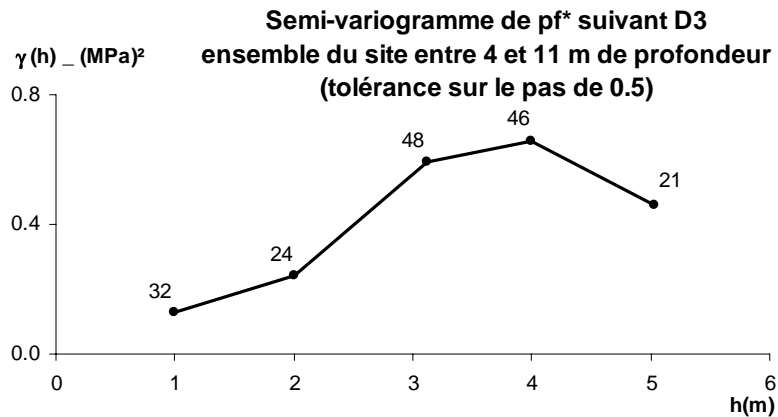


Figure 95 : Variogramme expérimental des pf^* suivant la direction D3 (profondeur) pour la tranche de sol comprise en 4 et 11 m de profondeur (Tolérance sur le pas = 0.5 et 0)

Le nombre de couples de valeurs pris en compte pour h égale à 3 et 4 m est plus important que ce que l'on pourrait attendre en raison de la tolérance admise sur le pas, qui est de 0.5.

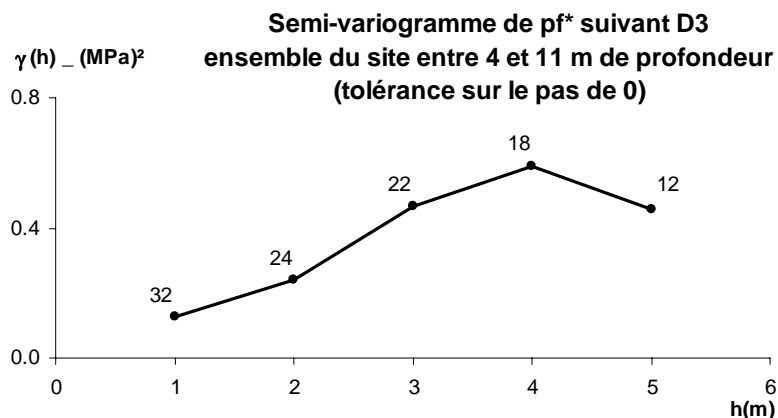


Figure 96 : Variogramme expérimental des pf^* suivant la direction D3 (profondeur) pour la tranche de sol comprise en 4 et 11 m de profondeur (Tolérance sur le pas = 0).

4.2. Modèle de corrélation spatiale

Pour estimer des valeurs de p_f^* par krigeage pour les forages de la phase de reconnaissance 2.2 à partir de la structure des p_f^* obtenue à l'issue de la phase 2.1, nous procéderons :

- à la détermination d'un modèle de variogramme du variogramme expérimental des p_f^* calculé suivant l'axe z (données de la phase 2.1),
- après intégration dans la base de données des forages exécutés en phase 2.2 et ne prenant en compte qu'un essai pressiométrique sur deux, nous estimerons par krigeage les valeurs pressiométriques manquantes (les valeurs pressiométriques de la phase 2.2 n'ont pas été intégrées dans le modèle de variogramme),
- à la comparaison des valeurs estimées par krigeage et des mesures.

Le modèle de variogramme retenu est un modèle cubique de portée (a) égale à 4.6 m et de palier égale à 0.48 MPa² (Figure 97).

Notons qu'ici, l'adéquation du modèle au variogramme expérimental pourrait être améliorée, notamment dans la portion pour laquelle h est inférieur à 4 m, par la combinaison de plusieurs modèles de variogrammes. Ici, la prise en compte de l'absence de corrélation suivant x et y, oblige, pour se rapprocher au mieux de la pente initiale, de considérer une portée un peu plus élevée que celle notée sur le variogramme expérimental de p_f^* suivant D3.

Notons au passage que le variogramme expérimental obtenu ici est très proche dans sa partie initiale du variogramme obtenu pour les individus de la tranche de sol comprise entre 4 et 11 m de profondeur.

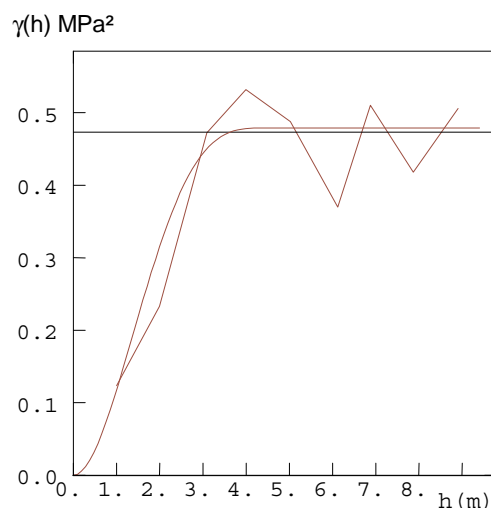


Figure 97 : Modèle de variogramme retenu pour p_f^* (prise en compte de l'anisotropie des valeurs suivant D1, D2 et D3)

L'estimation des valeurs pressiométriques est réalisée tous les mètres suivant la profondeur. Une estimation suivant un pas plus fin est tout à fait possible, mais peu pertinente compte tenu des règles de calcul actuelles inadaptées aux profils continus.

La comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées par krigeage (Figure 98) est tout à fait satisfaisante : la grande majorité des points est proche de la diagonale du diagramme pf^* mesurées = $f(pf^*$ estimées par krigeage).

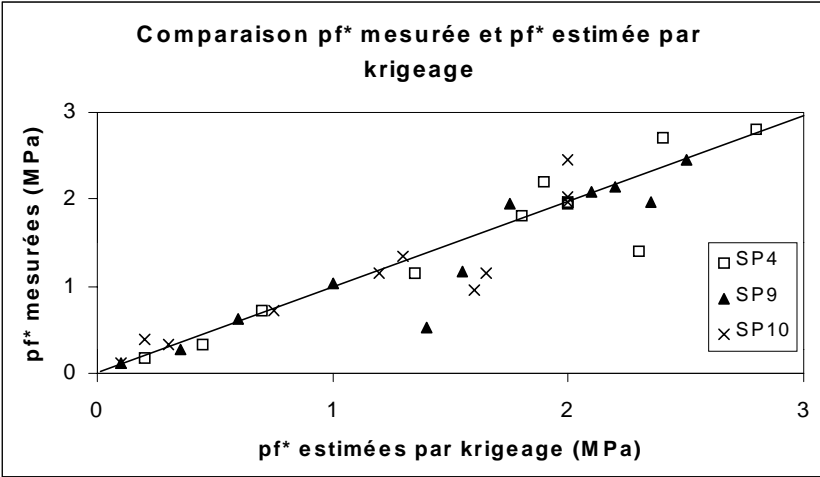
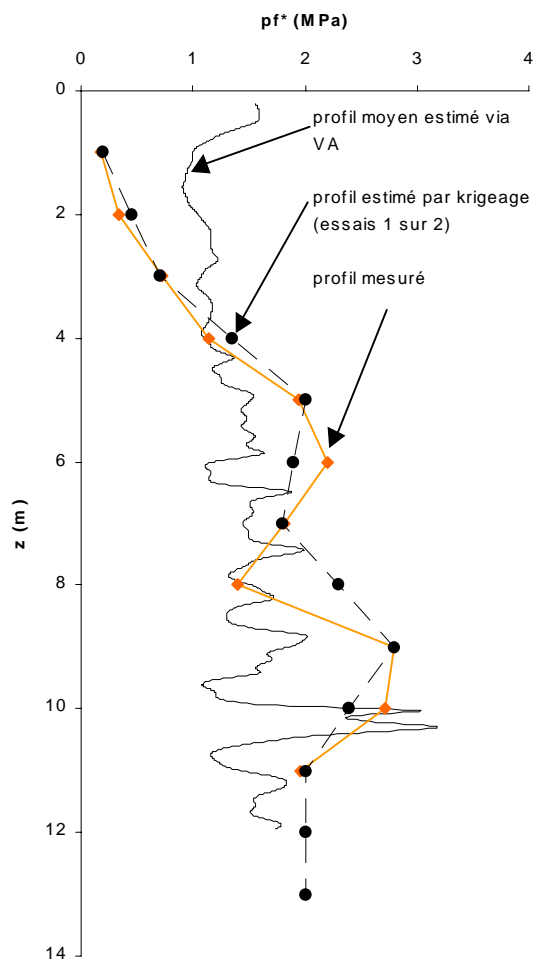


Figure 98 : Pour les forages de la phase de reconnaissance 2.2, pf^* mesurée en fonction de pf^* estimées par krigeage.

Profils de pf^* estimés et mesuré pour le forage SP4



Profils de pf^* estimé par krigeage
Intervalle correspondant à plus ou moins 1 fois l'écart type de l'estimation - forage SP4

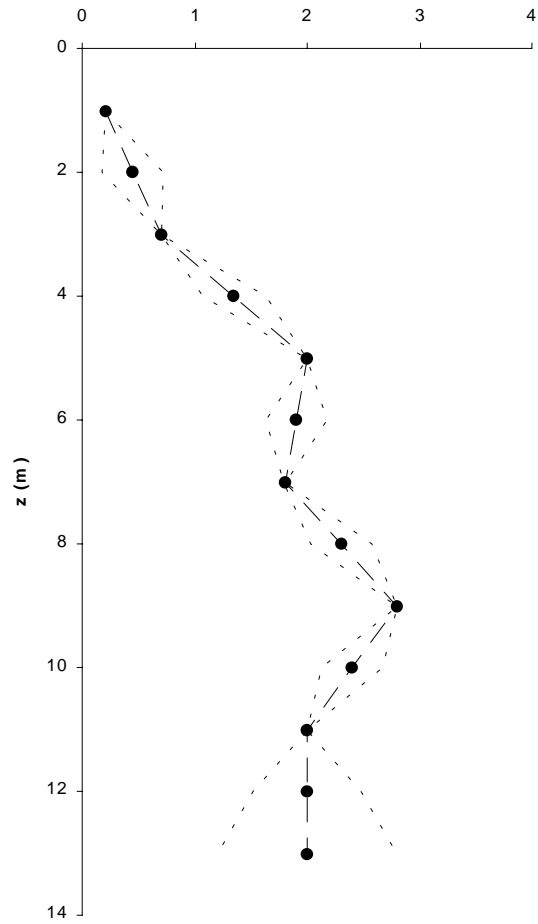


Figure 99 : Profils de pf^* : estimés via les paramètres de forages VA, par krigeage 1 essai sur 2 ayant été réalisé, profils de pf^* mesuré (forage SP4)

Ainsi, dans le cadre d'un programme d'une campagne géotechnique, il peut être envisagé, à partir d'une première phase de reconnaissance de définir et de modéliser, si elle existe, une structure de corrélation spatiale entre les données pressiométriques suivant la profondeur.

La détermination d'une distance de corrélation supérieure à l'espacement usuel (1 m à 1.5 m) des essais pressiométriques permet d'envisager, pour la réalisation de forages complémentaires, d'espacer les mesures pressiométriques. Les valeurs intermédiaires estimées par krigeage sont assorties d'un écart-type permettant d'apprécier la qualité de l'estimation.

Dans cette optique et dans le but d'exploiter l'information diagraphique, l'utilisation de covariogrammes (paramètre pressiométrique et paramètre diagraphique explicatif) pourrait être envisagée dans le cadre d'un développement de la méthodologie proposée.

5. Apport réel des diagraphies instantanées dans l'estimation du risque associé à une valeur géotechnique.

La méthodologie proposée suit le schéma présenté en seconde partie figure 33 où le rôle des enregistrements de paramètres de forage intervient à deux niveaux : lors de l'établissement des corrélations permettant d'estimer des valeurs pressiométriques à partir d'un log. diagraphique explicatif et au niveau d'une proposition d'un log lithologique probable plus conforme aux informations portées par les enregistrements de paramètres. De la lithologie dépend le poids des différentes relations dans la valeur finale du paramètre pressiométrique estimé.

Afin de vérifier le gain apporté par l'information diagraphique, nous proposons de comparer, pour une fondation superficielle, les valeurs de risque estimées d'une part par la méthodologie proposée, d'autre part à partir d'une image du site générée sans l'apport des enregistrements de paramètres de forage.

Nous considérerons les données issues des forages de la campagne de reconnaissance phase 2.1 hormis les forages SP5 et SP8. Pour les simulations, la lithologie est considérée à l'échelle du forage :

- à partir de l'algorithme développé dans la seconde partie, via un signal diagraphique, dans le cadre de la méthodologie proposée,
- à partir de la valeur de p_f^* , pour la simulation qui ne prend pas en compte les enregistrements de paramètres.

La construction de la fonction de répartition de q_u pour le site sans tenir compte de l'information diagraphique suit la procédure énoncée ci-après :

La base de données constituée des forages menés en phase 2.1, hormis SP5 et SP8, est divisée en deux groupes, les "matériaux de couverture" (A) pour lesquels $p_f^* < 1 \text{ MPa}$ et les matériaux "calcaire" (C) où $p_f^* > 1 \text{ MPa}$.

Moyennes et écart-types des logarithmes népériens de p_i^* sont calculés pour chaque groupe.

Les profils pressiométriques simulés correspondent à une lithologie locale conditionnée par les valeurs pressiométriques mesurées au sein de chaque forage.

$$pf^*_{simulées} = \sum_{i=1}^{NF=2} e^{LN(moy_{\ln pf^*_{form_i}}; sd_{\ln pf^*_{form}})} \cdot p(form_i)_{xz}$$

On pose $p(A)_x = 1$ si $pf^*_x < 1$ MPa et $p(A)_x = 0$ lorsque $pf^*_x > 1$ MPa, $(p(B))_x$ étant le complémentaire de $p(A)_x$.

Dans la formation A :

$moy_{\ln pf^*_A} = -0.72$ et $sd_{\ln pf^*_A} = 0.47$

Dans la formation B :

$moy_{\ln pf^*_B} = 0.66$ et $sd_{\ln pf^*_B} = 0.40$

La comparaison entre les fonctions de répartition de q_u obtenues

- à partir d'une simulation ne prenant en compte que l'information pressiométrique,
- à partir d'une image du site construite en considérant l'information diagraphique,

est reportée Figure 100.

Pour le site de l'IUT et la fondation considérée à un niveau de risque donné, la prise en compte des diagraphies instantanées conduirait à la détermination d'une contrainte supérieure à celle estimée à partir de la seule information pressiométrique, soit, pour un même niveau de risque, à un gain vis à vis du coût de construction.

Pour un niveau de risque de $5 \cdot 10^{-3}$, nous obtenons une contrainte de 0.19 MPa en considérant les enregistrements de paramètres de forage, contre 0.13 MPa avec l'utilisation de l'information pressiométrique seule.

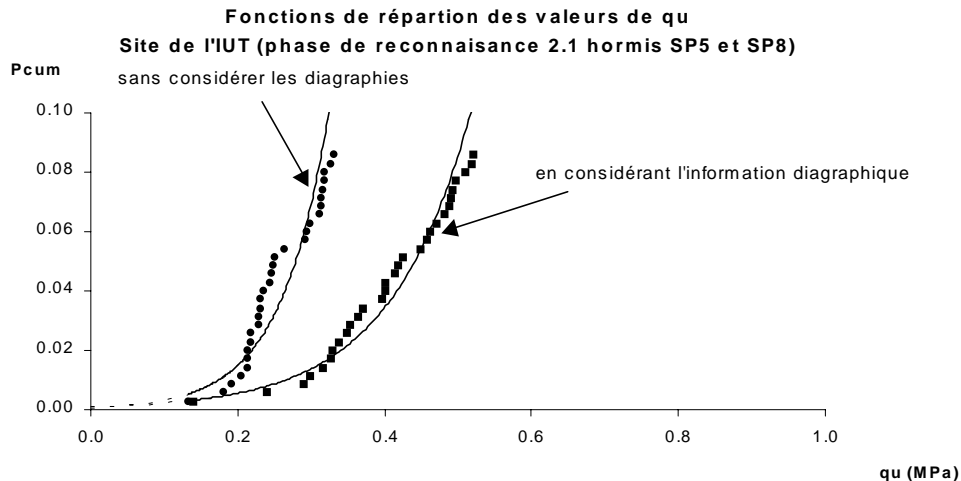


Figure 100 : Fonctions de répartition obtenues en considérant ou non l'information diagraphique

Même si nous ne sommes pas en mesure d'affirmer que le résultat obtenu en tenant compte des diagraphies instantanées est plus "vrai" que celui généré via les paramètres pressiométriques seuls, l'utilisation des signaux diagraphiques permet de prendre en compte, à un niveau plus fin, la variabilité des caractéristiques mécaniques du sol et d'estimer des valeurs pressiométriques cohérentes avec la réponse du sol vis à vis du processus de forage.

6. Recommandations et précautions de chantier à mettre en œuvre pour optimiser les résultats obtenus par le processus proposé.

Les conditions d'une utilisation optimale de la méthodologie, se regroupent en deux pôles principaux.

6.1. Acquisition contrôlée des données diagraphiques.

Nous avons vu que la variabilité des conditions de forage altérerait les corrélations entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage.

Pour mieux mettre à profit les enregistrements de paramètres de forage, en tirer une information quantitative et enrichir les données pressiométriques, il conviendrait :

- de procéder à l'exécution des sondages en conservant autant que possible les conditions d'exécution (même type d'outil, même machine, même équipe de forage) sous peine de devoir fragmenter la base de données et diminuer la qualité des corrélations utilisables,
- de rendre obligatoire, l'acquisition de la vitesse de rotation et de la pression de retenue, en plus des paramètres usuels tels que vitesse d'avance, pression de rotation, pression d'injection et pression sur outil,

- d'établir une fiche signalétique mentionnant les caractéristiques de la ou des machines de forage, des outils, du poids de tête et des tiges. Ce travail pourrait être mené à la source, c'est à dire lors de la conception des machines de forage, qui devraient être équipées des six capteurs essentiels (VA, Pi, Po, P. ret, CR et VR) et en mentionnant de façon systématique les caractéristiques hydrauliques de la machine.

Si les enregistrements de paramètres de forage doivent être valorisés et permettre la détermination de valeurs quantitatives, il sera aussi nécessaire d'établir une réglementation précisant, comme pour la norme pressiométrique, les conditions d'exécution des sondages selon la nature des terrains présumés.

6.2. Qualité des essais pressiométriques

En plus du respect de la norme pressiométrique, les essais pressiométriques pourraient être notés selon leur degré de représentativité. Selon qu'ils seront jugés très fiables (***), fiables (**), ou peu fiables (*), ils pourront ainsi être éliminés de la base de données ou peser de façon variable dans les corrélations et détermination des écart-types.

Nous proposons une grille de classement des essais selon la typologie de la courbe pressiométrique à 60 min et les règles de base imposées par la norme pressiométrique (annexe 29).

Conclusion générale

A partir d'un nombre limité de forages destructifs avec enregistrements de paramètres de forage et d'essais pressiométriques exécutés au sein de ces forages destructifs réalisés préalablement, nous sommes en mesure de proposer, via une méthodologie simple applicable en bureaux d'études géotechniques, une estimation du risque associé à une valeur de calcul proposée par l'ingénieur et, inversement, de définir, pour un site et une fondation donnée, une contrainte correspondant à un niveau de risque de référence fixé.

Le travail est conditionné par :

1. l'établissement de corrélations entre paramètres de forage et paramètres pressiométriques.

Ces relations, comme nous l'avons vu pour le site expérimental, dépendent du site, des conditions de forage et de la nature des matériaux. Toutefois, aucune règle générale ne peut être établie et l'étude des relations entre paramètres de forages et paramètres pressiométriques doit être menée au cas par cas, la distinction lithologique n'étant pas toujours possible ou nécessaire.

La qualité des corrélations obtenues sur les différentes bases de données traitées s'est révélée médiocre, essentiellement en raison des différents bruits de mesure tant sur les paramètres diagraphiques que sur les données pressiométriques. De plus, les deux modes d'information bien qu'ils soient conditionnés par les caractéristiques mécaniques des matériaux traversés ne mettent pas en jeu la même physique, ils traduisent des phénomènes différents.

2. les découpages lithologiques possibles qui peuvent être considérés selon différentes échelles d'observation, à l'échelle du site ou à l'échelle du forage et dans les deux cas, établis à partir de divers critères. L'expert privilégiera la proposition lithologique la plus cohérente avec l'histoire géologique et sa connaissance du site. Selon les experts et les critères de décision, les propositions lithologiques ne sont pas réellement différentes mais plutôt plus ou moins fines dans le sens où elles découpent le sous-sol en un nombre variable de catégories.

Le processus algorithmique que nous proposons permettant d'obtenir une image du milieu foré à partir d'un ou deux paramètres de forage et d'une proposition lithologique a priori initialisant le processus, n'évolue pas, nécessairement, vers une solution plus juste mais simplement plus conforme à l'information diagraphique.

Le résultat se présente sous la forme d'un log de probabilités d'appartenance aux formations considérées. Ainsi, lors de l'estimation d'une image pressiométrique du site plus complète que celle obtenue à partir des seuls profils mesurés, les caractéristiques de plusieurs formations pourront contribuer à la génération d'une valeur pressiométrique.

3. L'estimation du risque attaché à une valeur de calcul définie par l'ingénieur est réalisée à partir de la distribution statistique de profils pressiométriques générés via les profils diagraphiques et les équations de corrélation, le processus étant conditionné par la lithologie choisie. Il apparaît que la prise en compte d'une lithologie à l'échelle du forage, respectant les hétérogénéités locales perçues par les enregistrements de paramètres de forage conduit à une meilleure évaluation du risque plus proche de la réalité.

L'application de la méthodologie sur des données réelles, pour le cas d'une fondation superficielle et d'une fondation profonde de type micropieu, a conduit à une estimation de la probabilité que la valeur ingénieur soit supérieure à la portance réelle du sol de l'ordre de 10^{-3} , pour un nombre de sondages inférieur à 10. La détermination du niveau de risque attaché à la valeur géotechnique définie par l'ingénieur est fonction du stade de la campagne de reconnaissance et dépend des forages considérés, néanmoins les valeurs de probabilités obtenues restent du même ordre de grandeur et varient pour la contrainte aux états limites de service entre $2 \cdot 10^{-3}$ et $5 \cdot 10^{-3}$ pour une fondation superficielle. L'augmentation du nombre de forages réduit l'incertitude d'estimation de la probabilité réelle. Il reste que des modèles théoriques plus rigoureux doivent être mis en place afin de modéliser les queues de distribution et préciser ainsi les valeurs extrêmes de portance du sol.

Pour le site expérimental, compte tenu de l'implantation des sondages et du bruit des mesures, nous n'avons pas pu mettre en évidence de corrélation spatiale entre les mesures diagraphiques ou pressiométriques dans le plan horizontal. Cela interdit l'estimation, par les méthodes géostatistiques, entre les points de sondages.

En revanche, la détermination d'une structure de corrélation des paramètres pressiométriques suivant la profondeur, avec une portée supérieure à l'espacement usuel des essais pressiométriques permet d'envisager, pour des sondages complémentaires, d'espacer les essais pressiométriques, les valeurs intermédiaires pouvant être estimées par krigeage et assorties d'un écart-type permettant de juger de la qualité de l'estimation.

Ce travail s'est limité aux calculs géotechniques permettant de déterminer la portance du sol pour le cas d'une fondation superficielle et pour le cas d'une fondation profonde de type micropieu, qui ne prend en compte dans son dimensionnement que le terme de frottement latéral. Il conviendrait de tester dans des travaux ultérieurs, le cas d'une fondation profonde permettant la prise en compte du terme de pointe afin d'en apprécier l'impact sur les résultats.

La méthodologie, sous réserve que les corrélations entre paramètres de forage et module pressiométrique soient suffisamment représentatives, peut être également adaptée à l'estimation de la distribution des tassements prévisibles pour un site donné, elle offrirait ainsi la possibilité de mieux apprécier les tassements différentiels sous l'emprise d'un bâtiment.

L'utilisation pratique de la méthodologie en bureaux d'études reste délicate car la fiabilité des résultats dépend de la qualité des données et de l'état d'avancement de la campagne de reconnaissance. De plus, la détermination des corrélations, qui conditionnent toute la faisabilité de la méthode peut se révéler ardue compte tenu du bruit important sur les

mesures, tant sur les valeurs que sur leur localisation précise dans le plan horizontal, mais surtout suivant la profondeur z et les résultats peuvent être décevants.

La fiabilité des résultats peut être accrue via l'application d'une démarche qualité qui pourrait inclure une standardisation des enregistrements de paramètres de forage, et une certification des sondeurs, selon leur expérience. Une formation spécifique permettrait, en plus de perfectionner leur savoir-faire, de mieux sensibiliser les équipes de forage à l'impact des erreurs de mesures sur les résultats finaux et de mieux les impliquer dans le travail de l'étude géotechnique.

Les résultats de cette étude mettent en avant les problèmes rencontrés par l'expert géotechnicien - géologue, qui doit démêler, dans la variabilité des données la part relative à l'hétérogénéité réelle du sous-sol et celle liée aux erreurs de mesures, son rôle et le bon sens restent essentiels et ne sont pas prêts d'être remplacés.

Bibliographie

- [Abdul Baki 92]** - A. Abdul Baki - 1992- Analyse probabiliste du comportement de deux remblais sur versants instables. Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon 290 pages.
- [Amar & al 93]** - S. Amar, J.F. Jézéquel - 1993 - Propriétés mécaniques de sols déterminées en place. Technique de l'ingénieur, article C 220. pp.11 - 16.
- [Amokrane 88]** - K. Amokrane 1988- Contribution à l'analyse statistique des diagraphies instantanées en génie civil. Doctorat Université Bordeaux I.
- [Antoinet 95]** - E. Antoinet - 1995 - Intégration de la variabilité spatiale dans l'estimation probabiliste du tassement et du dévers de grands ouvrages. Doctorat Université Bordeaux I. 195 pages.
- [Azzouz 87]** - R. Azzouz, C. Baconnet, J.C. Faugeras 1987 - Analyse géostatistique d'une campagne de reconnaissance au pénétromètre statique. Proceedings, 5th international conference on applications of statistics and probability in soil and structural engineering. Vancouver, vol 2 - pp 821 - 828.
- [Baecher 98]** - G.B. Baecher 1998 - Parameters and approximations in geotechnical reliability - Uncertainty modelling and analysis in civil engineering - édité par Bilal M. Ayyub 1998 pp 489 - 499
- [Barles & al 99]** - S. Barles, D. Breysse, A. Guillerme, C. Leyval - 1999 - le sol urbain, ed. Anthropos, coll. Villes paris.
- [Bolle 00]** - A. Bolle 2000 - Etude et prise en compte de la variabilité spatiale. Réunion technique du 20/09/00. Comité français de mécanique des sols et géotechnique. 18 pages.
- [Bolle 93]** - A. Bolle 1993 - How to manage the spatial variability of natural soils? Probabilities and materials. Tests, models and applications edited by D. Breysse. NATO ASI Series. Serie E : applied Sciences Vol. 269. pp 505 - 516.
- [Bourget & al 95]** - M. Bourget et M. Rat 1995 - Interprétation semi-automatique des enregistrements de paramètres de forage (sondeuses hydrauliques en rotation). Revue française de géotechnique n°73. 4^{ème} trimestre 1995. pp 3 - 14.
- [Bourget 93]** - M. Bourget 1993 - Contribution géostatistique à l'étude des diagraphies instantanées. Doctorat Université Bordeaux I, 1993.
- [Breysse 01]** - D. Breysse 2001 - Les enjeux en modélisation des terrains et des structures pour décrire au mieux l'interaction sol - ouvrage. 1^{ère} conférence internationale Albert Caquot. Modélisation et simulation en génie civil de la pratique à la théorie - Paris 3-5 octobre 2001 (France). 8 pages.

[Breysse 99] - D. Breysse 1999- Chapitre VII - Génie civil urbain et mécanique des sols - dans *Le sol urbain*, ed. Anthropos, coll. Villes paris. pp 143 - 178.

[Cafaro & al 00] - F. Cafaro, C. Cherubini, F. Cotecchia - 2000 - Use of the scale fluctuation to describe the geotechnical variability of an Italian clay. Proc. ICASP 8, Sydney, Australia, Melchers & Stewart, Balkema. pp. 481 - 486.

[Cassan & al 99] - M. Cassan, M. Gambin 1999 - L'enregistrement des paramètres de forage sur la nouvelle ligne TGV Méditerranée. XII congrès Européen de la SMIGE, Amsterdam 7/10 juin 1999. 6 pages.

[Cassan 00] - M. Cassan 2000 - Evaluation statistique des caractéristiques géotechniques - Méthodologie pratique et exemples. Document Fondasol - Communiqué à la réunion technique du CFMS du 20 / 09 /2000.

[Cassan 88] - M. Cassan 1988 - Les essais in situ en mécanique des sols, tome 1, (2^{ème} édition) réalisation et interprétation. Editions Eyrolles. 587 pages.

[Cherubini 93] - C. Cherubini - 1993 - The variability of geotechnical parameters. Probabilities and materials. Tests, models and applications edited by D. Breysse. NATO ASI Series. Serie E : applied Sciences Vol. 269. pp 69- 80.

[Costet & al. 81] - Costet, Sanglerat 1981 - Cours pratiques de mécanique des sols - Tome 1 - Plasticité et calcul des tassements. 3^{ième} édition DUNOD 1981 - 447 pages.

[Crémoux & al 91] - F. Crémoux - J. Malzac 1991 - Optimisation of instantaneous drilling parameter logging. Detection of sand and clay cavities. ICASP 6 Mexico City, Mexico. pp 644 - 651.

[Dagnelie 98] - P. Dagnelie - 1998 - Statistique théorique et appliquée Tome 2 - Inférence statistique à une et à deux dimensions. Bibliothèque des Universités - De Boeck Université - 659 pages.

[De Fouquet 93] - C. de Fouquet 1993 - Géostatistique orientée vers le traitement des données : notions clés et exemples. Communication présentée au meeting "Geostatistics and geographic information systems" Gembloux . pp 114 - 146.

[Delage & al 99] - Caractérisation spatiale des sols urbains Chap. IX dans Le sol urbain - Anthropos, Collection Villes - 1999. pp 215 - 259.

[Delhomme 78] - J.P. Delhomme 1978 - Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Bulletin du BRGM (2^{ème} série). Section III, n°4. pp 341 - 375.

[Denis & al 97] - A. Denis, F. Crémoux, D. Breysse - 1997 - Apport d'une approche géostatistique dans l'interprétation des mesures des diagraphies différées. Revue de l'institut du pétrole, vol.52 n°4 - juillet-Août 97. pp 389 - 406.

[Denis & al 98] - A. Denis, F. Crémoux, E. Lapeyre -1998 - Utilisation des paramètres de pilotage d'un tunnelier pour une recherche et une quantification automatique des zones homogènes. 1^{ère} conférence internationale sur les nouvelles technologies de l'information pour la prise de décision en génie civil, Montréal. pp 733 - 744.

[Deplagne & al 93] - F. Deplagne, C. Bacconnet - 1993 - Analyse structurale d'une digue en argile - Cahiers de géostatistique, Fascicule 3. Journées de géostatistiques, 25 - 26 mai 1993 - Fontainebleau, France, pp 181 - 188.

[doc. Solétanche] - La méthode Enpasol - Document technique de la société Solétanche.

[DTU 13.12] - Document technique unifié n°13.2 - Règles pour le calcul des fondations profondes septembre 1992 - (Référence Afnor DTU P 11-212). 72 pages.

[DTU 13.2] - Document technique unifié n°13.12 - Règles pour le calcul des fondations superficielles mars 1988 - (Référence Afnor DTU P 11-711). 11 pages.

[Duchamp 88] - J.M. Duchamp 1988 - Apport des techniques statistiques pour l'exploitation des diagraphies instantanées en génie civil. Doctorat Université Bordeaux I - n° d'ordre : 273. 131 pages.

[Ducreux 01] - Mesure et représentativité - "Sécheresse et fondations de bâtiments : retour d'expérience" - Géologues n°129 - 2001 - pp 28 - 33.

[Emeriault & al 01] - F. Emeriault, D. Breyse, R. Kastner, A. Denis - 2001 - Geotechnical survey and mechanical parameters in urban soils. Part one : Modellind soil variability and inferring representative values. Case of Lyon subway line D extension. (to be published).

[Favre 00] - J.L. Favre 2000- Différents types d'erreurs et leur prise en compte dans les calculs - Communiqué à la réunion technique du CFMS du 20 / 09 /2000 - Traitement des incertitudes dans le calcul des ouvrages géotechniques. 11 pages.

[Ferry 96] - S. Ferry - 1996 - Traitement automatique des diagraphies instantanées de forage en Génie Civil. Doctorat Université Bordeaux I. 98 pages.

[Flepp & al 83] - G. Flepp, B.Goguel 1983 - Utilisation de corrélations entre paramètres pour une reconnaissance de site plus efficace au barrage du Cheliff (Algérie). Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur n° 26 - 27 Paris.

[Frank 99] - R. Frank 1999 - Calcul des fondations superficielles et profondes. TI. Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées. 141 pages.

[Frappa & al 00] - M. Frappa, D. Zambon, S. Boyrie 2000- Depth control of stone columns made by dynamic replacement. 6^{ème} meeting EEGS, 3 -7 septembre 2000 - Bochum (Allemagne).

[Frappa 93] - M. Frappa - 1993 - Prospection électrique, méthode des résistivités - 78 pages.

- [Gambin 89]** - M. Gambin - Le compactage statique horizontal. Annales de l'I.T.B.T.P. n° 476 août / septembre 1989. Série sols et fondations 205. pp 11 - 35.
- [Girard 85]** - H. Girard 1985 - Contribution à l'exploitation des paramètres de forage en génie civil. Thèse d'Etat - Université Bordeaux I, 1985. 161 pages.
- [Guillaume 77]** - A. Guillaume - 1977 - Analyse des variables régionalisées - Traitement du signal en Sciences de la Terre. Ed. Doin - 180 pages.
- [Hollier-Larrousse & al 00]** - A. Hollier-Larrousse, C. Folton, P. Meriaux, J. Wakselman, P. Frappin - Novembre 2000 - Rapport CRITERRE - Thème 1 : Détection des anomalies physiques des terrains. Etude comparative des méthodes de reconnaissance géophysique et géotechnique des digues à sec. 66 pages.
- [Jaksa 95]** - M.B. Jaksa 1995 - The influence of spatial variability on the geotechnical design properties of a stiff overconsolidated clay. Doctorat- University of Adelaide, Australia. 396 pages.
- [Janbu & al. 63]** - Janbu, Nilmar - 1963 - "Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests - European conference on soil mechanics and foundation engineering, Wissbaden, Germany, vol.1 pp 19-35. (cité par Duncan 1980).
- [Jureckova 00]** : J. Jureckova - 2000 - Test of tails based on extreme regression quantiles. Statistics a Probability Letters 49 (2000) pp 63 - 61.
- [Kastner & al 97]** - R. Kastner, R. Comeaga - 1997- Simulation d'une excavation en terrain meuble avec la méthode des différences finies. Comparaison avec les résultats expérimentaux. 15^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil : Comparaison entre résultats expérimentaux et résultats de calcul, EC'97, Strasbourg (France) 22 - 23 mai 1997, pp 143 - 150.
- [Kovarik & al. 00]** - J.B. Kovarik & F. Baguelin 2000 - Une méthode de détermination des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques. 51 pages. (Statut du document ?)
- [Kumar & al 00]** - JK. Kumar, M. Konno, N. Yasuda 2000 - Subsurface soil-geology interpolation using fuzzy neural network. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering / july 2000. Pp 632 - 639.
- [Lagabrielle 92]** - R. Lagabrielle 1992 - Les apports des mesures géophysiques à la reconnaissance du sous-sol avant les travaux sans tranchées. -Travaux, octobre 1992 - pages 41 - 45.
- [Lajoinie & al 86]** - J.P. Lajoinie, J.P. Platel, A. Autran, J. Dubreuilh, D. Bonijoly et J. Fourniguet - 1986 - Les grandes étapes de l'histoire géologique de quatre régions françaises - Le Bassin d'Aquitaine - Rapport BRGM 86 SGN 424 Géo pour le Commissariat à l'énergie atomique, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. 32 pages.

[Ian-Chih Ho & al 00] - Lan-Chih Ho, P. Burrige, J. Cadle, M. Theobald - 2000 - Value at risk : applying the extreme value approach to Asian markets in the recent financial turmoil. - Pacific-bassin Finance Journal 8 (2000) pp 249 - 275.

[Lassing & al 00] - B.L. Lassing & E.O.F Calle 2000 - Optimisation of a dike by reducing uncertainties in the soil profile.- Proc. ICASP 8, Sydney, Australia, Melchers & Stewart, Balkema. pp. 1213 - 1218.

[Lepetit & al 00] - L. Lepetit, C. Bacconet, D. Boissier, R. Gourves 2000 - Geotechnical study of the chinese loess. Proc. ICASP 8, Sydney, Australia, Melchers & Stewart, Balkema. pp. 491 - 498.

[Loke 98] - M. H. Loke -1998 - Res2Dinv ver3.3 for Windows 3.1 and 95 - rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-square method. Geoelectrical imaging 2D and 3D septembre 1998.

[Magnan 93] - J. P. Magnan 1993 - Corrélations entre les propriétés des sols. Techniques de l'ingénieur, article C219. 10 pages.

[Magnan 96] - J.M Magnan 1996 - Les applications des statistiques et probabilités en géotechnique au LCPC. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°202 mars - avril 1996. Ref 4022. pp 25 - 35.

[Masson ed. 78] - Statistique appliquée à l'exploitation des mesures tome 1 et 2 - commissariat à l'énergie atomique - Editions Masson (1978) - 407 pages.

[Matheron 70] - G. Matheron 1970 - La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. Fascicule 5. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris Edit. 212 pages.

[Mazier 90] - La Lettre Mazier n°4, 1990 - " Enregistrements des paramètres de forage" - Groupe Seditech. 32 pages.

[Ménard 57] - L. Ménard - 1957- Mesures in situ des propriétés physiques des sols - Annales des Ponts et Chaussées, vol 3. pp . 357 - 376.

[Morlier & al 89] - P. Morlier, K. Amokrane et J.M. Duchamps 1989 - L'effet d'échelle en mécanique des roches : recherche de dimensions caractéristiques. Revue française de géotechnique n°49. Octobre 1989. pp 5 - 15.

[Naisse 92] - J.P. NAISSE - 1992 - L'approximation analytique vers une théorie empirique constructive et finie.

[NFP 94 056] - Norme Française NFP 94 - 056 - Analyse granulométrique d'un sol - Méthode par tamisage. (document provisoire)

[NFP 94 057] - Norme Française NFP 94 - 057 - Analyse granulométrique d'un sol - Méthode par sédimentométrie - mai 1992 - 17 pages.

[NFP 94 068] - Norme Française NFP 94 - 068 - Granulats - Essai au bleu de méthylène (méthode à la tâche) - Décembre 1990 - 5 pages.

[NFP 94-110] - Norme française NFP 94 - 110 - Sols : reconnaissance et essais - Essai presiométrique Ménard - 43 pages.

[NFP 94-500] - Norme française NFP 94 - 500 - Missions géotechniques, classification et spécifications - Juin 2000 - 37 pages.

[Panissod & al 01] - C. Panissod, D. Michot, Y. Benderitter, A. Tabbagh - On the effectiveness of 2 D electrical inversion results : an agricultural case study. Geophysical Prospecting, 2001, 49 - pp 570 - 576.

[Philipponat & al 97] - G. Philipponat, Hubert B. 1997 - Fondations et ouvrages en terre, Eyrolles, Paris, 548 pages.

[Rahmani 98] - N. Rahmani -1998 - Détection des cavités par prospection électrique et analyse inverse, Doctorat Université Bordeaux I.

[Rap. D01/B039] - Rapport géotechnique Alios D01/B039 du 28 juin 2001. 16 pages + 7 pages d'annexes.

[Rapport synthèse Me2i & al 00] : MGC 615, rapport de synthèse Me2i - CDGA - Bouygues - Spie - Solen - octobre 2000. Projet de reconnaissance à l'avancement de tunnel par géophysique dans forages en attente.

[Rosembaum & al 97] - MS. Rosembaum, L. Rosen, G. Gustafon - Probabilistic models for estimating lithology. Engineering Geology 47. pp43 - 55.

[Saporta 90] - G. Saporta - 1990. Probabilités, Analyse des données et statistiques. Editions technip.

[Semaan & al 99] - I. Semaan, C. Boulemia, D. Boissier 1999- Probabilistic modelling of data from site investigation . Proceedings of the ICASP 8 conference Sydney, New south wales, Australia - 12 - 15 décembre 1999.

[Subrahmanyam 00] - M.S. Subrahmanyam & I.T. Ng 2000 - Probability-based design of soil exploration programme - Application of statistics and probability Melchers & Stewart (eds) 2000 Balkema, Rotterdam p 1109 - 1114.

[Suitma conference 00] - First International Conference on Soil of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas - Proceedings, Vol. I - The unknown urban soil, Detection, resources and faces / Vol. II - Application of soil information / Vol. III - The soil quality and problems. What shall we do? 1097 pages. University of Essen (Germany) July 12 - 18 - 2000.

[Sycodés n°67] - Pathologie des fondations en maisons individuelles - Quelques analyses. juillet - août 2001 p 54 à 56.

[Vanmarcke 83] - E. Vanmarcke - 1983 - Random Fields : analysis and synthesis. The MIT Press. 382 pages.

[Vigneaux 75] - M. Vigneaux 1975 - Aquitaine occidentale - Guides géologiques régionaux. Masson et Cie, éditeurs, 223 pages.

[Zerdazi 96] - M. Zerdazi - 1996 - Transfert d'informations entre les diagraphies instantanées et différées sur différentes échelles d'observation du géomatériau. Doctorat Université Bordeaux I - 142 pages.

Communications produites au cours du travail de thèse

Improving the knowledge of soil's variability by coupling of techniques : instantaneous diagraphy and expensive pressumeter test.

N. Moussoutéguy / D. Breyse / P. Chassagne

The SUITMA Conference . ESSEN, 07/2000 - 4 pages.

Improving the knowledge of soil's variability by coupling of techniques : instantaneous diagraphy and pressumeter test.

N. Moussoutéguy

Internationnal Young Geotechnical Engineers Conference 2000. SOUTHAMPTON, 09/2000. Résumé de 2 pages.

Diminution des incertitudes géotechniques par une meilleure reconnaissance de l'hétérogénéité du sol : utilisation combinée des diagraphies instantanées et des essais pressiométriques

N. Moussoutéguy / D. Breyse / P. Chassagne

Fiabilité des matériaux et des structures 3^{ème} conférence nationale "JN-Fiab 3" - BORDEAUX, 02/2001 - 11 pages.

Reducing uncertainties and risk in the soil by coupling of techniques

N. Moussoutéguy / D. Breyse / P. Chassagne

International Conférence on "Safety, Risk and Reliability - Trends in Engineering" MALTE, 03/2001 - 6 pages.

Decrease of geotechnical uncertainties via a better knowledge of the soil's heterogeneity : combined use of instantaneous diagraphies and pressumeter test

N. Moussoutéguy, D. Breyse, P. Chassagne (2002)

Revue Française de Génie Civil - Volume 6 - n°3 - 2002 - p 343 - 353.

ANNEXES

Liste des annexes

Annexe 1 : Chantier de la Bourse de Moscou - Plans de situation.

Annexe 2 : Chantier de la Bourse de Moscou - Schéma d'implantation des sondages.

Annexe 3 : Chantier de la Bourse de Moscou - Tableaux synthétiques des valeurs pressiométriques mesurées.

Annexe 4 : Chantier de Moscou – Log. pressiométriques.

Annexe 5 : Schéma d'enchaînement des missions géotechniques (Union syndicale géotechnique NF P 94 500).

Annexe 6: Classification des missions géotechniques types. (Extrait de la norme NF P 94 500).

Annexe 7: Exemple d'un cas réel : Construction de bâtiments agricoles à Potensac -

- Plan de situation.
- Schéma d'implantation des sondages
- Résultats des essais in situ (profils de résistance dynamique et profils pressiométriques)

Annexe 8: Détermination du facteur de portance k_p pour une fondation superficielle à partir d'essais pressiométriques (Abaque tirée du DTU 13.12 de mars 1988).

Annexe 9: Procédure de calcul des tassements pour une fondation superficielle à partir du module pressiométrique (DTU 13.12 de mars 1988).

Annexe 10: Construction de bâtiments agricoles à Potensac - Estimation des tassements absolus au droit des points de sondages pressiométriques (calculs réalisés à partir du logiciel CALPRESS DTU 13.12 de mars 1988).

Annexe 11: Construction de bâtiments agricoles à Potensac - Estimation de la contrainte apportée par le radier et la cuve de gasoil.

Annexe 12 : Accroissement de la contrainte verticale $\Delta\sigma_z$ sous le coin d'une fondation rectangulaire uniformément chargée par la contrainte q .

Annexe 13: Principe et interprétation des essais pressiométriques

Annexe 14 : Dimensionnement des fondations superficielles et profondes à partir des essais pressiométriques

Annexe 15 : Combinaisons de paramètres de forage les plus couramment utilisées

Annexe 16: Log. lithologiques et pressiométriques de 15 forages exécutés lors de la reconnaissance du tracé du TGV belge entre Walhorn et Welkenraedt.

Annexe 17 : Détermination de la valeur au bleu de méthylène (VBS)

Annexe 18 : Détermination de la granulométrie par tamisage et par sédimentométrie.

Annexe 19: Procès verbaux des essais de VBS et granulométrie établis pour les prises d'essais réalisées sur les tarières T1 à T4 (phase préliminaire de reconnaissance du site expérimental).

Annexe 20 : Log. diagraphiques et pressiométriques (données brutes) obtenus lors de la reconnaissance du site expérimental de l'IUT.

Annexe 21 : Coupes lithologiques établies pour les sondages carottés C1 et C2.

Annexe 22 : Procès verbaux des essais triaxiaux réalisés sur le site expérimental (IUT - Talence / Gradignan)

Annexe 23 : Estimation des modules E_i à la cote des essais pressiométriques pour l'ensemble des échantillons soumis aux essais triaxiaux - Site expérimental de l'IUT

Annexe 24 : Tableaux récapitulatifs des données diagraphiques et pressiométriques relatives au site expérimental de l'IUT avant et après élimination des valeurs suspectes.

Annexe 25 : Log. des probabilités lithologiques obtenus via le processus itératif décrit partie II - Chapitre II pour les forages du site de l'IUT pour deux formations (seuil de convergence de $2 \cdot 10^{-2}$).

Annexe 26: Tableau récapitulatif des équations de régression utilisées pour l'estimation des intervalles de valeurs pressiométriques (phase de reconnaissance 2.1).

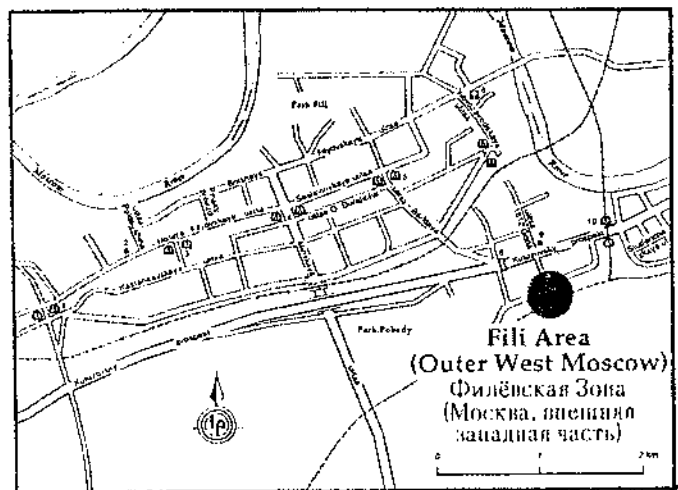
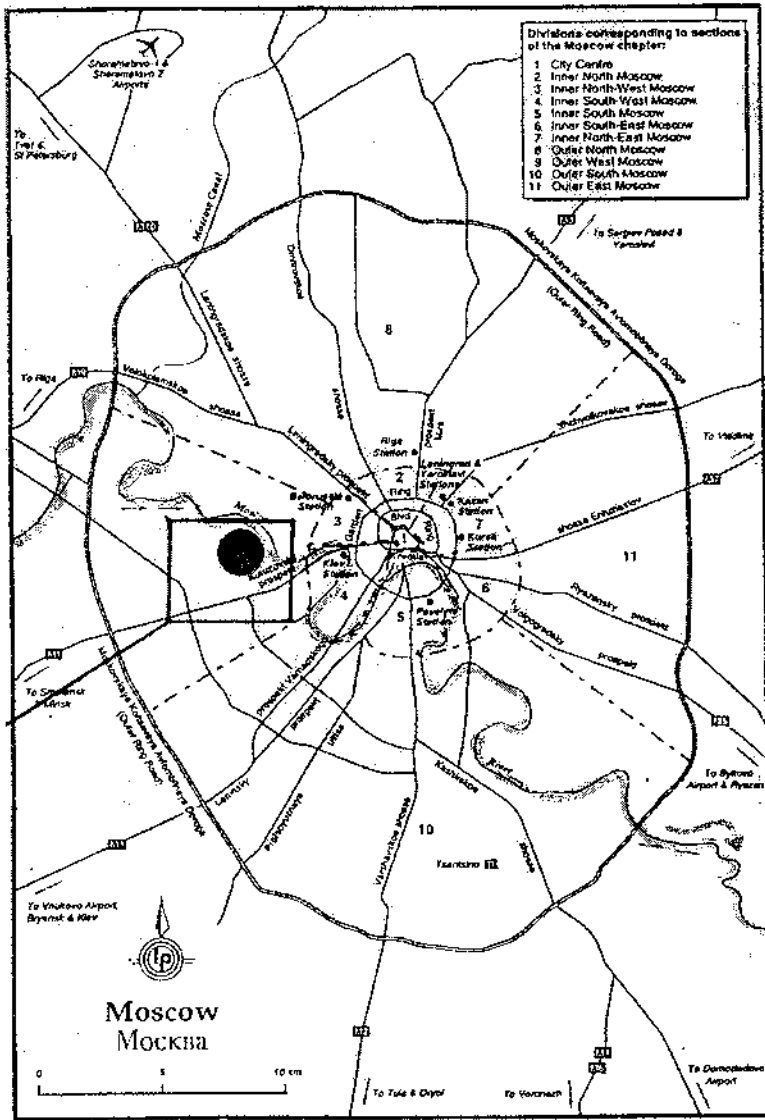
Annexe 27 : Chantier de Boulogne

- *Plan d'implantation des sondages,*
- *log. pressiométriques et diagraphiques issus du rapport d'étude géotechnique.*

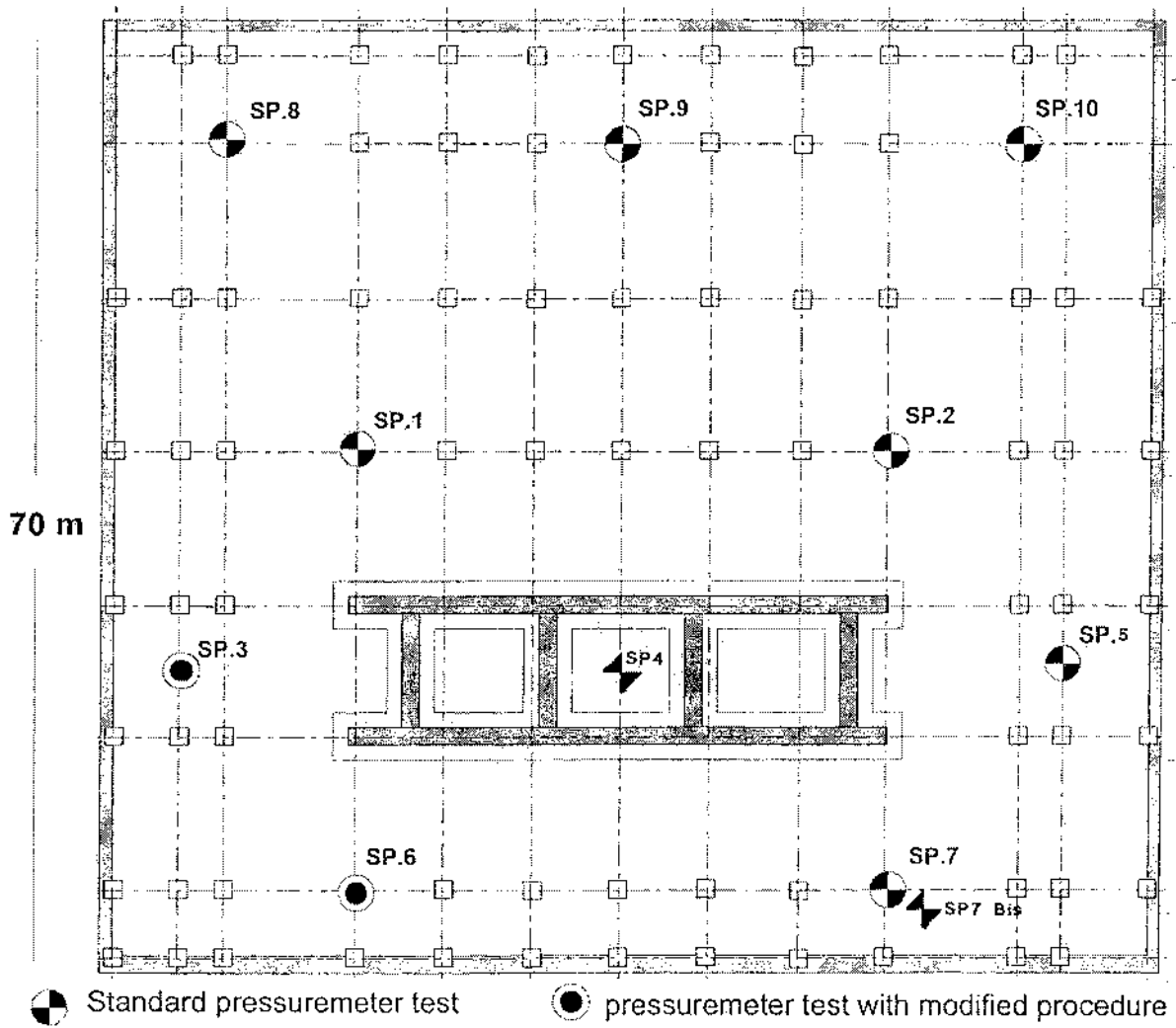
Annexe 28 : Chantier de Boulogne - Tableau des données pressiométriques et diagraphiques retenues pour l'étude.

Annexe 29 : Grille de classement des essais pressiométriques selon la typologie de la courbe pressiométrique : qualification de la qualité des résultats pressiométriques.

Annexe 1 : Chantier de la Bourse de Moscou - Plans de situation.



Annexe 2 : Chantier de la Bourse de Moscou - Schéma d'implantation des sondages.



Annexe 3 : Chantier de la Bourse de Moscou - Tableaux synthétiques des valeurs pressiométriques mesurées.

Sondage	z(m)	pf* (MPa)	pl* (MPa)	E (MPa)	Appréciation de la validité des essais (LCPC)	
SP1	1.0	0.14	0.24	2.30	++	
	2.0	0.40	0.68	8.00	++	
	3.0	0.90	1.55	18.70	++	
	4.0	0.90	1.42	13.80	++	
	5.0	1.00	1.59	16.00	++	
	6.0	0.57	0.82	4.60	+	
	7.0	0.53	0.73	3.30	+	
	8.0	0.50	1.00	8.00	++	
	9.5	1.10	1.84	11.00	++	
	11.0	0.90	1.55	8.30	+	
	12.5	0.10	0.20	0.50	?	
	14.0	1.00	1.68	15.00	++	
	15.5	1.30	2.21	16.30	++	
	17.0	1.10	1.85	11.40	++	
	18.5	1.30	2.23	11.70	++	
	20.0	1.40	2.30	8.20	?	
	26.0	> 4.60	> 8.00	161.00	++ (calcaire)	
	30.0	> 4.60	> 8.00	268.00	++ (calcaire)	
	SP2	9.5	0.87	1.45	16.30	++
		11.0	0.25	0.42	3.50	+
12.5		0.18	0.25	1.50	?	
14.0		0.21	0.35	1.60	+	
15.5		0.47	0.80	3.70	+	
17.0		0.50	0.86	4.00	+	
18.5		0.34	0.50	8.70	+	
20.0		0.67	1.14	13.90	+	
21.5		0.90	1.35	19.50	?	
23.0		1.15	1.74	46.00	?	
24.5		1.52	2.16	52.00	?	
28.0		> 4.20	> 7.80	110.00	++ (calcaire)	
31.0		> 4.20	> 7.14	104.00	++ (calcaire)	
36.5		> 2.60	> 4.46	101.00	++ marne	
SP4		2.0	?	0.32	1.50	?
	3.5	0.29	0.41	2.80	++	
	5.0	0.58	0.99	4.10	++	
	6.5	0.31	0.53	2.00	+	
	8.0	0.33	0.56	2.80	+	
	9.5	1.07	1.82	5.10	?	
	11.0	0.66	1.12	9.00	+	
	12.5	0.95	1.62	22.70	+	
	14.0	1.08	1.59	27.90	++	
	15.5	1.01	1.41	61.10	++	
	17.0	1.30	1.72	51.00	?	
	18.5	1.32	1.84	116.00	?	
	20.0	1.47	1.83	118.00	?	
	22.0	1.90	3.26	36.30	++	
	23.0	> 4.20	> 7.09	98.0	++ (calcaire)	
	27.0	> 4.20	> 7.12	82.0	++ (calcaire)	
	SP5	5.0	?	?	?	?
6.5		0.21	0.35	3.10	++	
8.0		0.73	1.24	12.90	++	
9.5		0.16	0.25	1.20	+	
11.0		0.12	0.21	1.20	++	
12.5		0.92	1.57	15.10	++	
14.0		1.92	3.26	32.10	++	
15.5		1.08	1.51	16.00	?	
17.0		1.10	1.39	170.00	?	
18.5		1.04	1.44	45.20	?	
20.0		1.10	1.41	75.10	?	
21.5		1.21	1.59	85.30	?	
23.0		1.42	2.08	94.00	?	
24.5		1.49	2.11	65.00	?	

Sondage	z(m)	pf* (MPa)	pl* (MPa)	E (MPa)	Appréciation de la validité des essais (LCPC)
SP7	3.0	0.71	1.21	9.30	++
	4.5	0.62	1.05	6.60	++
	6.0	?	0.35	1.50	?
	7.5	0.31	0.53	5.30	++
	9.0	0.59	0.88	9.80	+
	10.5	0.19	0.32	2.10	?
	12.0	0.44	0.75	3.20	?
	13.5	1.14	1.70	15.00	?
	15.0	0.88	1.20	19.90	?
	16.5	1.06	1.38	44.60	?
	18.0	1.24	1.60	171.30	?
	19.5	1.50	2.55	86.00	?
	21.0	1.29	1.75	73.00	?
	22.5	1.73	2.11	136.00	?
	SP8	1.5	0.19	0.32	1.30
3.0		0.76	1.00	9.90	++
4.5		0.82	1.39	10.80	++
6.0		0.26	0.44	2.30	+
7.5		0.57	0.96	4.30	++
9.0		0.20	0.34	1.90	+
10.5		0.76	1.34	3.30	+
12.0		2.05	3.48	80.50	?
13.5		0.93	1.59	14.10	++
15.0		1.59	2.70	14.20	+
16.5		1.26	2.14	12.00	++
18.0		1.31	2.54	20.75	++
19.5		1.22	2.08	12.50	+
21.0		1.02	1.67	19.40	?
SP9		5.0	0.49	0.84	12.00
	6.5	0.89	1.52	25.00	++
	8.0	0.34	0.58	2.00	+
	9.5	0.34	0.46	2.47	+
	11.0	0.88	1.50	4.48	+
	12.5	?	0.17	0.80	?
	14.0	0.15	0.25	2.10	+
	15.5	0.42	0.72	7.00	++
	17.0	0.88	1.49	12.60	+
	18.5	0.66	1.13	32.00	++
SP10	20.0	0.28	0.5	5.10	++
	21.5	0.74	1.25	12.20	++
	23.0	0.77	1.31	10.30	+
	24.5	> 1.91	> 3.25	39.40	++
	8.0	1.08	1.81	23.40	++
	9.5	1.17	1.99	20.30	++
	11.0	0.81	1.37	9.90	++
	12.5	0.08	0.13	2.00	++
	14.0	0.38	0.66	4.70	+
	15.5	0.13	0.22	2.40	++
	17.0	0.17	0.28	2.20	++
	18.5	1.11	1.88	11.40	+
20.0	1.38	2.31	10.80	+	
21.5	0.87	1.48	12.60	++	
23.0	1.19	2.02	38.90	+	
24.5	0.60	1.03	9.90	++	
26.0	1.60	2.72	20.30	++	

Annexe 4 : Chantier de Moscou – Log. pressiométriques.

Chantier : EXCHANGE BUILDING

Localisation

Date : 04/09/97

Client : CODEST

- X :

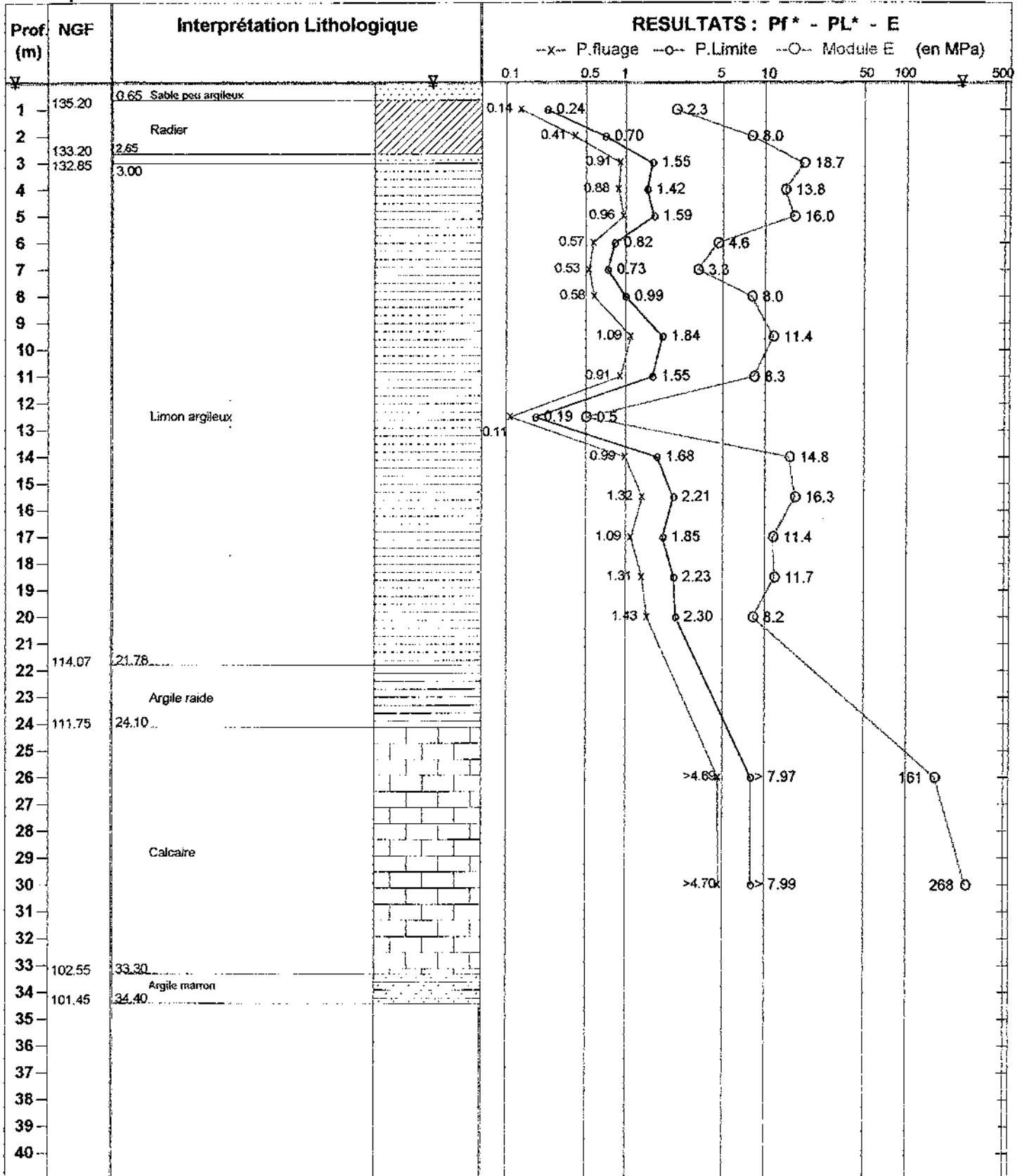
Dossier : D97/148

- Y :

- Z : 135.85

Echelle prof. : /

Nappe : eau à 0.05 m.



OUTILS DE FORAGE

Tricone Ø 67 + Injection Visco M	24.10 m
Roto percussion Ø 67 + Injection Visco M	34.40 m

TUBAGES

Tubage Ø 96	15.00 m
-------------	---------

DATES D'EXECUTION

04/09/97	24.10 m
07/09/97	38.17 m

Chantier : STOCK EXCHANGE BUILDING

Localisation

Date : 06/09/97

Client : CODEST

- X :

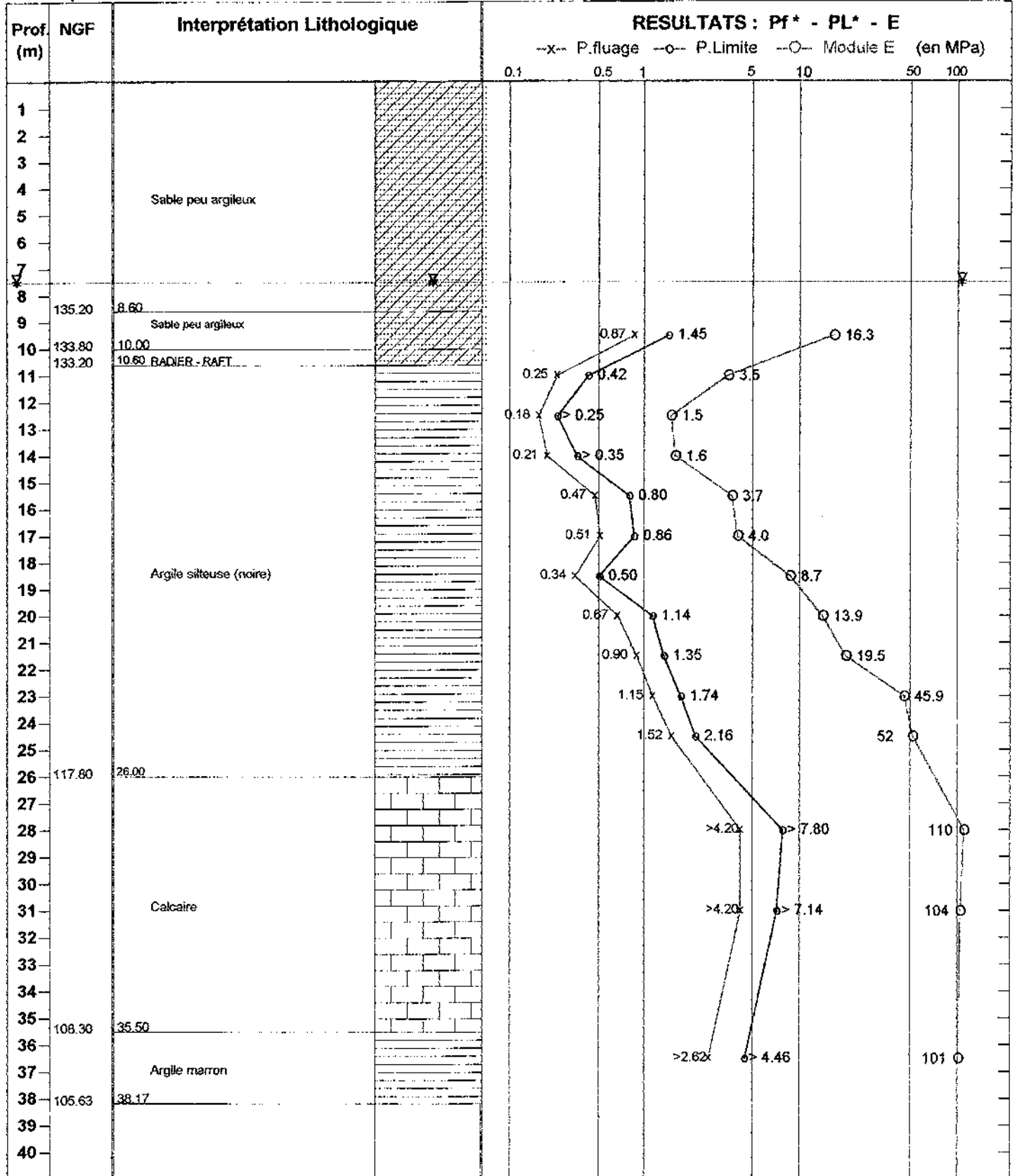
Dossier : D97/148

- Y :

- Z : 143.8

Echelle prof. : /

Nappe : eau à 7.50 m.



OUTILS DE FORAGE

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

Tricone Ø 63	35.50 m
Roto percussion Ø 67	38.17 m

Tubage Ø 96	10.00 m
-------------	---------

06/09/97	20.00 m
07/09/97	38.17 m

Chantier : EXCHANGE BUILDING

Localisation

Date : 08/09/97

Client : CODEST

- X :

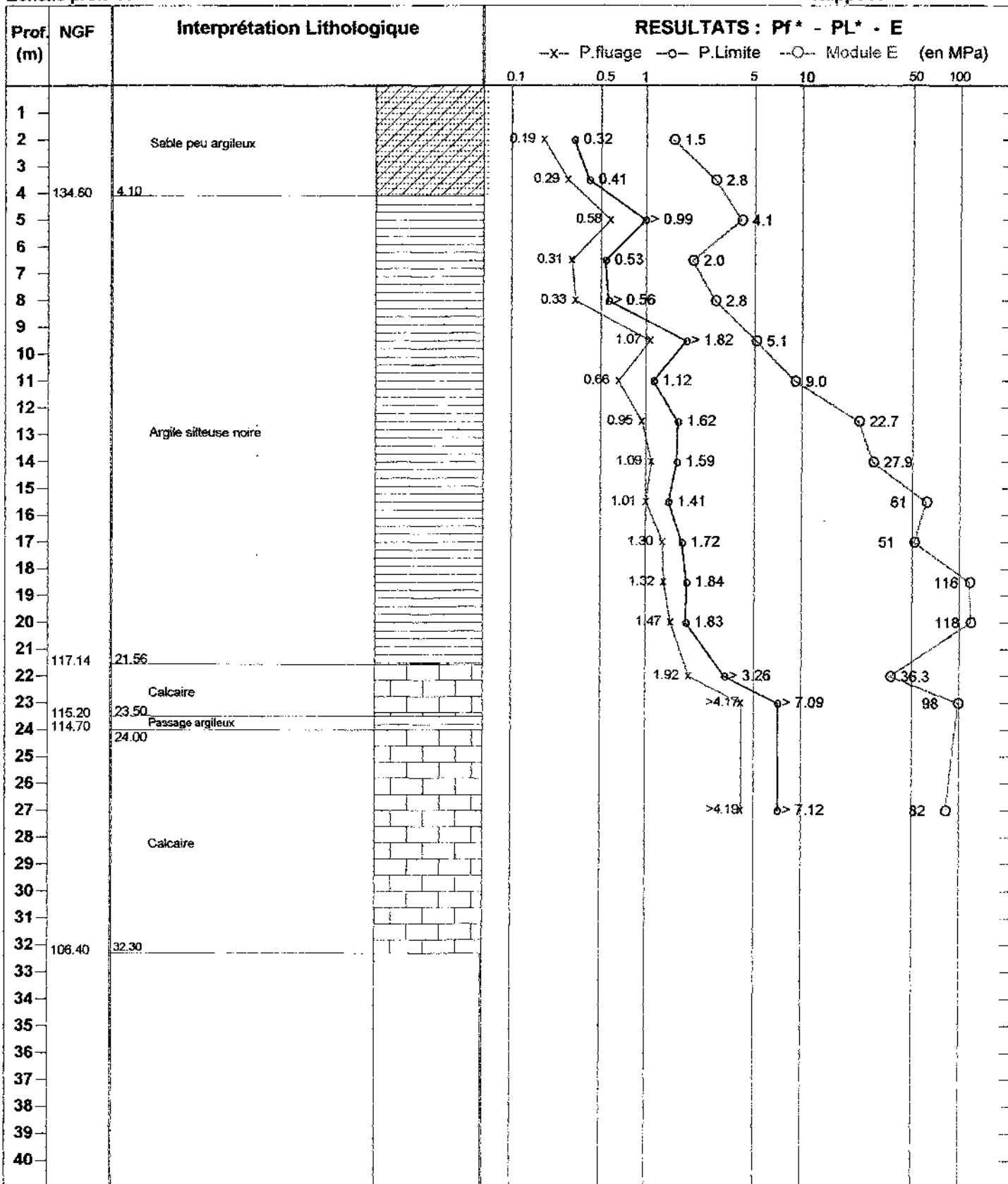
Dossier : D97/148

- Y :

- Z : 138.70

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Tricone Ø 63	21.56 m
Roto percussion Ø 67	32.30 m

TUBAGES

Tubage Ø 96	04.10 m

DATES D'EXECUTION

08/09/97	22.00 m
08/09/97	32.30 m

Chantier : STOCK EXCHANGE BUILDING

Localisation

Date : 10/09/97

Client : CODEST

- X :

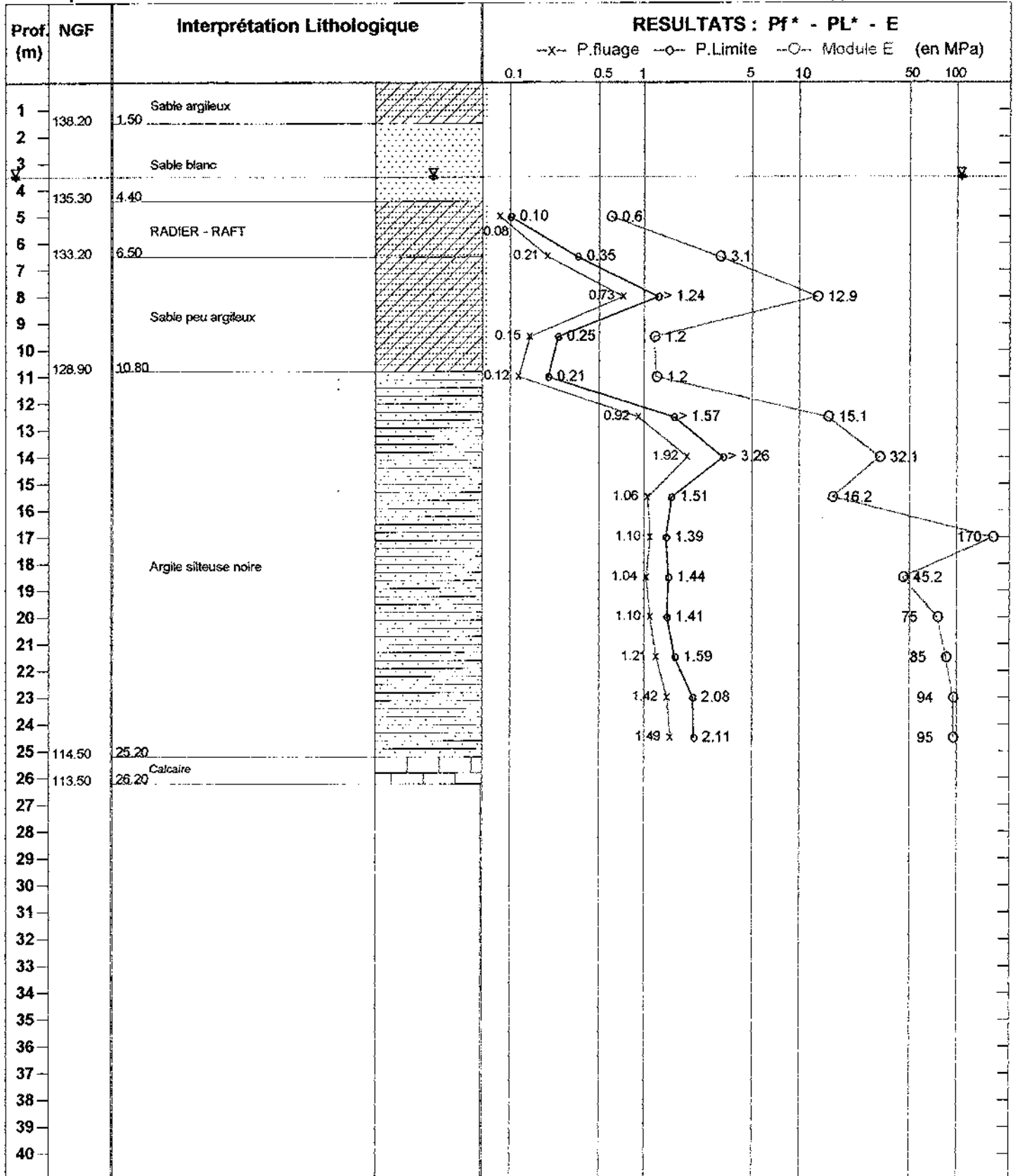
- Y :

Dossier : D97/148

- Z : 139.7

Echelle prof. : /

Nappe : eau à 3.50 m.



OUTILS DE FORAGE

Tricone Ø 67 + Injection Visco - M	26.20 m

TUBAGES

Tubage Ø 96	11.00 m

DATES D'EXECUTION

10/09/97	26.20 m

Chantier : STOCK EXCHANGE BUILDING

Localisation

Date : 10/09/97

Client : CODEST

-X :

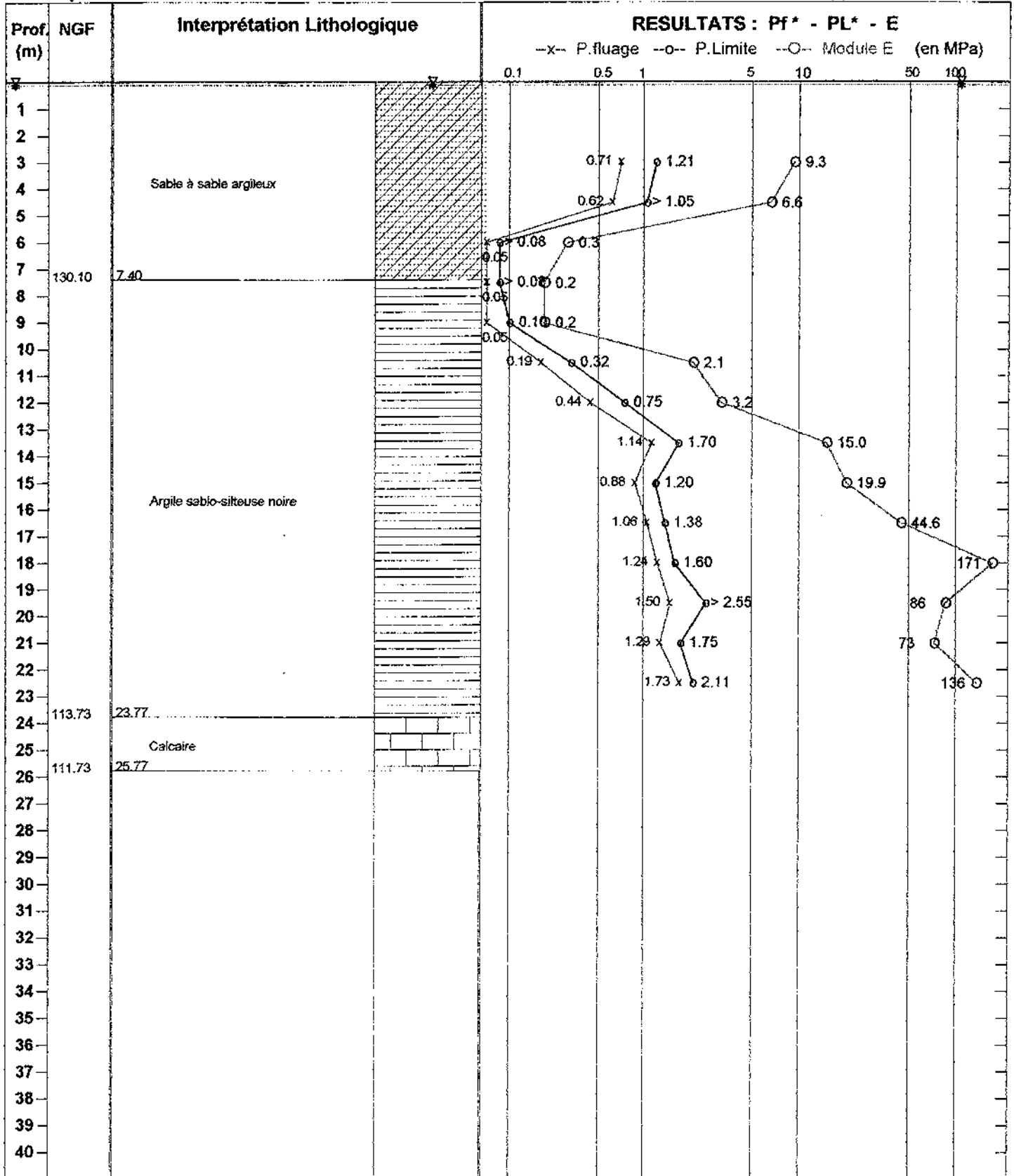
Dossier : D97/148

-Y :

-Z : 137.5

Echelle prof. : /

Nappe : eau à 0.1 m.



OUTILS DE FORAGE

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

10/09/97	00.00 m

Chantier : EXCHANGE BUILDING

Localisation

Date : 06/09/97

Client : CODEST

- X :

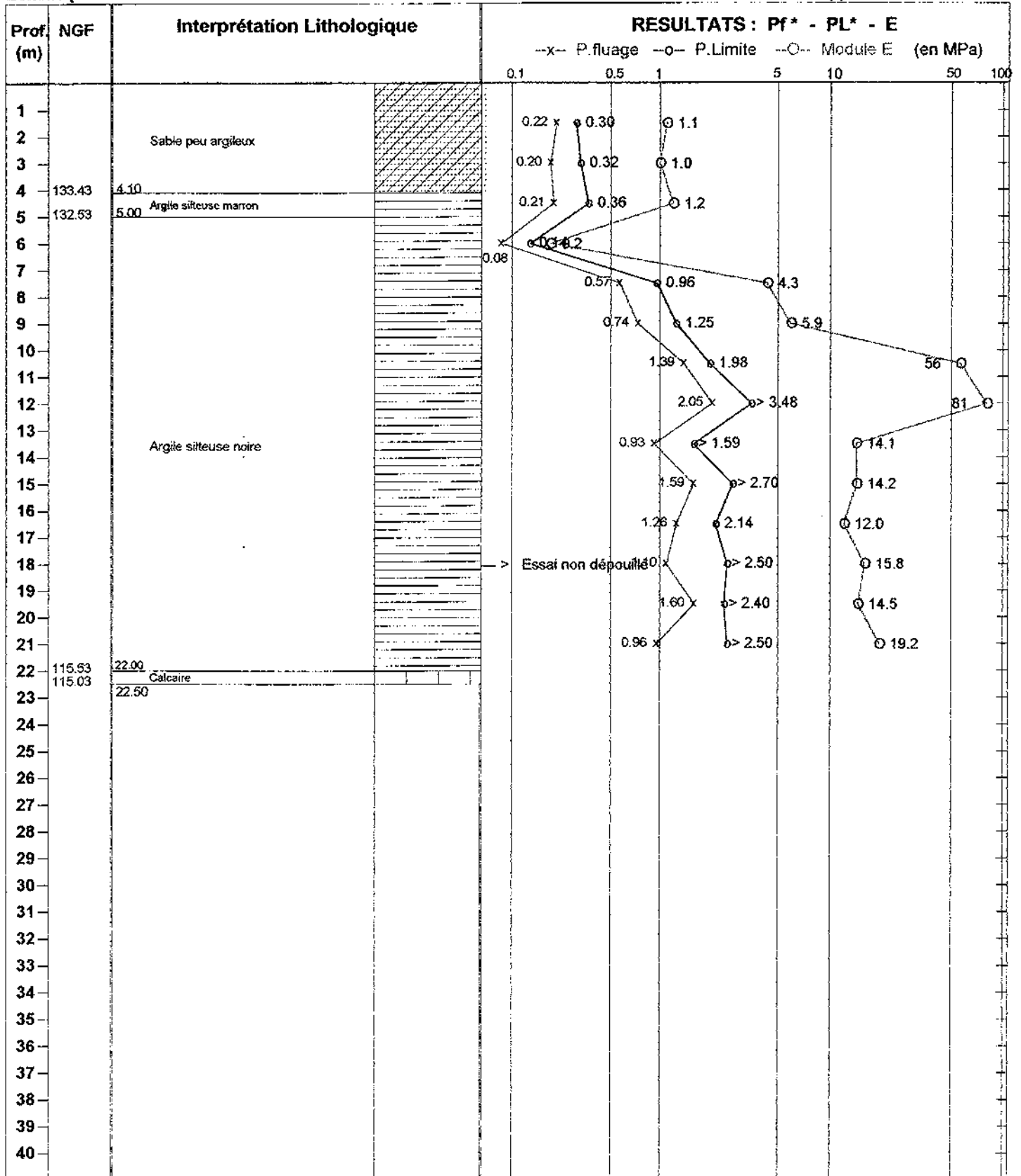
Dossier : D97/148

- Y :

- Z : 137.53

Echelle prof. : /

Nappe : /



OÙTILS DE FORAGE

Tricone Ø 63	22.50 m

TUBAGES

Tubage Ø 96	04,10 m

DATES D'EXECUTION

06/09/97	10.00 m
06/09/97	22.50 m

Chantier : STOCK EXCHANGE BUILDING

Localisation

Date : 09/09/97

Client : CODEST

- X :

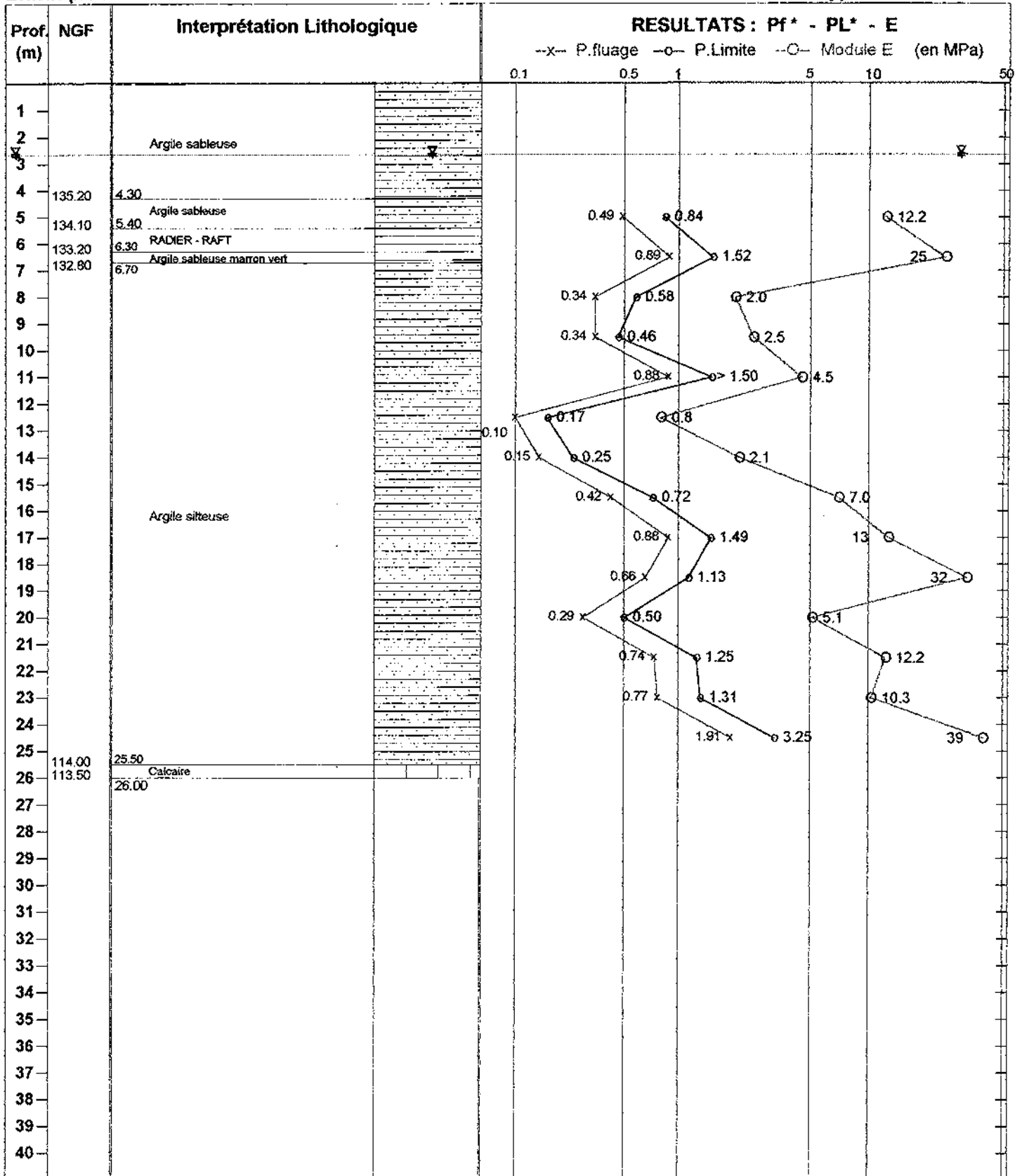
Dossier : D97/148

- Y :

- Z : 139.5

Echelle prof. : /

Nappe : eau à 2.65 m.



OUTILS DE FORAGE

Tricone Ø 67 + Injection Visco - M	25.87 m

TUBAGES

Tubage Ø 97	11.00 m

DATES D'EXECUTION

10/09/97	25.00 m

Chantier : STOCK EXCHANGE BUILDING

Localisation

Date : 11/09/97

Client : CODEST

- X :

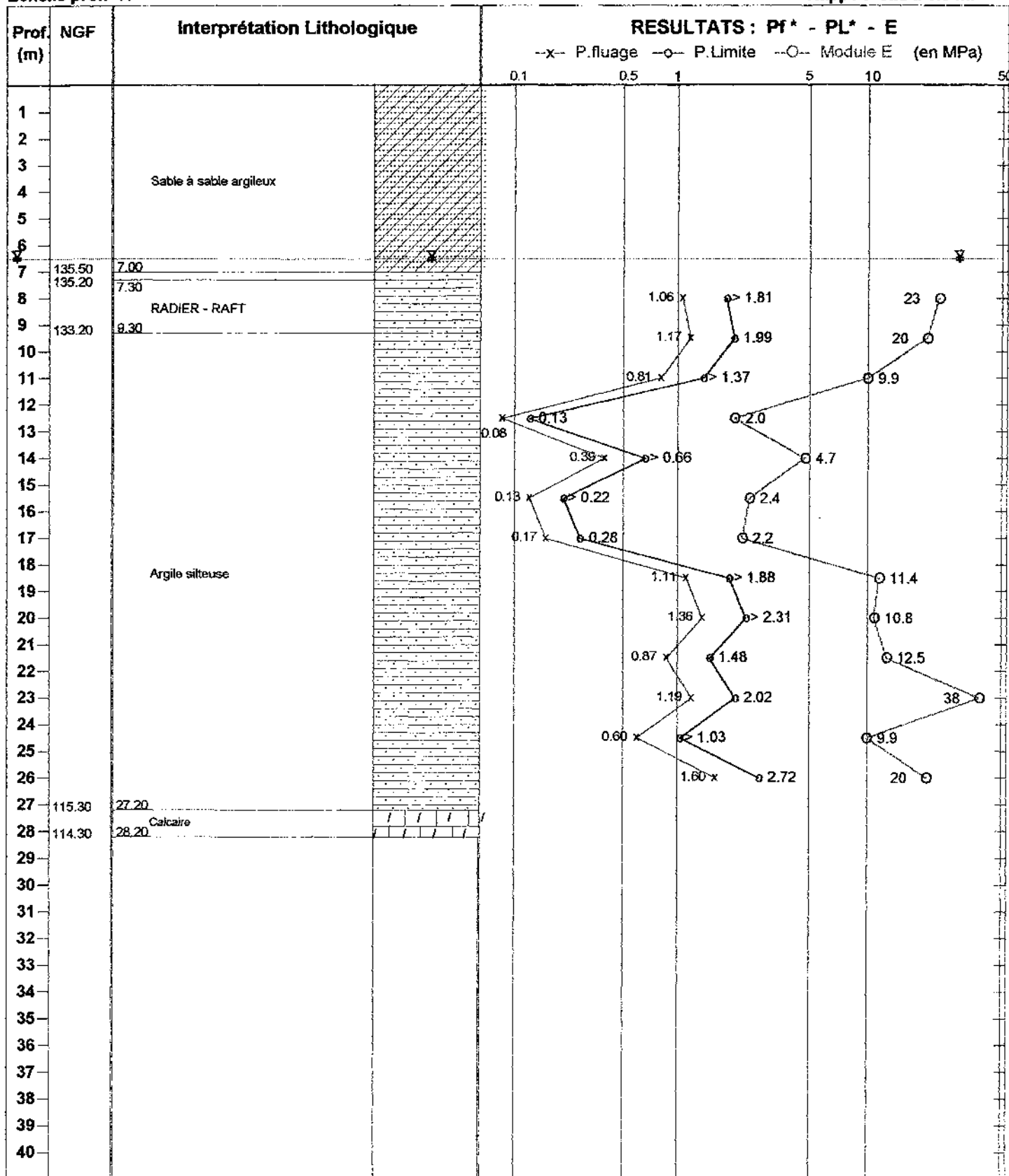
Dossier : D97/148

- Y :

- Z : 142.5

Echelle prof. : /

Nappe : eau à 6.5 m.



OUTILS DE FORAGE

Tricone Ø 67 + Injection Visco - M	27.20 m

TUBAGES

Tubage Ø 97	16.00 m

DATES D'EXECUTION

11/09/97	27.20 m

Annexe 5 : Schéma d'enchaînement des missions géotechniques (Union syndicale géotechnique NF P 94 500).

Etapes de réalisation de l'ouvrage	MISSIONS GEOTECHNIQUES					
		Etude ou suivi des ouvrages géotechniques		Exécution de sondages, essais et mesures géotechniques		Diagnostic géotechnique
Etudes préliminaires	G 1	G 11 Etude préliminaire de faisabilité géotechnique	G 0	G 0 si nécessaire (à définir par le géotechnicien)	G 5	G 51
		G 12 Etude de faisabilité géotechnique		G 0 indispensable		G 51
Avant projet		G 13 Etude de pré-dimensionnement géotechnique				
Projet Assistance Contrat Travaux	G 2	Etude de projet géotechnique Phase 1	G 0	G 0 spécifique si nécessaire (à définir par le géotechnicien)	G 5	G 51
		Phase 2				
Exécution	G 3	Etude géotechnique d'exécution				G 51
	G 4	Suivi géotechnique d'exécution		Si nécessaire (à définir par le géotechnicien)		G 52
OUVRAGE EXISTANT				G 0 si nécessaire (à définir par le géotechnicien)		G 51 : sans sinistre
				G 0 spécifique indispensable		G 52 : avec sinistre

Annexe 6 : Classification des missions géotechniques types. (Extrait de la norme NF P 94 500).

L'enchaînement des missions géotechniques suit les phases d'élaboration du projet. Les missions G1, G2, G3 et G4 doivent être réalisées successivement.

Une mission géotechnique ne peut contenir qu'une partie d'une mission type, mais seulement après accord explicite entre le client et le géotechnicien.

G0 : EXECUTION DES SONDAGES, ESSAIS ET MESURES GEOTECHNIQUES

- Exécuter les sondages, essais et mesures en place ou en laboratoire selon un programme défini dans les missions de type G1 à G5.
- Fournir un compte rendu factuel donnant la coupe des sondages, les procès verbaux d'essais et les résultats des mesures.

Cette mission d'exécution exclut toute activité d'étude ou conseil ainsi que toute forme d'interprétation.

G1 : ETUDE DE FAISABILITE GEOTECHNIQUE

Ces missions G1 excluent toute approche des quantités, délais et coûts d'exécution des ouvrages qui entre dans le cadre exclusif d'une mission d'étude de projet G2.

G11 : Etude préliminaire de faisabilité géotechnique

- Faire une enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site et préciser les avoisinants.
- Définir si nécessaire une mission G0 préliminaire, en assurer le suivi et l'exploitation des résultats.
- Fournir un rapport d'étude préliminaire de faisabilité géotechnique avec certains principes généraux d'adaptation de l'ouvrage au terrain, mais sans aucun élément de pré-dimensionnement.

Cette mission G11 doit être suivie d'une mission G12 pour définir les hypothèses géotechniques nécessaires à l'établissement du projet.

G12 : Etude de faisabilité des ouvrages géotechniques (après une mission G11)

Phase 1 :

- Définir une mission G0 détaillée, en assurer le suivi et l'exploitation des résultats.
- Fournir un rapport d'étude géotechnique donnant les hypothèses de calcul géotechniques à prendre en compte pour la justification du projet, et les principes généraux de construction des ouvrages géotechniques (notamment terrassements, soutènements, fondations, risques de déformations des terrains, dispositions générales vis-à-vis des nappes et avoisinants).

Phase 2 :

- Présenter des exemples de pré-dimensionnement de quelques ouvrages géotechniques types envisagés (notamment soutènements, fondations, amélioration de sols).

Cette étude sera reprise et détaillée lors ors de l'étude de projet géotechnique (mission G2).

G2 : ETUDE DE PROJET GEOTECHNIQUE

Cette étude spécifique doit être prévue et intégrée dans le cadre de la mission de maîtrise d'œuvre. Elle comporte deux phases :

Phase 1 :

- Définir une mission G0 spécifique, en assurer le suivi et l'exploitation des résultats.
- Fournir les notes techniques donnant les méthodes d'exécution retenues pour les ouvrages géotechniques (terrassements, soutènement, fondations, dispositions générales vis-à-vis des nappes et avoisinants), avec certaines notes de calculs de dimensionnement, une approche des quantités, délais et coûts d'exécution de ces ouvrages géotechniques.

Phase 2 :

- Etablir les documents nécessaires à la consultation des entreprises pour l'exécution des ouvrages géotechniques (plans, notices techniques, cadre de bordereau des prix, estimatif, planning prévisionnel)
- Assister le client pour la sélection des entreprises et l'analyse technique des offres.

G3 : ETUDE DE PROJET GEOTECHNIQUE

- Définir si nécessaire une mission G0 complémentaire, en assurer le suivi et l'exploitation des résultats.
- Etudier dans le détail les ouvrages géotechniques : notamment validation des hypothèses géotechniques, définition et dimensionnement (calculs justificatifs), méthodes et conditions d'exécution.

Pour la maîtrise des incertitudes et aléas géotechniques en cours d'exécution, les missions G2 et G3 doivent être suivies d'une mission de suivi géotechnique d'exécution G4.

G4 : SUIVI GEOTECHNIQUE D'EXECUTION

- Suivre et adapter si nécessaire l'exécution des ouvrages géotechniques, avec définition d'un programme d'auscultation et des valeurs seuil correspondantes, analyse et synthèse périodique des résultats et mesures.
- Définir si nécessaire une mission G0 complémentaire, en assurer le suivi et l'exploitation des résultats.

- Participer à l'établissement du dossier en fin de travaux et des recommandations de maintenance des ouvrages géotechniques.

G5 : DIAGNOSTIC GEOTECHNIQUE

L'objet d'une mission G5 est strictement limitatif : il ne porte pas sur la totalité du projet ou de l'ouvrage.

G51 : Avant, pendant ou après construction d'un ouvrage sans sinistre

- Définir si nécessaire une mission G0 spécifique, en assurer le suivi et l'exploitation des résultats.
- Etudier de façon approfondie un élément géotechnique spécifique (notamment soutènement, rabattement) sur la base des données géotechniques fournies par une mission G12, G2, G3 ou G4, et validées dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans les autres domaines géotechniques de l'ouvrage.

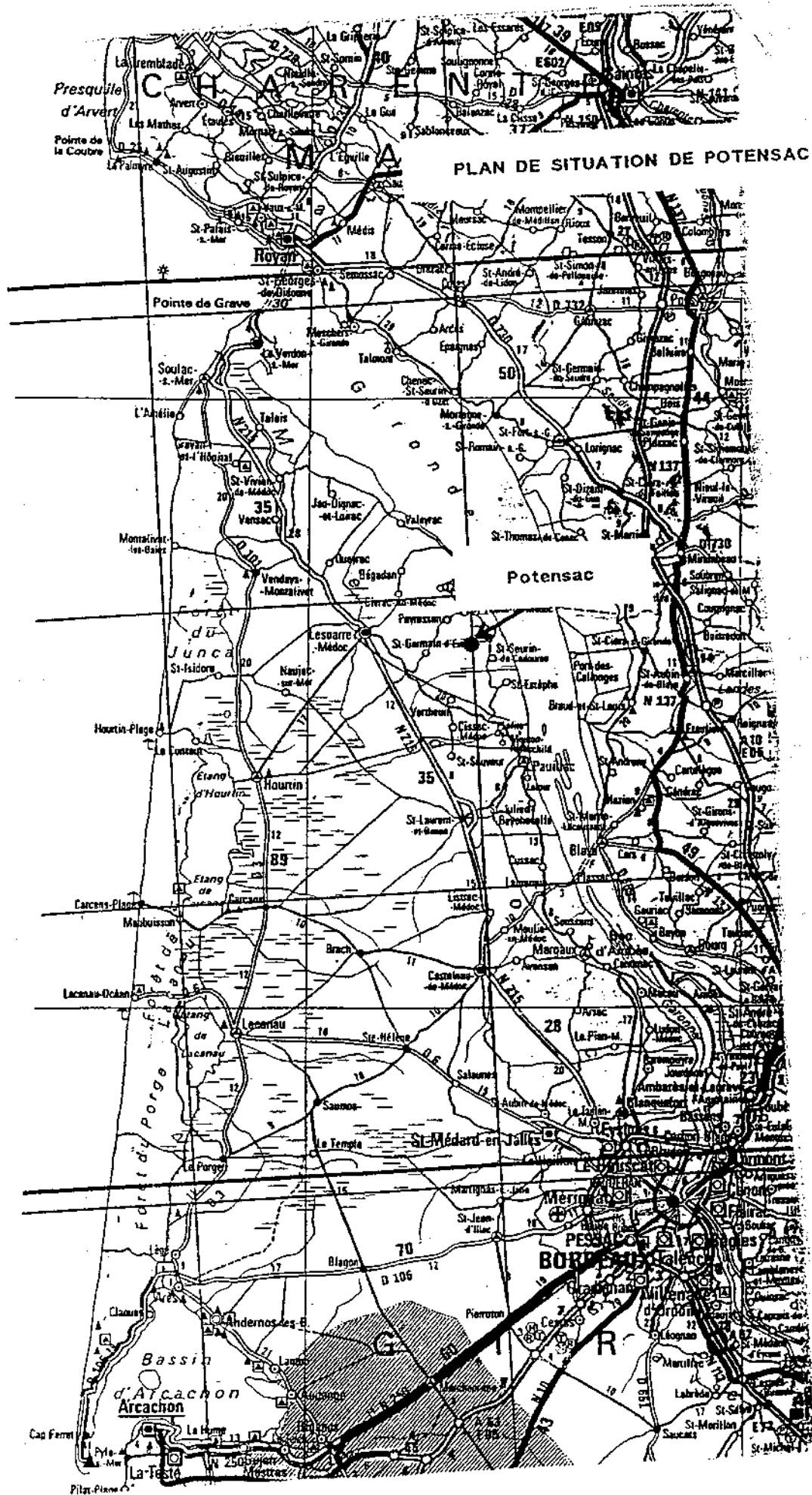
G5 : Sur un ouvrage avec sinistre

- Définir une mission G0 spécifique, en assurer le suivi et l'exploitation des résultats.
- Rechercher les causes géotechniques du sinistre constaté, donner une première approche des remèdes envisageables.

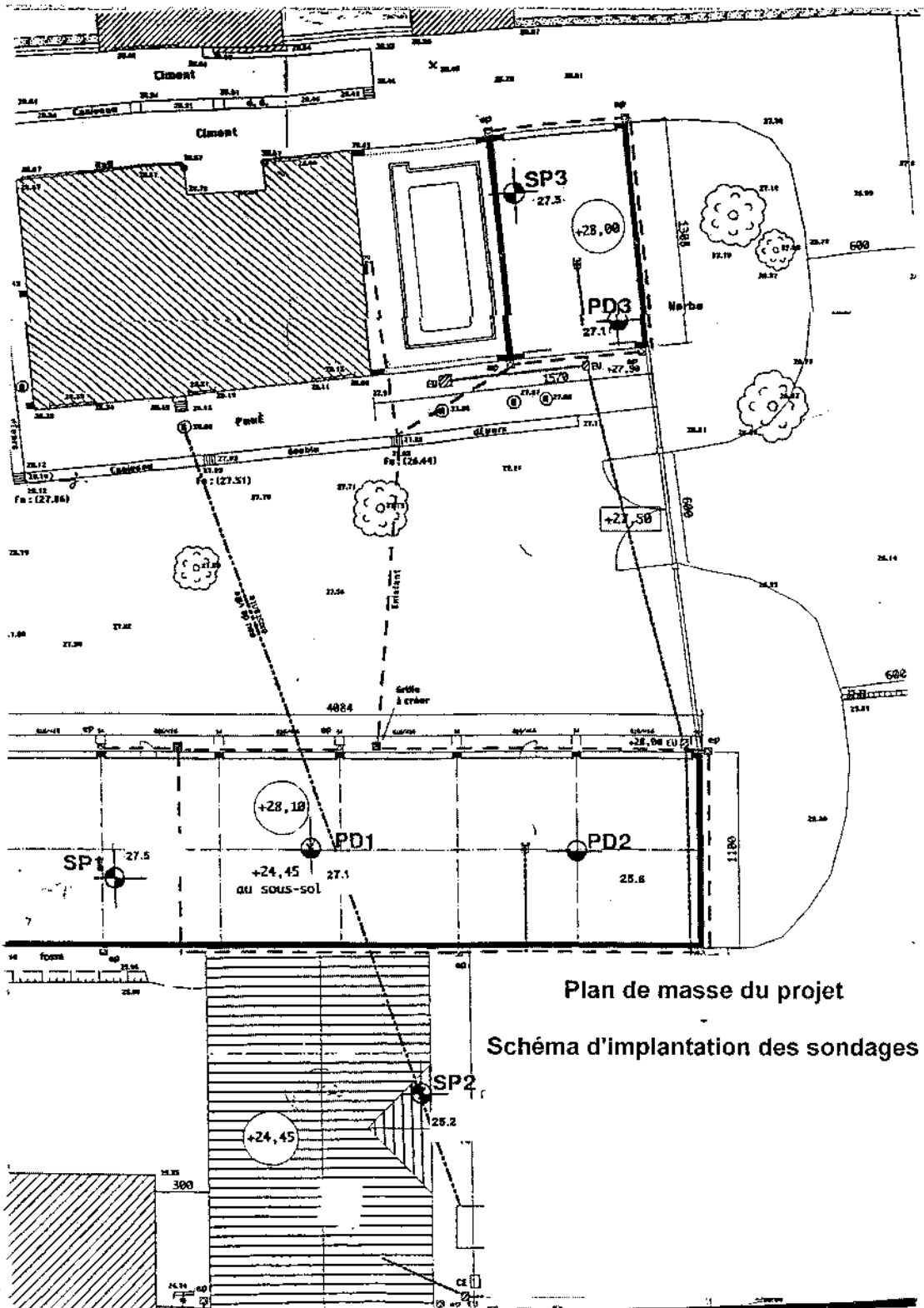
Une étude de projet géotechnique G2 doit être réalisée ultérieurement.

*Annexe 7 : Exemple d'un cas réel : Construction de bâtiments agricoles à Potensac -
Données initiales*

- *Plan de situation.*
- *Schéma d'implantation des sondages*
- *Résultats des essais in situ (profils de résistance dynamique et profils pressiométriques)*



Construction de bâtiments agricoles à Potensac - Schéma d'implantation des sondages



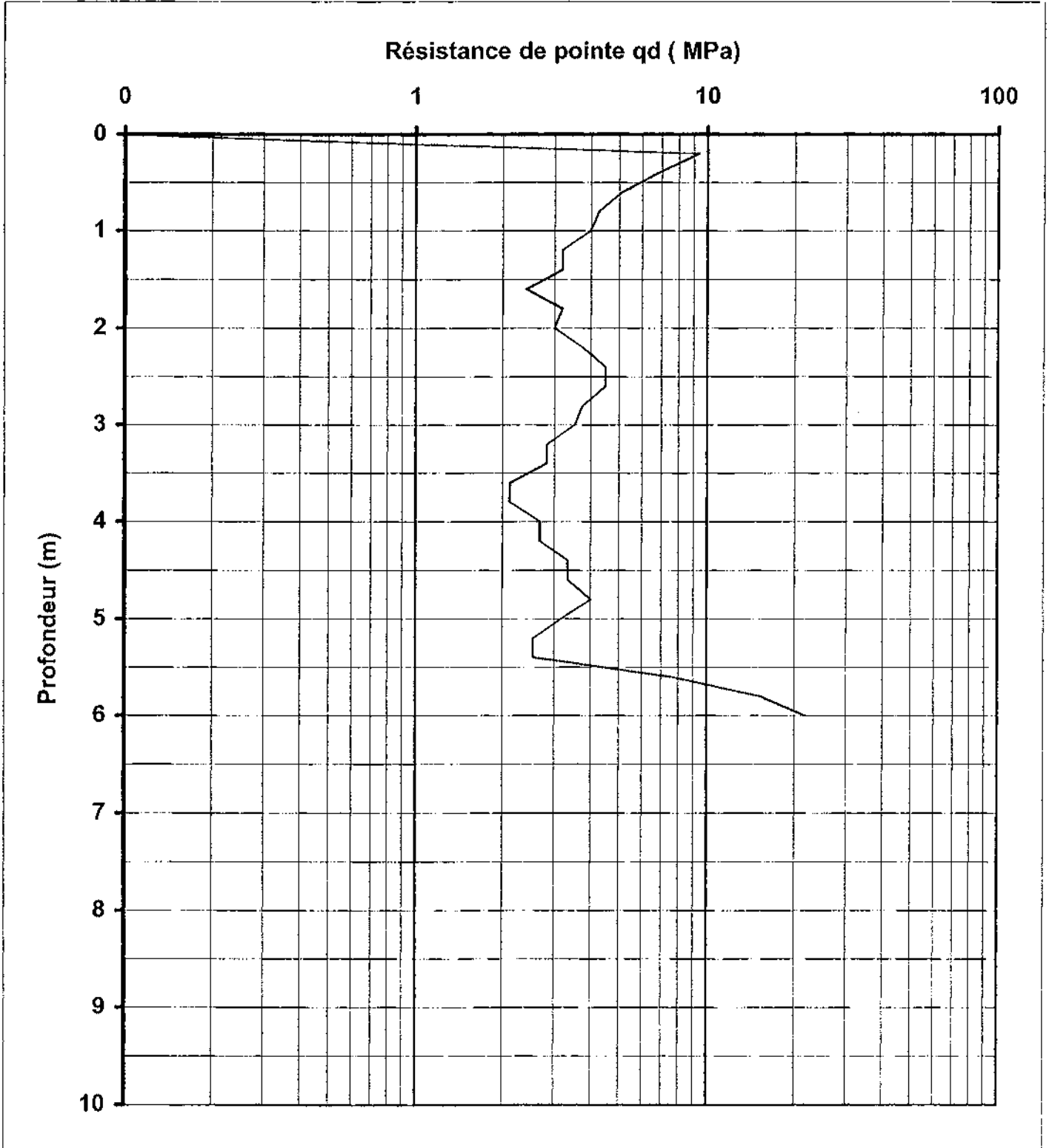
Plan de masse du projet

Schéma d'implantation des sondages

Construction de bâtiments agricoles à Potensac - Résultats des essais in situ (profils de résistance dynamique et profils pressiométriques).

ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE

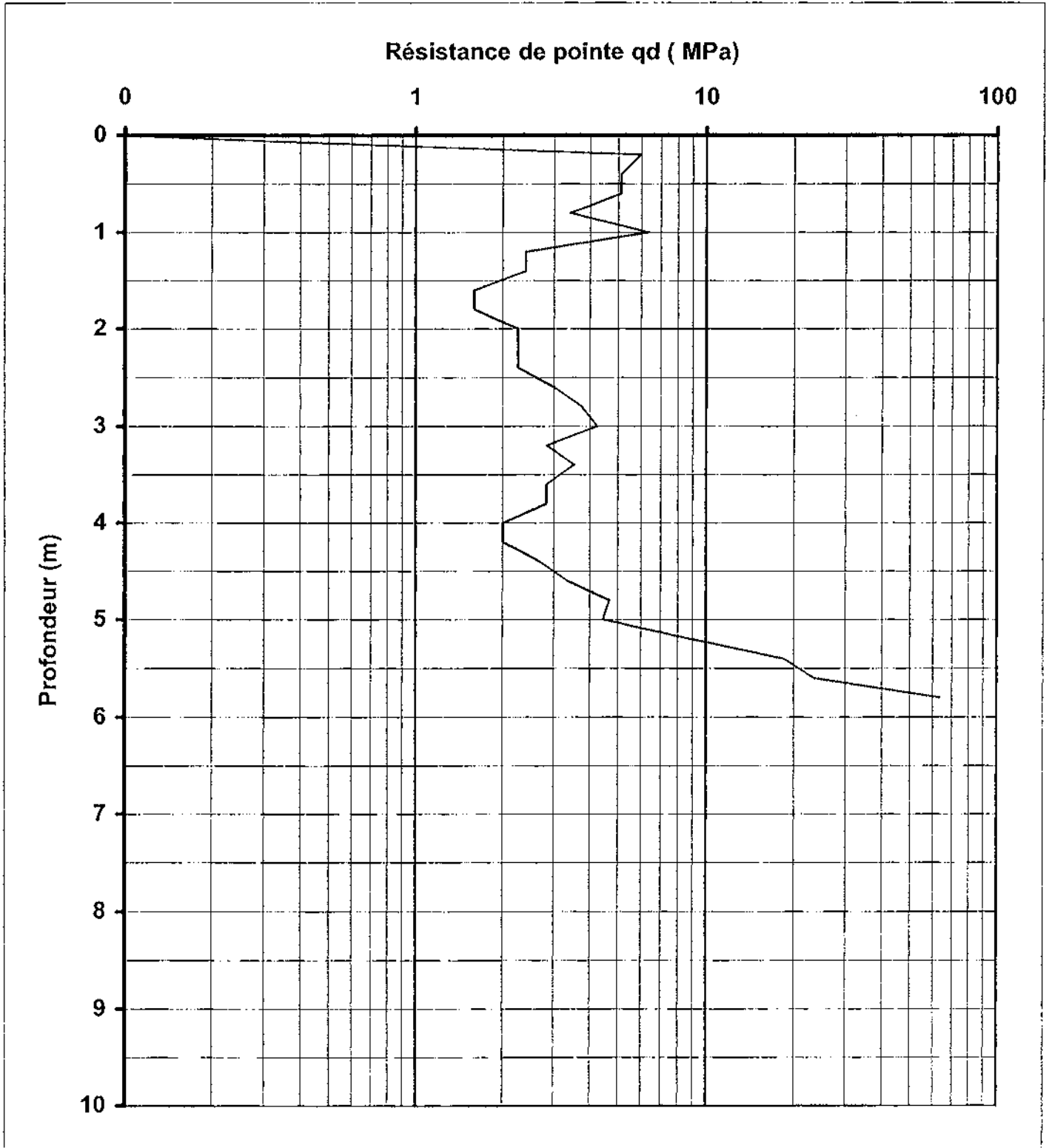
ALIOS Ingénierie 1, rue de la gravette 33320 EYSINES Tel. 05-56-28-10-07 Fax. 05-56-28-07-69	CHANTIER Extension garages POTENSAC (33) Dossier : D01/B039 Client : XXXXX Cote NGF : 27.1 Nappe : Non mesurée	ESSAI PD1 DATE 18/06/2001
---	--	--



Poids du mouton (kg) 63.5 hauteur de chute (m) 0.75 poids mort (kg) 21 hauteur initiale (m) 1 poids d'une tige (kg) 6.2	<u>Observations:</u>
---	--

ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE

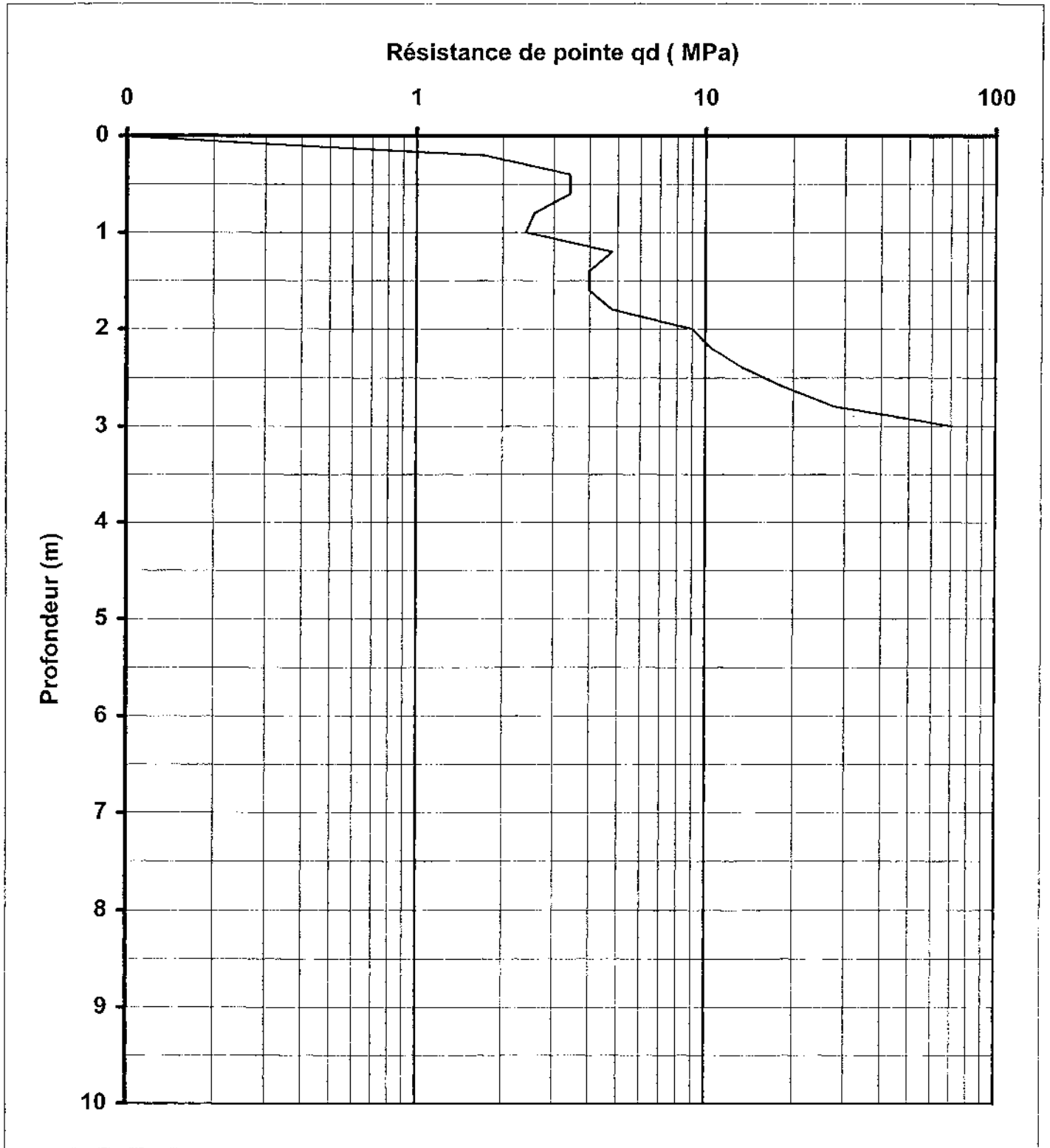
ALIOS Ingénierie 1, rue de la gravette 33320 EYSINES Tel. 05-56-28-10-07 Fax. 05-56-28-07-69	CHANTIER Extension garages POTENSAC (33) Dossier : D01/B039 Client : XXXXX Cote NGF : 25.6 Nappe : Non mesurée	ESSAI PD2 DATE 21/06/2001
---	--	---



Poids du mouton (kg) 63.5 hauteur de chute (m) 0.75 poids mort (kg) 21 hauteur initiale (m) 1 poids d'une tige (kg) 6.2	Observations:
---	---------------

ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE

ALIOS Ingénierie 1, rue de la gravette 33320 EYSINES Tel. 05-56-28-10-07 Fax. 05-56-28-07-69	CHANTIER Extension garages POTENSAC (33) Dossier : D01/B039 Client : XXXXX Cote NGF : 27.1 Nappe : Non mesurée	ESSAI PD3 DATE 21/06/2001
---	---	---



Poids du mouton (kg) 63.5 hauteur de chute (m) 0.75 poids mort (kg) 21 hauteur initiale (m) 1 poids d'une tige (kg) 6.2	Observations:
--	---------------

Chantier : Extension de garages

Localisation

Date : 15/06/01

Client : SCI Château LEOVILLE LAS CASES

- X :

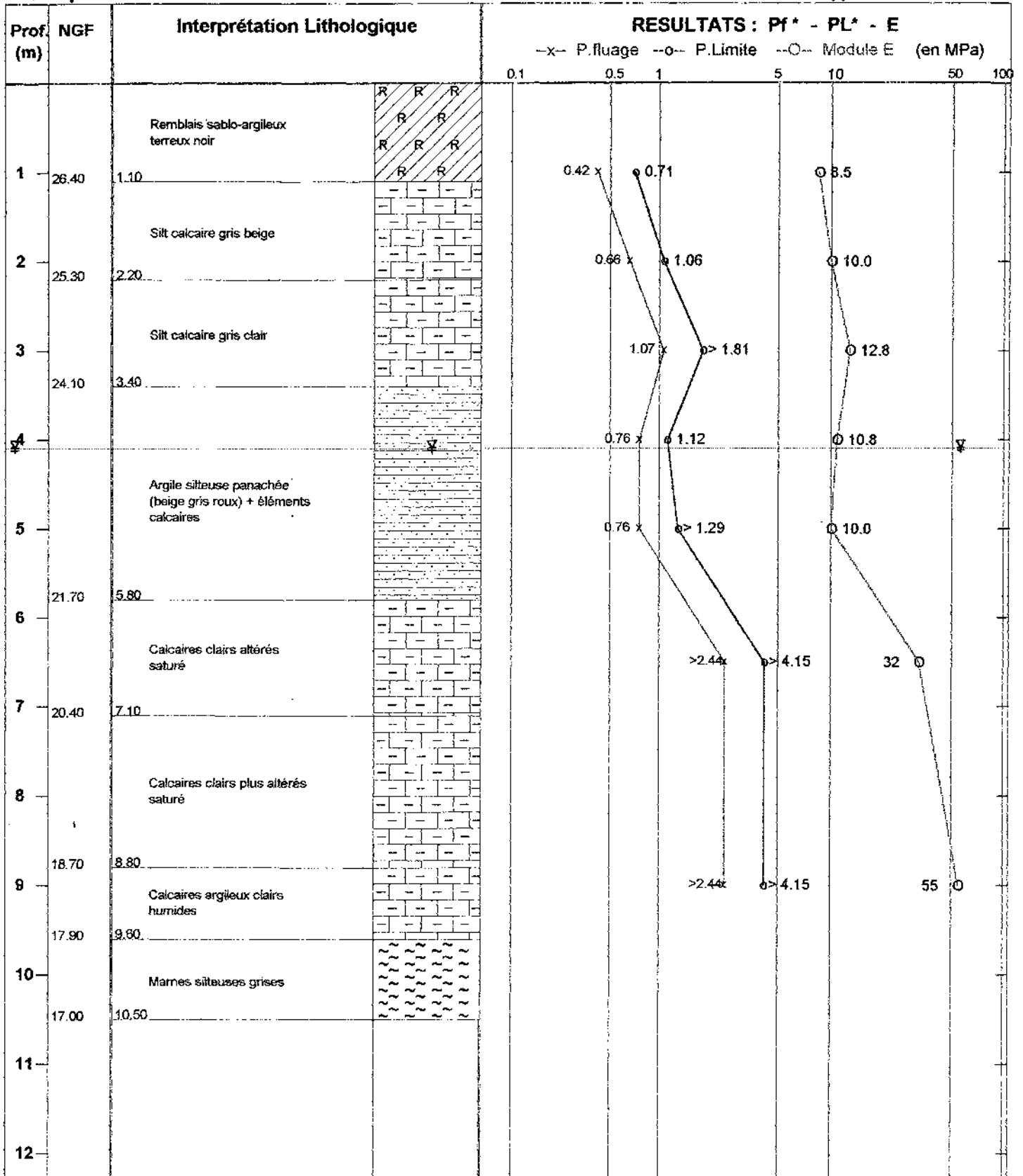
- Y :

- Z : 27.5

Dossier : D01/B039

Echelle prof. : 1

Nappe : eau à 4.10 m.



OUTILS DE FORAGE

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

15/06/01	10.50 m

OBSERVATIONS : nappe à 3.00 le 25/06/01

Logiciel ESPRESS pour WINDOWS - Version 5.2

Chantier : Extension de garages

Localisation

Date : 18/06/01

Client : SCI Château LEOVILLE LAS CASES

- X :

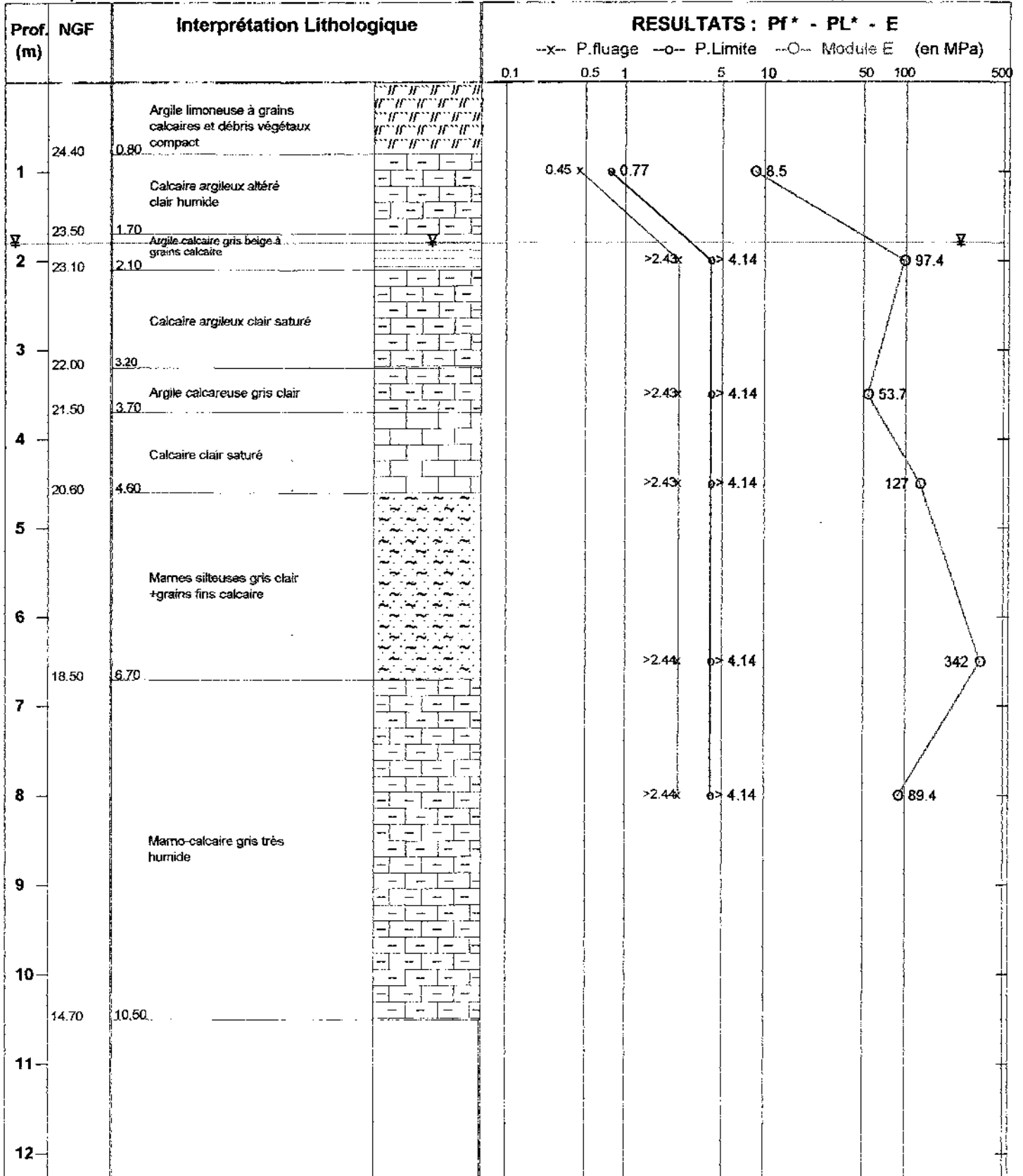
- Y :

- Z : 25.2

Dossier : D01/B039

Echelle prof. : /

Nappe : eau à 1.80 m.



OUTILS DE FORAGE

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

18/06/01	10.50 m

OBSERVATIONS : nappe à - 1.40 m le 25/06/01

Logiciel ESPRESS pour WINDOWS - Version 5.2

Chantier : Extension de garages

Localisation

Date : 18/06/01

Client : SCI Château LEOVILLE LAS CASES

- X :

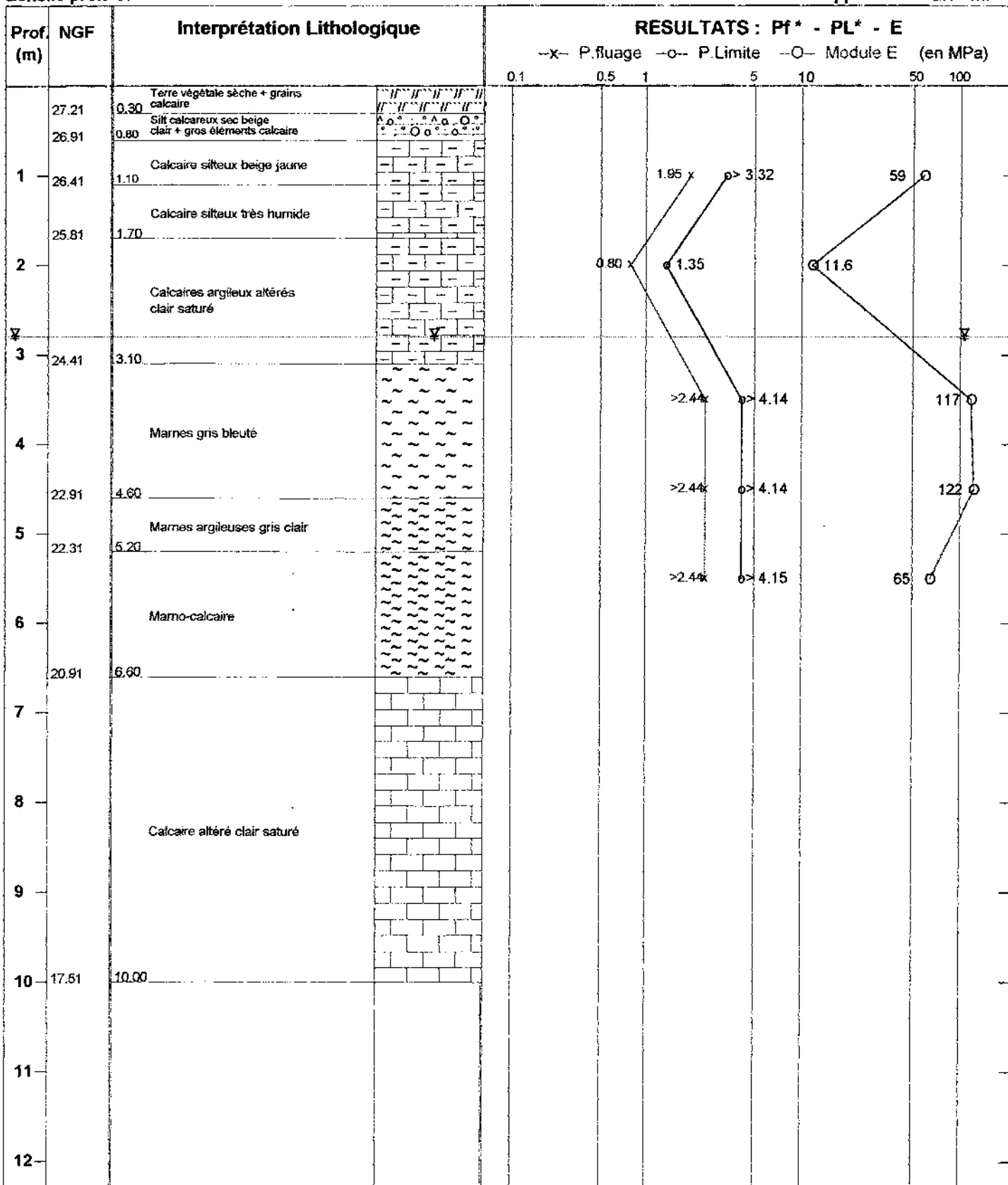
Dossier : D01/B039

- Y :

- Z : 27.51

Echelle prof. : /

Nappe : eau à 2.80 m.



OUTILS DE FORAGE

TUBAGES

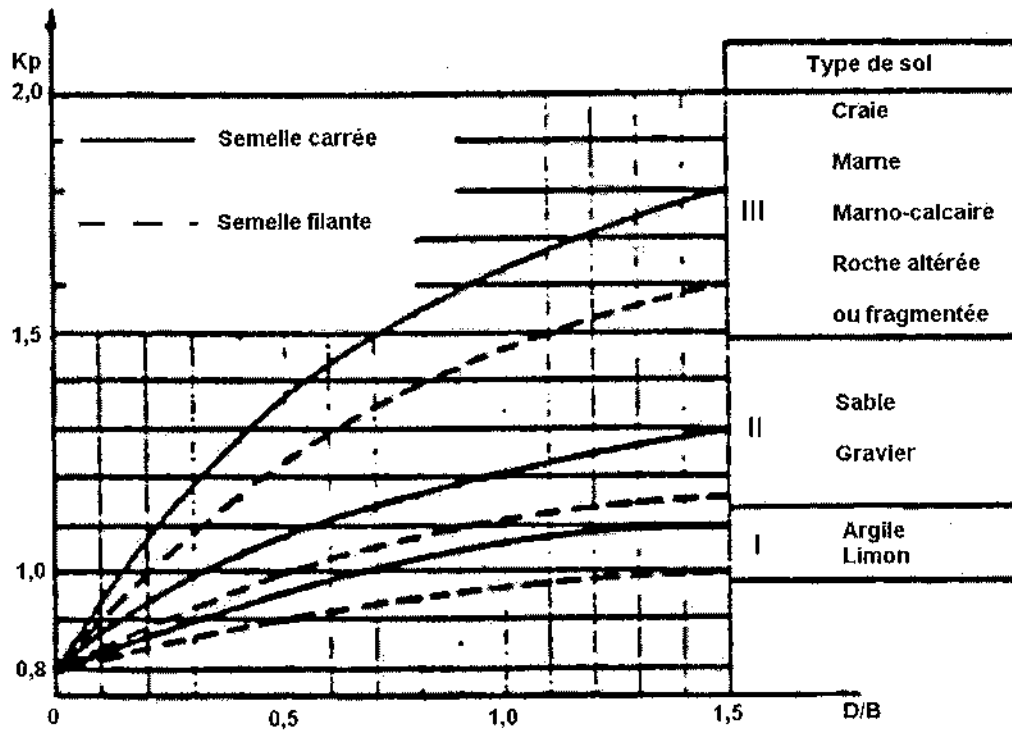
DATES D'EXECUTION

18/06/01	10.50 m

OBSERVATIONS : nappe à - 1.7 m/ TN le 25/06/01

Logiciel ESPRESS pour WINDOWS - Version 5.2

Annexe 8 : Détermination du facteur de portance k_p pour une fondation superficielle à partir d'essais pressiométriques (Abaque tirée du DTU 13.12 de mars 1988).



Annexe 9 : Procédure de calcul des tassements pour une fondation superficielle à partir du module pressiométrique (DTU 13.12 de mars 1988).

Dans le cas d'une fondation superficielle de type semelle filante ou semelle isolée, le tassement absolu S_f (équation 1) correspond à la somme de deux termes : S_c tassement dans le domaine déviatorique (équation 2), et S_d tassement dans le domaine sphérique (équation 3).

$$S_f = S_c + S_d \quad \text{équation 1}$$

$$S_c = \frac{\alpha}{9E_c} (\sigma - \gamma \cdot D) \lambda_c B \quad \text{équation 2}$$

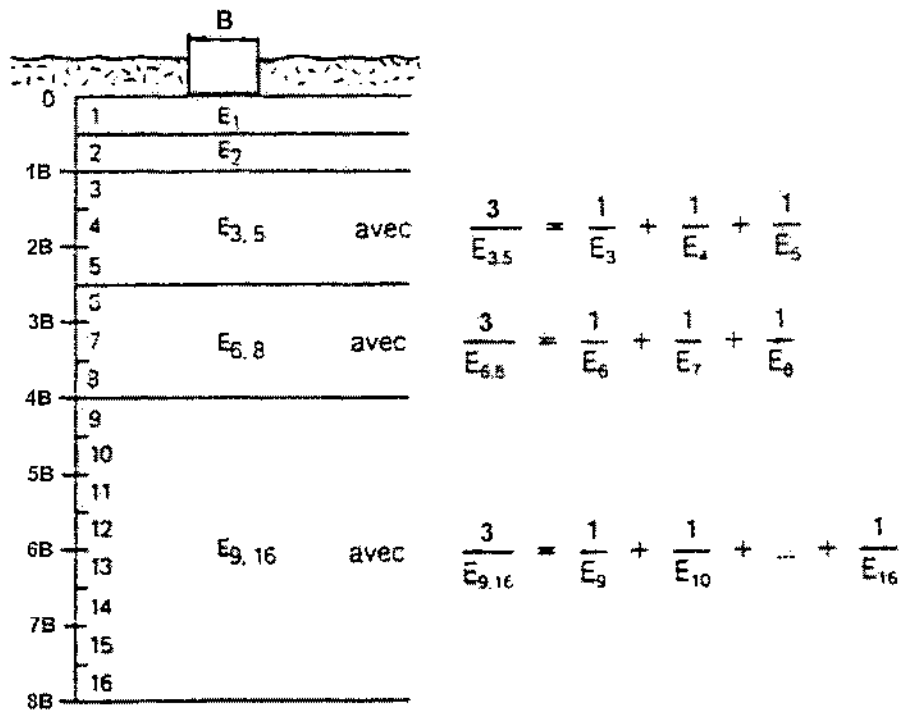
$$S_d = \frac{2}{9E_d} (\sigma - \gamma \cdot D) B_0 \left(\lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha \quad \text{équation 3}$$

avec :

- E_c module pressiométrique du sol dans le domaine sphérique
- E_d module pressiométrique du sol dans le domaine déviatorique
- α coefficient rhéologique du sol (pris égal à 0.5)
- σ composante normale de la contrainte du sol sous la fondation à l'état limite de service
- B largeur de la fondation
- B_0 largeur de référence égale à 0.60 m
- λ_c et λ_d coefficients de forme dépendant de la géométrie de la fondation

L'estimation du module dans le domaine déviatorique suit la relation :

$$\frac{4}{E_d} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{0.85 \cdot E_2} + \frac{1}{E_{3,5}} + \frac{1}{2.5 \cdot E_{6,8}} + \frac{1}{2.5 \cdot E_{9,16}}$$



Le coefficient rhéologique α peut prendre les valeurs 1 - 0.66 - 0.50 ou 0.33 selon la nature des matériaux et la valeur du rapport E/pl . Le tableau synthétique est reporté dans le DTU 13.12.

Annexe 10 : Construction de bâtiments agricoles à Potensac - Estimation des tassements absolus au droit des points de sondages pressiométriques (calculs réalisés à partir du logiciel CALPRESS DTU 13.12 de mars 1988).

- Pour une contrainte induite de 0.1 MPa

ALIOS		Chantier <i>Potensac (33)</i>	SP1
Client: <i>Leoville Las Cases</i>			Dossier <i>D01/B039</i>
Ouvrage: <i>Bâtiment agricole</i>			Date Essais <i>15/06/01</i>

Résultats détaillés du calcul de tassement				
Semelle N°	<input type="text" value="1"/>	Charge sur la semelle :	<input type="text" value="60 KN /m.l."/>	
Type de fondation:	<input type="text" value="Filante"/>	= > Contrainte induite brute :	<input type="text" value="0.100 MPa"/>	
Ancrage / T.Fini :	<input type="text" value="0.50 m."/>	+ ou - terrassement :	<input type="text" value="0.061"/>	
Ancrage / T.N. :	<input type="text" value="3.55 m."/>	Contrainte pour calcul :	<input type="text" value="0.039 MPa"/>	
		Bcomp.	Coefficients de forme Ld, Ls :	<input type="text" value="2.70"/> <input type="text" value="1.50"/>
Largeur :	<input type="text" value="0.60 m"/>		Modules Es et Ed calculés :	<input type="text" value="10.800"/> <input type="text" value="11.733"/> en MPa
Longueur :	<input type="text" value="/"/>		Détail des modules harmoniques :	<input type="text" value="10.800"/> <input type="text" value="10.385"/> <input type="text" value="13.548"/> <input type="text" value="29.453"/>
Surface :	<input type="text" value="0.60 m² /m.l."/>		(tranches 1- 16 R)	E2 E3/5 E6/8 E9/16
TASSEMENTS CALCULES (en cm)				
	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.1"/>
selon valeur du coefficient de structure sol ALPHA:				
	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="0.33"/>	<input type="text" value="0.50"/>	<input type="text" value="0.66"/>
			<input type="text" value="1.00"/>	

Niveau du terrain fini / terrain naturel : Terrain fini en déblai de 3.05 m

Niveau de la nappe, si elle existe : 4.1 m /TN

Calpress DTU 13.12 - Version 3.7

ALIOS		Chantier <i>Potensac (33)</i>	SP2
Client: <i>Leoville Las Cases</i>			Dossier <i>D01/B039</i>
Ouvrage: <i>Bâtiment agricole</i>			Date Essais <i>15/06/01</i>

Résultats détaillés du calcul de tassement				
Semelle N°	<input type="text" value="1"/>	Charge sur la semelle :	<input type="text" value="60 KN /m.l."/>	
Type de fondation:	<input type="text" value="Filante"/>	= > Contrainte induite brute :	<input type="text" value="0.100 MPa"/>	
Ancrage / T.Fini :	<input type="text" value="0.50 m."/>	+ ou - terrassement :	<input type="text" value="0.015"/>	
Ancrage / T.N. :	<input type="text" value="1.25 m."/>	Contrainte pour calcul :	<input type="text" value="0.085 MPa"/>	
		Bcomp.	Coefficients de forme Ld, Ls :	<input type="text" value="2.70"/> <input type="text" value="1.50"/>
Largeur :	<input type="text" value="0.60 m"/>		Modules Es et Ed calculés :	<input type="text" value="15.636"/> <input type="text" value="41.531"/> en MPa
Longueur :	<input type="text" value="/"/>		Détail des modules harmoniques :	<input type="text" value="97.400"/> <input type="text" value="80.272"/> <input type="text" value="77.771"/> <input type="text" value="149.478"/>
Surface :	<input type="text" value="0.60 m² /m.l."/>		(tranches 1- 16 R)	E2 E3/5 E6/8 E9/16
TASSEMENTS CALCULES (en cm)				
	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.1"/>
selon valeur du coefficient de structure sol ALPHA:				
	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="0.33"/>	<input type="text" value="0.50"/>	<input type="text" value="0.66"/>
			<input type="text" value="1.00"/>	

Niveau du terrain fini / terrain naturel : Terrain fini en déblai de .75 m

Niveau de la nappe, si elle existe : 1.8 m /TN

Calpress DTU 13.12 - Version 3.7

ALIOS		Chantier <i>Potensac (33)</i>	SP3
Client: <i>Leoville Las Cases</i>	Dossier <i>DD1/B039</i>		
Ouvrage: <i>Bâtiment agricole</i>	Date Essais <i>15/06/01</i>		

Résultats détaillés du calcul de tassement				
Semelle N°	1	Charge sur la semelle :	60 KN /m.l.	
Type de fondation:	Filante	= > Contrainte induite brute :	0.100 MPa	
Ancre / T.Fini :	0.50 m.	+ ou - terrassement :	0.011	
Ancre / T.N. :	0.00 m.	Contrainte pour calcul :	0.111 MPa	
	Bcomp.		> qu/2 !	
Largeur :	0.60 m	Coefficients de forme Ld, Ls :	2.70	1.50
Longueur :	/	Modules Es et Ed calculés :	59.000	29.696 en MPa
Surface :	0.60 m² /m.l.	Détail des modules harmoniques :	59.000	19.388
		(tranches 1- 16 R)	E2	E3/5
			E6/8	E9/16
			11.600	34.047
TASSEMENTS CALCULES (en cm)	0.1	0.1	0.1	0.1
selon valeur du coefficient de structure sol ALPHA:	0.25	0.33	0.50	0.66
			1.00	0.2

Niveau du terrain fini / terrain naturel : Terrain fini en remblai de .5 m
 Niveau de la nappe, si elle existe : 2.8 m /TN
 Calpress DTU 13.12 - Version 3.7

Pour une contrainte induite de 0.15 MPa

ALIOS		Chantier <i>Potensac (33)</i>	SP1
Client: <i>Leoville Las Cases</i>	Dossier <i>DD1/B039</i>		
Ouvrage: <i>Bâtiment agricole</i>	Date Essais <i>15/06/01</i>		

Résultats détaillés du calcul de tassement				
Semelle N°	1	Charge sur la semelle :	90 KN /m.l.	
Type de fondation:	Filante	= > Contrainte induite brute :	0.150 MPa	
Ancre / T.Fini :	0.50 m.	+ ou - terrassement :	- 0.061	
Ancre / T.N. :	3.55 m.	Contrainte pour calcul :	0.089 MPa	
	Bcomp.			
Largeur :	0.60 m	Coefficients de forme Ld, Ls :	2.70	1.50
Longueur :	/	Modules Es et Ed calculés :	10.800	11.733 en MPa
Surface :	0.60 m² /m.l.	Détail des modules harmoniques :	10.800	10.385
		(tranches 1- 16 R)	E2	E3/5
			E6/8	E9/16
			13.548	29.453
TASSEMENTS CALCULES (en cm)	0.2	0.2	0.2	0.2
selon valeur du coefficient de structure sol ALPHA:	0.25	0.33	0.50	0.66
			1.00	0.4

Niveau du terrain fini / terrain naturel : Terrain fini en déblai de 3.05 m
 Niveau de la nappe, si elle existe : 4.1 m /TN
 Calpress DTU 13.12 - Version 3.7

ALIOS	Chantier <i>Potensac (33)</i>	SP2
Client: <i>Leoville Las Cases</i>	Dossier <i>D01/B039</i>	
Ouvrage: <i>Bâtiment agricole</i>	Date Essais <i>15/06/01</i>	

Résultats détaillés du calcul de tassement				
Semelle N°	1	Charge sur la semelle :	90 KN /m.l.	
Type de fondation:	Filante	= > Contrainte induite brute :	0.150 MPa	
Ancrage / T.Fini :	0.50 m.	+ ou - terrassement :	- 0.015	
Ancrage / T.N. :	1.25 m.	Contrainte pour calcul :	0.135 MPa	
Bcomp.		Coefficients de forme Ld, Ls :	2.70	1.50
Largeur :	0.60 m	Modules Es et Ed calculés :	15.636	41.531 en MPa
Longueur :	/	Détail des modules harmoniques :	97.400	80.272
Surface :	0.60 m² /m.l.	(tranches 1- 16 R)	77.771	149.478
			E2	E3/5
			E6/8	E9/16
TASSEMENTS CALCULES (en cm)	0.1	0.1	0.1	0.1
selon valeur du coefficient de structure sol ALPHA:	0.25	0.33	0.50	0.66
			1.00	

Niveau du terrain fini / terrain naturel : Terrain fini en déblai de .75 m
 Niveau de la nappe, si elle existe : 1.8 m /TN
 Calpress DTU 13.12 - Version 3.7

ALIOS	Chantier <i>Potensac (33)</i>	SP3
Client: <i>Leoville Las Cases</i>	Dossier <i>D01/B039</i>	
Ouvrage: <i>Bâtiment agricole</i>	Date Essais <i>15/06/01</i>	

Résultats détaillés du calcul de tassement				
Semelle N°	1	Charge sur la semelle :	90 KN /m.l.	
Type de fondation:	Filante	= > Contrainte induite brute :	0.150 MPa	
Ancrage / T.Fini :	0.50 m.	+ ou - terrassement :	0.011	
Ancrage / T.N. :	0.00 m.	Contrainte pour calcul :	0.161 MPa	
Bcomp.		Coefficients de forme Ld, Ls :	2.70	1.50
Largeur :	0.60 m	Modules Es et Ed calculés :	59.000	29.696 en MPa
Longueur :	/	Détail des modules harmoniques :	59.000	19.388
Surface :	0.60 m² /m.l.	(tranches 1- 16 R)	11.600	34.047
			E2	E3/5
			E6/8	E9/16
TASSEMENTS CALCULES (en cm)	0.1	0.1	0.1	0.2
selon valeur du coefficient de structure sol ALPHA:	0.25	0.33	0.50	0.66
			1.00	

Niveau du terrain fini / terrain naturel : Terrain fini en remblai de .5 m
 Niveau de la nappe, si elle existe : 2.8 m /TN
 Calpress DTU 13.12 - Version 3.7

Pour une contrainte de 0.2 MPa

ALIOS		Chantier <i>Potensac (33)</i>	SP1
Client: <i>Leoville Las Cases</i>	Dossier <i>D01/B039</i>		
Ouvrage: <i>Bâtiment agricole</i>	Date Essais <i>15/06/01</i>		

Résultats détaillés du calcul de tassement

Semelle N°	1	Charge sur la semelle :	120 KN /m.l.		
Type de fondation:	Filante	= > Contrainte induite brute :	0.200 MPa		
Ancre / T.Fini :	0.50 m.	+ ou - terrassement :	- 0.061		
Ancre / T.N. :	3.55 m.	Contrainte pour calcul :	0.139 MPa		
Largeur :	0.60 m	Bcomp. Coefficients de forme Ld, Ls :	2.70 1.50		
Longueur :	/	Modules Es et Ed calculés :	10.800 11.733 en MPa		
Surface :	0.60 m² /m.l.	Détail des modules harmoniques :	10.800 10.385 13.548 29.453		
		(tranches 1- 16 R)	E2 E3/5 E6/8 E9/16		
TASSEMENTS CALCULES (en cm)	0.2	0.3	0.3	0.4	0.6
selon valeur du coefficient de structure sol ALPHA:	0.25	0.33	0.50	0.66	1.00

Niveau du terrain fini / terrain naturel : Terrain fini en déblai de 3.05 m
 Niveau de la nappe, si elle existe : 4.1 m /TN
 Calpress DTU 13.12 - Version 3.7

ALIOS		Chantier <i>Potensac (33)</i>	SP2
Client: <i>Leoville Las Cases</i>	Dossier <i>D01/B039</i>		
Ouvrage: <i>Bâtiment agricole</i>	Date Essais <i>15/06/01</i>		

Résultats détaillés du calcul de tassement

Semelle N°	1	Charge sur la semelle :	120 KN /m.l.		
Type de fondation:	Filante	= > Contrainte induite brute :	0.200 MPa		
Ancre / T.Fini :	0.50 m.	+ ou - terrassement :	- 0.015		
Ancre / T.N. :	1.25 m.	Contrainte pour calcul :	0.185 MPa		
Largeur :	0.60 m	Bcomp. Coefficients de forme Ld, Ls :	2.70 1.50		
Longueur :	/	Modules Es et Ed calculés :	15.636 41.531 en MPa		
Surface :	0.60 m² /m.l.	Détail des modules harmoniques :	97.400 80.272 77.771 149.478		
		(tranches 1- 16 R)	E2 E3/5 E6/8 E9/16		
TASSEMENTS CALCULES (en cm)	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
selon valeur du coefficient de structure sol ALPHA:	0.25	0.33	0.50	0.66	1.00

Niveau du terrain fini / terrain naturel : Terrain fini en déblai de .75 m
 Niveau de la nappe, si elle existe : 1.8 m /TN
 Calpress DTU 13.12 - Version 3.7

ALIOS		Chantier <i>Potensac (33)</i>	SP3
Client: <i>Leoville Las Cases</i>	Dossier <i>D01/B039</i>		
Ouvrage: <i>Bâtiment agricole</i>	Date Essais <i>15/06/01</i>		

Résultats détaillés du calcul de tassement

Semelle N°	1	Charge sur la semelle :	120 KN /m.l.			
Type de fondation:	Filante	= > Contrainte induite brute :	0.200 MPa			
Ancrage / T.Fini :	0.50 m.	+ ou - terrassement :	0.011			
Ancrage / T.N. :	0.00 m.	Contrainte pour calcul :	0.211 MPa			
			> qu/2 !			
Largueur :	0.60 m	Bcomp. Coefficients de forme Ld. Ls :	2.70 1.50			
Longueur :	/	Modules Es et Ed calculés :	59.000 29.696 en MPa			
Surface :	0.60 m² /m.l.	Détail des modules harmoniques :	59.000 19.388 11.600 34.047			
		(tranches 1- 16 R)	E2 E3/5 E6/8 E9/16			
TASSEMENTS CALCULES (en cm)		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
selon valeur du coefficient de structure sol ALPHA:		0.25	0.33	0.50	0.66	1.00

Niveau du terrain fini / terrain naturel : Terrain fini en remblai de .5 m
 Niveau de la nappe, si elle existe : 2.8 m /TN
 Calpress DTU 13.12 - Version 3.7

Annexe 11 : Construction de bâtiments agricoles à Potensac - Estimation de la contrainte apportée par le radier et la cuve de gasoil.

Hypothèses de calcul :

Volume de la cuve, $V_{\text{cuve}} = 30 \text{ m}^3$

$\gamma_{\text{eau}} = 10 \text{ kN/m}^3$ (pour le cas où la cuve serait un jour remplie par de l'eau, plus lourde que le gasoil)

$\gamma_{\text{béton armé}} = 25 \text{ kN/m}^3$

Epaisseur du radier, $e = 0.20 \text{ m}$

Longueur du radier, $L = 11 \text{ m}$

Largeur du radier, $l = 6 \text{ m}$

1 - Estimation des charges

- Charge apportée par le radier :

$$F_{\text{radier}} = \gamma_{\text{béton armé}} \times e \cdot L \cdot l$$

$$F_{\text{radier}} = 330 \text{ kN}$$

- Charge apportée par la cuve :

$$F_{\text{cuve}} = \gamma_{\text{eau}} \times V_{\text{cuve}}$$

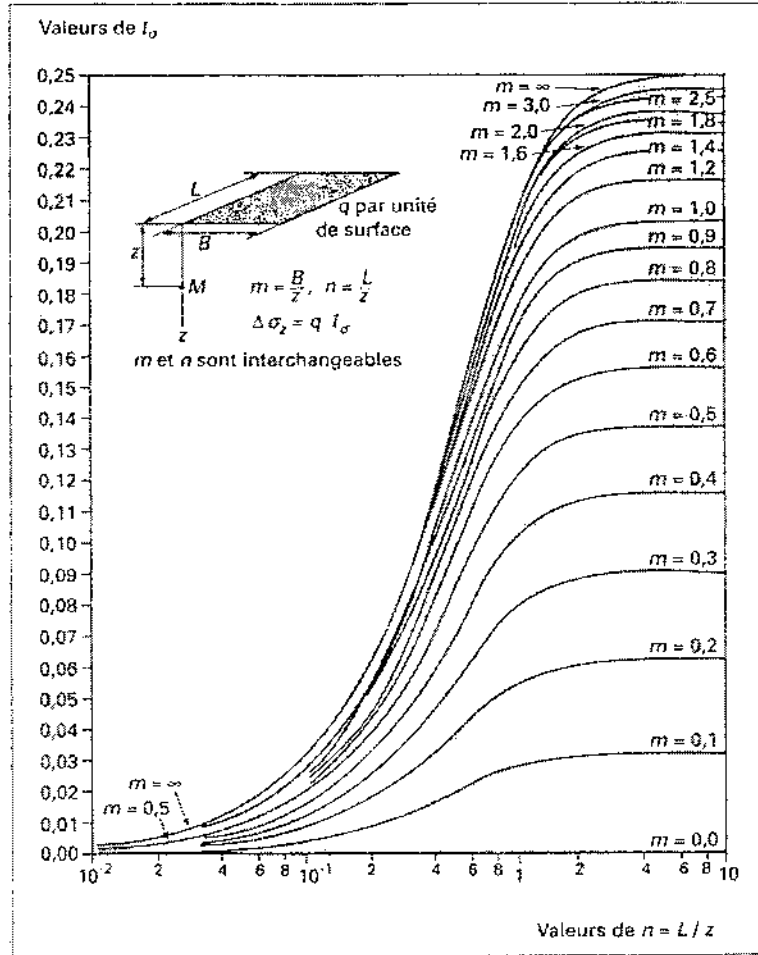
$$F_{\text{cuve}} = 300 \text{ kN}$$

2 - Contrainte effectivement appliquée par l'ensemble (cuve + radier)

$$\sigma_{\text{effi. apportée}} = \frac{F_{\text{radier}} + F_{\text{cuve}}}{S}$$

$$\sigma_{\text{effi. apportée}} = 9.6 \text{ kPa} \quad \text{soit environ} \quad \mathbf{0.01 \text{ MPa}}$$

Annexe 12 : Accroissement de la contrainte verticale $\Delta\sigma_z$ sous le coin d'une fondation rectangulaire uniformément chargée par la contrainte q . (Figure issues de [Frank 99])



Annexe 13 : Principe et interprétation des essais pressiométriques

Les essais pressiométriques sont menés au sein d'un forage réalisé préalablement par passes de longueur variable selon la nature des matériaux forés. Tous les mètres, une sonde gonflée par paliers successifs de pression, engendre sur les parois du forage un champ de contraintes cylindrique et uniforme, ce qui permet d'appréhender le comportement mécanique du sol.

L'idée de tester les caractéristiques mécaniques du milieu par un essai de chargement latéral dans un forage est lancée dès 1930 par l'ingénieur allemand Koegler. Le principe fût repris plus tard par Tincelin et Talobre, qui par des essais de chargement radial au sein d'un forage déterminaient le coefficient d'élasticité des roches et les pressions autour des galeries.

Toutefois, c'est Louis Ménard qui, en 1957 [Ménard 57], mis au point le procédé et assura sa diffusion en développant les applications permettant à l'ingénieur d'utiliser les résultats des essais dans les calculs géotechniques.

L'interprétation de l'essai pressiométrique repose sur l'analyse de la courbe pressiométrique nette, qui tient compte des corrections relatives :

- **à la hauteur de la colonne d'eau retenue dans le dispositif de mesure au dessus de la cote de l'essai traité (P_h) (en Pa).**

Ainsi pour un essai situé à la cote z_s (m), la correction sera égale à $P_h = \gamma_l(z_c + z_s)$ avec γ_l (N/m³) poids volumique du liquide injecté (généralement de l'eau), z_c (m) niveau du manomètre permettant la lecture de la pression.

- **à l'élasticité propre de la sonde (P_e) (en Pa).**

Celle-ci est mesurée grâce à un essai réalisé hors du forage permettant d'obtenir la pression P_e nécessaire à la dilatation de la gaine et de la membrane et éventuellement du tube lanterné.

- **à la déformation interne des différents organes du pressiomètre (ΔV) (m³).**

Pour des pressions inférieures à 2.5 MPa, cette correction de volume peut être négligée dans les dispositifs actuels en raison de la disposition coaxiale des tubulures. Elle correspond au volume mesuré, lu sur le pressiomètre (V_m) (m³) moins le volume correspondant à la déformation du terrain (V) (m³). La valeur de la correction (ΔV) (m³) pour chaque palier de pression est obtenue en réalisant un étalonnage dans un tube métallique épais cylindrique considéré comme indéformable. La constante de compressibilité, (a), correspond à la pente de la partie linéaire de la courbe $\Delta V = f(p)$, elle est fonction de la température extérieure.

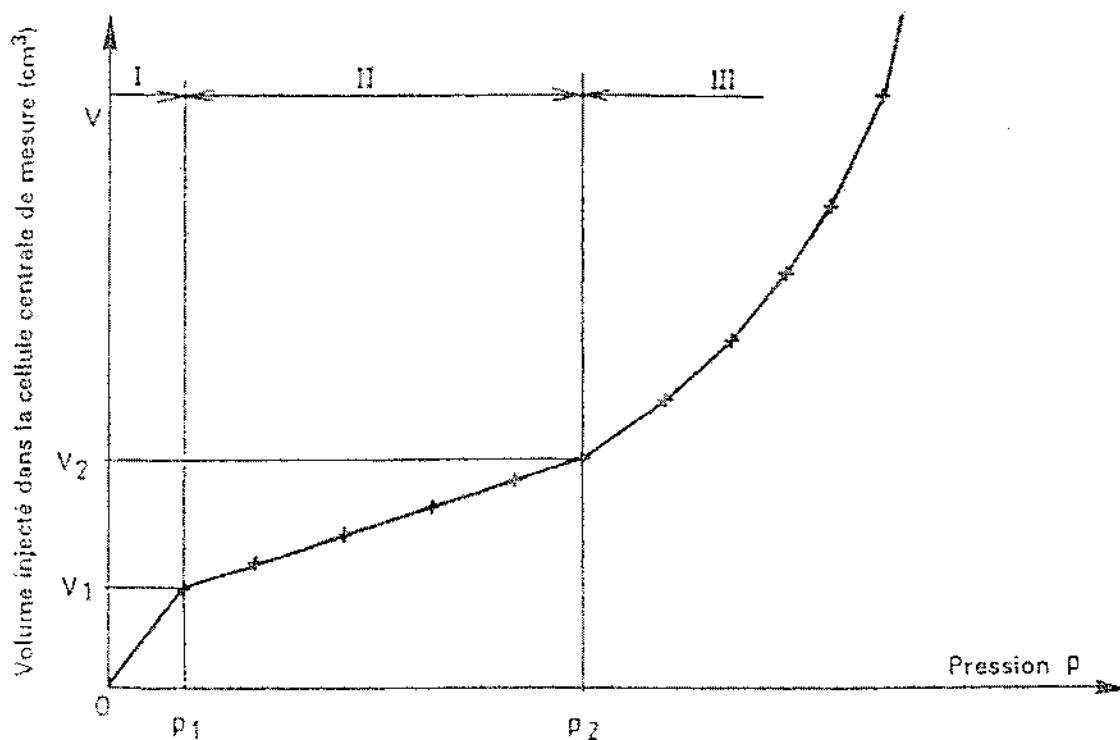
Les pressions (P) (Pa) et les volumes (V) (m^3) de la courbe pressiométrique corrigée sont obtenus par les équations 4 et 5.

$$P = P_m - P_c + P_h \quad \text{équation 1}$$

$$V = V_m - aP_m \quad \text{équation 2}$$

avec P_m = pression mesurée (Pa), V_m = volume mesuré (m^3)

L'analyse de la courbe pressiométrique corrigée permet de définir après la mise en contact de la sonde avec les parois du forage (domaine I), une partie linéaire de la courbe, qui représente le domaine des déformations pseudo-élastiques du matériau (domaine II) [Amar & al. 93]. Cette portion de courbe permet d'estimer le module pressiométrique E , suivant l'équation 6. Celle-ci résulte d'hypothèses simplificatrices concernant le champ de contraintes généré par la sonde et sur les propriétés du sol.



Courbe pressiométrique corrigée théorique (figure issue de la norme NFP 94-110)

$$E = 2(1+\nu) \left[V_s + \frac{(V_1 + V_2)}{2} \right] \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 + V_1)} \quad \text{équation 3}$$

avec :

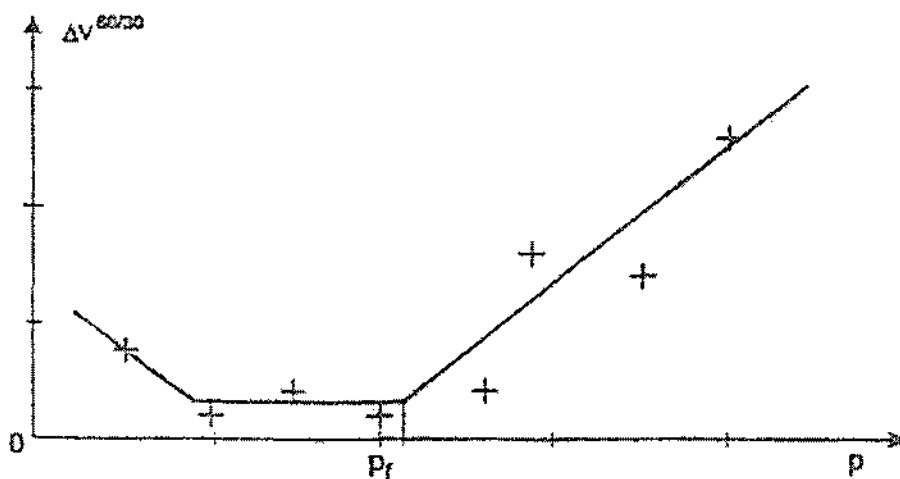
ν coefficient de Poisson, pris conventionnellement égal à 0.33

V_s volume initial de la cellule centrale de mesure

p_2, V_2 pression et volume correspondant à l'extrémité de la plage pseudo-élastique

p_1, V_1 pression et volume correspondant à l'origine de la plage pseudo-élastique

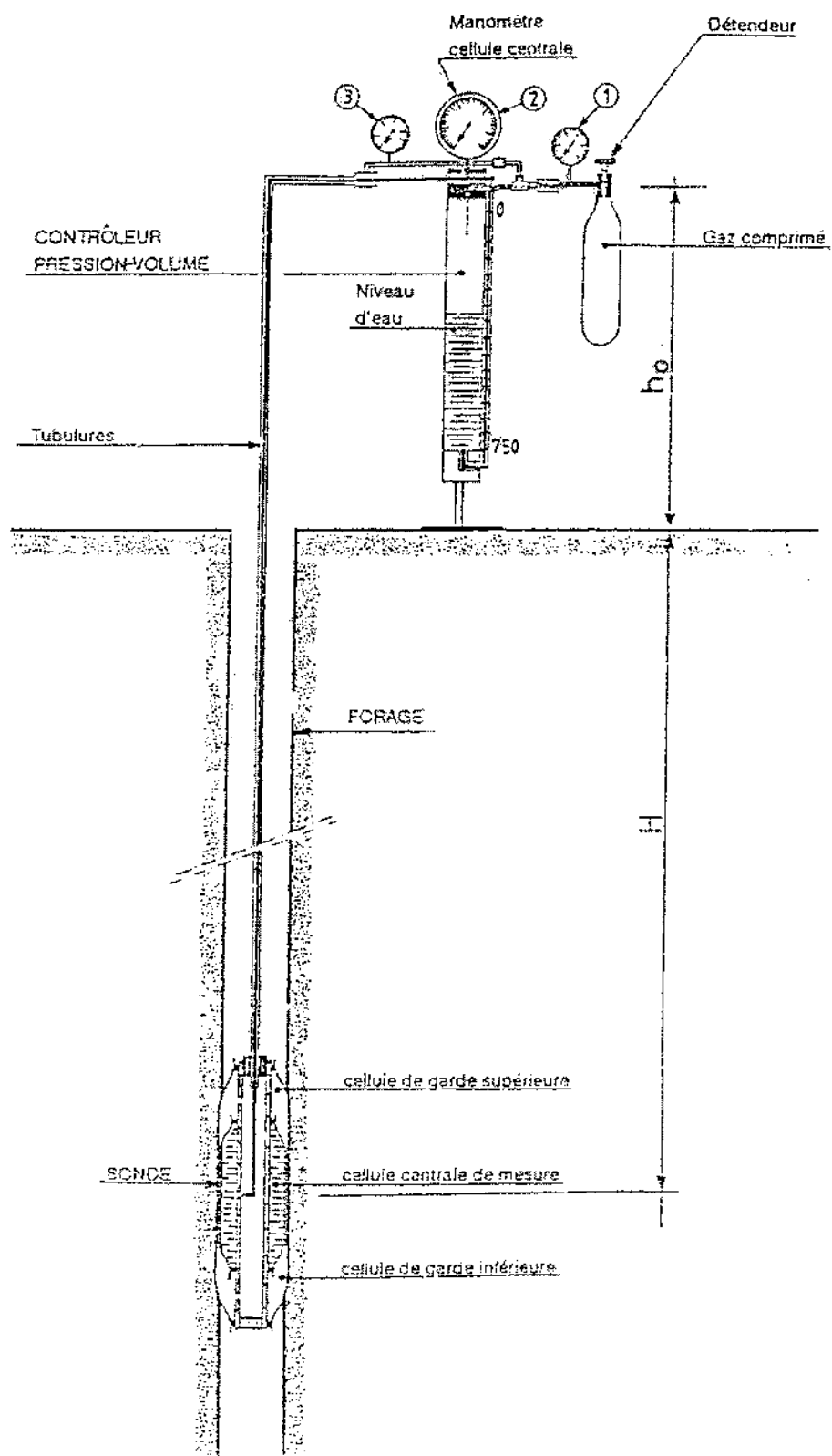
L'analyse de la courbe de fluage permet de déterminer la pression de fluage, soit la limite entre le domaine des déformations pseudo-élastiques (domaine II) et le domaine des grandes déformations (domaine III).



Courbe de fluage théorique (figure issue de la norme NFP 94-110)

La pression limite p_f est, par convention, la pression correspondant à une injection dans la cellule centrale de mesure d'un volume $V = V_s + 2 V_1$

Schéma d'une sonde pressiométrique de type G (tricellulaire emboîtée)



Annexe 14 : Dimensionnement des fondations superficielles et profondes à partir des essais pressiométriques

En pratique, dans le cadre du dimensionnement des fondations superficielles ou profondes, le module pressiométrique et la pression limite sont exploités dans les codes de calcul établis dans les DTU 13.12 et 13.2, fascicule 62 et, à terme, dans l'Eurocode 7.

Fondations superficielles

La contrainte ultime q_u est calculée selon les recommandations du DTU 13.2 de mars 1988 relatif aux fondations superficielles.

A partir des essais pressiométriques, q_u suit l'équation 1 pour une semelle de largeur B, de longueur L et d'encastrement D.

$$q_u = k_p \cdot p_l^* \cdot i_{\delta\beta} + \gamma D \quad \text{équation 1}$$

où :

k_p = facteur de portance, dépendant des dimensions de la fondation, de son encastrement relatif et de la nature du sol (annexe 8).

p_l^* = pression limite nette équivalente calculée comme la valeur moyenne des pressions limites nettes p_l^* existant sur une profondeur égale à 1.5 B située sous la base des fondations. Les pressions limites nettes p_l^* étant plafonnées toutefois à 1.5 fois leur valeur minimale sur la profondeur envisagée. (p_l^* (MPa) correspond à la pression limite p_l (MPa), corrigée de la contrainte totale horizontale régnant dans le sol au niveau concerné et au moment où l'on fait l'essai (p_o), ainsi : $p_l^* = p_l - p_o$).

$i_{\delta\beta}$ = facteur permettant de prendre en compte l'inclinaison de la charge et du talus. Pour une charge verticale centrée, $i_{\delta\beta} = 1$.

γ = poids volumique du sol, déjaugé partiellement le cas échéant

La prise en compte des sollicitations estimées aux états limites ultimes est obtenue par l'équation 2. La contrainte de calcul (q_{ELU}) à comparer à l'action estimée aux états limites ultimes (ELU), est obtenue en divisant par 2 la contrainte ultime calculée précédemment

Les sollicitations aux états limites ultimes correspondent à un événement qui n'a qu'une très faible probabilité de se produire. L'objectif de la justification de l'ouvrage est d'en éviter la ruine et d'assurer la protection des personnes [Philipponat & al. 97].

$$q_{ELU} = \frac{q_u}{2} \quad \text{équation 2}$$

La prise en compte de l'action estimée aux états limites de service suit l'équation 3. Les états limites de service correspondent à un événement ayant une probabilité significative de se produire (de l'ordre de 1 à 50%) au cours de la vie de l'ouvrage. L'objectif de la justification de l'ouvrage est d'éviter tout désordre sous cette sollicitation.

Les contraintes calculées aux ELU, respectivement aux ELS, doivent être inférieures à la résistance calculée à ELU, respectivement ELS, définie par le géotechnicien.

$$q_{ELS} = \gamma \cdot D + \frac{q_u - \gamma \cdot D}{3} \quad \text{équation 3}$$

Fondations profondes

Pour le cas des fondations profondes soumises à une charge axiale (DTU 13.2 de septembre 1992), le calcul de la charge nominale sur un pieu Q_n (équation 4) correspond à la somme de deux termes, le terme de pointe Q_p () et le terme de frottement latéral Q_s (équation 5).

$$Q_n = Q_p + Q_s \quad \text{équation 4}$$

le terme de pointe

$$Q_p = Ak \cdot p_{te} \quad \text{équation 5}$$

où :

A = aire de la section droite de la pointe du pieu

k = facteur de portance reporté sur l'abaque proposé par messieurs Bustamante et Gianceselli (DTU 13.2).

p_{ie} = pression limite équivalente. Il s'agit d'une valeur pondérée, qui tient compte de la distribution des pressions limites mesurées immédiatement au dessus et au dessous de la pointe du pieu (p_{11}^* et p_{13}^*) et au niveau de la pointe (p_{12}^*) (équation 6).

$$p_{ie} = \sqrt[3]{p_{11}^* \cdot p_{12}^* \cdot p_{13}^*} \quad \text{équation 6}$$

le terme de frottement latéral estimé par la relation (équation 7):

$$Q_s = 2 \pi R \sum_i h_i \cdot q_{s_i} \quad \text{équation 7}$$

où :

R = rayon du pieu

q_{s_i} = frottement latéral unitaire dans une couche donnée d'épaisseur h_i . Les valeurs à prendre en compte sont reprises dans le tableau VI et figures 4 et 5 du DTU 13.2 établis à partir d'essais expérimentaux.

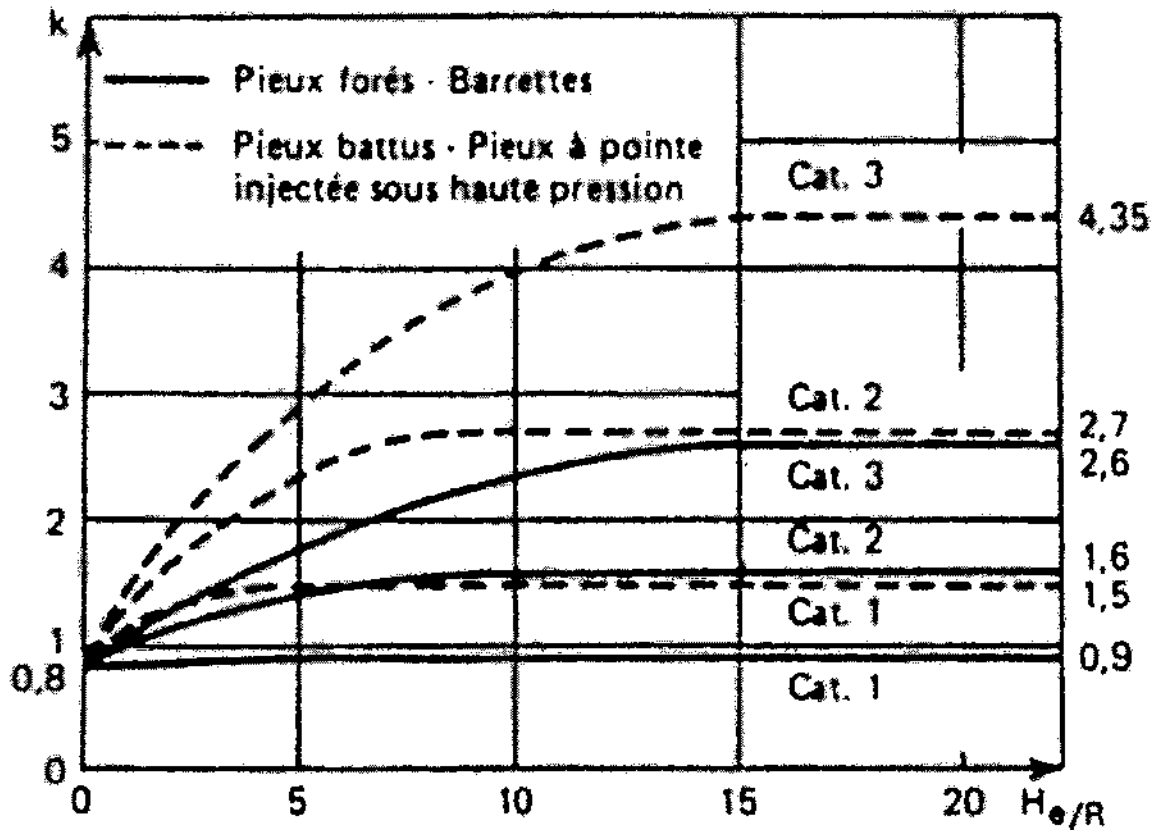
La contrainte de calcul aux états limites ultimes $Q_{n_{ELU}}$ suit l'équation 8

$$Q_{n_{ELU}} = \frac{Q_p}{2} + \frac{3 \cdot Q_s}{4} \quad \text{équation 8}$$

La contrainte aux états limites de service $Q_{n_{ELS}}$ est définie suivant l'équation 9

$$Q_{n_{ELS}} = \frac{Q_p}{3} + \frac{Q_s}{2} \quad \text{équation 9}$$

Détermination du facteur k entrant dans le calcul du terme de pointe pour une fondation profonde à partir de l'essai pressiométrique.



(d'après M. Bustamante et L. Gianceselli)

Pression limite P_i (MPa)	Nature des sols	Catégorie
< 0,7 < 0,8 < 0,7	Argile molle Limon et craie molle Sable argileux et limoneux ou vasard lâche	1
1,0 à 1,8 1,2 à 3,0 1,5 à 4,0 1,0 à 2,5 2,5 à 4,0 > 3,0 > 4,5	Sable et grave moyennement compacts Argile et limon compacts Marne et marne-calcaire Craie altérée Roche altérée Craie fragmentée Marne très compacte	2
> 2,5 > 4,5	Sable et gravier compacts à très compacts Roche fragmentée	3

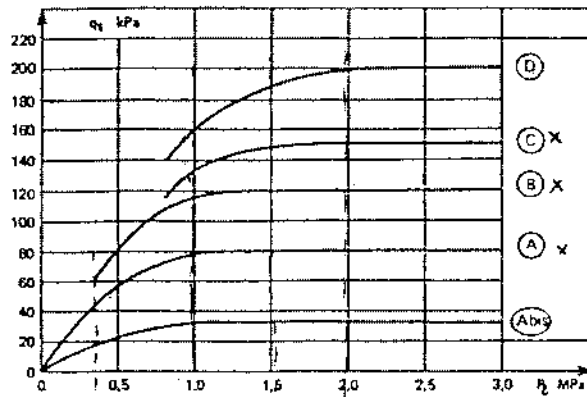
En raison du nombre trop faible de résultats expérimentaux, les valeurs K correspondant à la catégorie 3 sont à utiliser avec prudence.

Détermination du terme de frottement latéral unitaire limite q_s entrant dans le calcul du terme de frottement latéral Q_s pour une fondation profonde (Tableau et abaque issu du DTU 13.2 de septembre 1992).

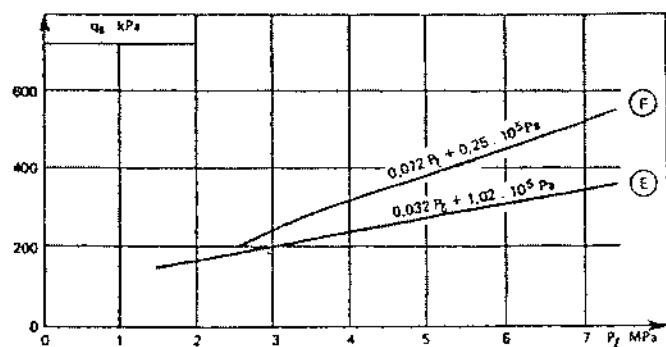
Nature du sol	Pression limite P_f (MPa)	Mise en œuvre et nature du pieu					Injectés	
		Foré Béton	Foré-Tubé		Battu		Faible pression	Haute pression
			Béton	Métal	Béton	Métal		
Argile molle, limon et sable lâche, craie molle	0 à 0,7	Abis	Abis	Abis	Abis	Abis	A	-
Argile moyennement consistante et limon	1,2 à 2,0	(A)* Abis	(A)* Abis	Abis	(A)* Abis	Abis	A	D**
Argile raide à très raide	> 2,0	(A)* Abis	(A)* Abis	Abis	(A)* Abis	A Abis	A	D
Sable et grave moyennement compacts	1 à 2	(B)* A	(B)* Abis	Abis	(B)* A	A	B	≥ D
Sable et grave compacts à très compacts	> 2,5	(C)* B	(B)* A	A	(C)* B	B	C	≥ D
Craie altérée à fragmentée	> 1	(C)* B	(B)* A	A	(C)* B	B	C	≥ D
Marne et marno-calcaire	1,5 à 4	(E)* C	(C)* B	B	E***	E***	E	F
Marne très compacte	> 4,5	E	-	-	-	-	F	≥ F
Roche altérée	2,5 à 4	F	F	-	F***	F***	≥ F	≥ F
Roche fragmentée	> 4,5	F	-	-	-	-	≥ F	≥ F

* Les valeurs entre parenthèses () correspondent, pour les pieux forés, à une exécution soignée du pieu et une technologie de mise en œuvre susceptible de remanier au minimum le sol au contact du fût. Pour les pieux battus, par contre, à un resserrement du sol sur le pieu après battage.
 ** Précisé pour des sols dont $P_f \geq 1,5$ MPa.
 *** Seulement pour les cas où le battage est possible.

Frottement latéral unitaire limite



Frottement latéral unitaire limite



- | | |
|--|-------------------------------|
| (A) Sables argileux à vasards - limons - argiles | (D) Argile raide |
| (B) Sables + graves moyens à très compacts | (E) Marne + marno-calcaire |
| (C) Craies molles à fragmentées | (F) Rocher altéré à fragmenté |

Annexe 15 : Combinaisons de paramètres de forage les plus couramment utilisées

Les symboles utilisés sont les suivants :

- P_e = pression effective (t)
- VA = vitesse d'avance (m/h)
- CR = couple de rotation (N.m)
- ω = vitesse de rotation (tour/min)
- D = diamètre de l'outil (m)

La vitesse d'avance pondérée par la poussée effective ou **vitesse spécifique** ($m/h.t^1$), [doc.Solétanche] :

$$\frac{VA}{Pe}$$

Le couple de rotation corrigé par la poussée sur l'outil ou **couple unitaire** ($N.m.t^1$) [doc.Solétanche]:

$$\frac{CR}{Pe}$$

Ces deux grandeurs ont pour objet de renormer les paramètres VA et CR afin de tenir compte de la pression effectivement exercée sur l'outil. Il s'agit de faire ressortir les variations de VA et de CR résultant uniquement d'une variation des propriétés du géomatériau et non d'une augmentation ou diminution de la pression effective.

Le **coefficient de forabilité** (C_f) [Mazier 90] :

$$C_f = \frac{1}{\omega} \times \frac{VA}{Pe}$$

Ce paramètre, inverse de la résistance au forage du matériau traversé, dépend de la vitesse d'avance corrigée des paramètres machine et de pilotage : vitesse de rotation et poussée effective. Pour un terrain dur, à vitesse de rotation et pression effective constantes, la vitesse d'avance peu élevée conduira à un faible coefficient de forabilité, soit une forte résistance au forage.

La **puissance absorbée par la foration** (P_a) :

$$P_a = CR \times \omega + Pe \times VA$$

Notons que pour les terrains durs la vitesse d'avance est faible et le couple de rotation élevé, si le couple de rotation est faible dans un terrain dur, c'est qu'un ou plusieurs des paramètres de forage fixé par l'opérateur n'est pas adapté (type d'outil, vitesse de rotation, poussée). [Mazier 90].

La **résistance au forage** (MPa) définie par Somerthon (Sd) et Girard (Rf) et reportée dans la lettre Mazier n°4 [Mazier 90] :

- Somerthon [Somerthon 59],

$$Sd = Pe \sqrt{\frac{\omega}{VA}}$$

- Girard [Girard 85]

$$Rf = \frac{k \cdot Pe \cdot \omega}{V \cdot D}$$

k = coefficient d'étalonnage permettant d'obtenir $Rf = Rc$ (résistance à la compression simple du matériau foré).

Le **travail du couple de rotation** [doc. Solétanche] :

$$\frac{CR \times \omega}{VA}$$

Il s'agit d'exprimer le travail fourni en rotation lors du processus de forage

L'indice d'altération (A) [Mazier 90] :

$$A = 1 + \frac{Pe}{P_{\max}} - \frac{VA}{V_{\max}}$$

L'indice d'altération est un paramètre empirique permettant de prendre en compte des valeurs limites de la machine P_{\max} (valeur maximale de la poussée pour la machine) et V_{\max}

(valeur maximale de la vitesse d'avance pour la machine). Variant entre 0 et 2, il est d'autant plus élevé que la foration "sollicite" la puissance de la machine, que le terrain est peu altéré.

Nous évoquerons le système "commercial" ENPASOL développé par la société Bachy-Solétanche qui, par l'acquisition de l'ensemble des paramètres essentiels au calcul des paramètres composés, s'est révélé performant dans le contrôle d'injection (chantier de Fontvieille à Monaco). Toutefois, l'utilisation des paramètres de forage, dans le but de définir une coupe lithologique des terrains traversés via le "système expert" ELISE s'est révélée plus délicate compte tenu de la complexité des processus mis en jeu et les résultats moins probants [doc. Solétanche] et du comportement erratique des signaux.

Annexe 16 : Log. lithologiques et pressiométriques des forages exécutés lors de la reconnaissance du tracé du TGV belge entre Walhorn et Welkenraedt.

Chantier : WALHORN - WELKENRAEDT

Localisation

Date : 08/09/99

Client : TUC RAIL

- X : 262231.152

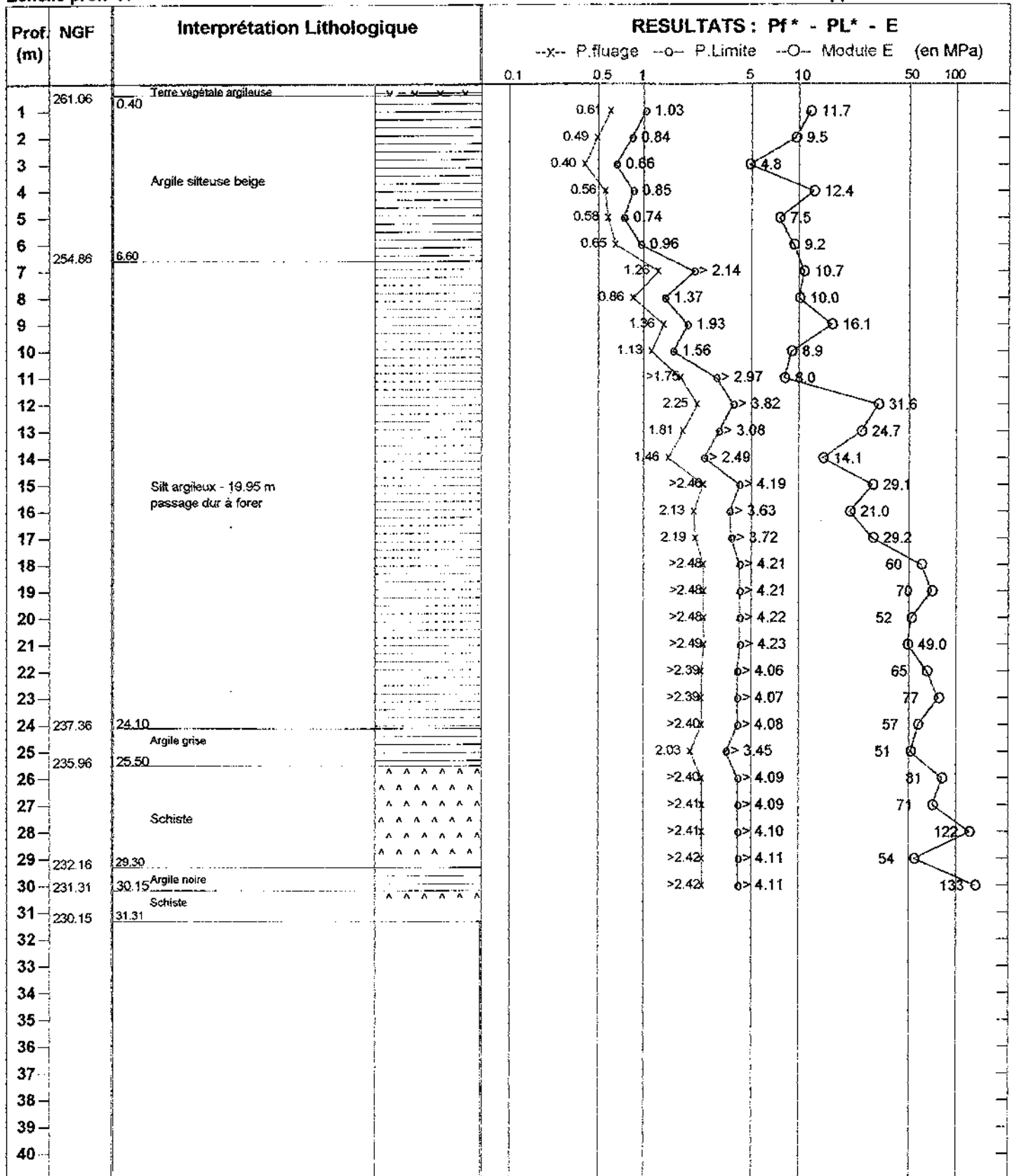
Dossier : D99/B455

- Y : 149790.585

- Z : 261.460

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

Roto percussion Ø 63mm + GSP	31.31 m

Aucun	31.31 m

08/09/99	25.00 m
09/09/99	31.31 m

Chantier : WALHORN-WELKENRAEDT

Localisation

Date : 13/09/99

Client : TUC RAIL

- X : 262342.388

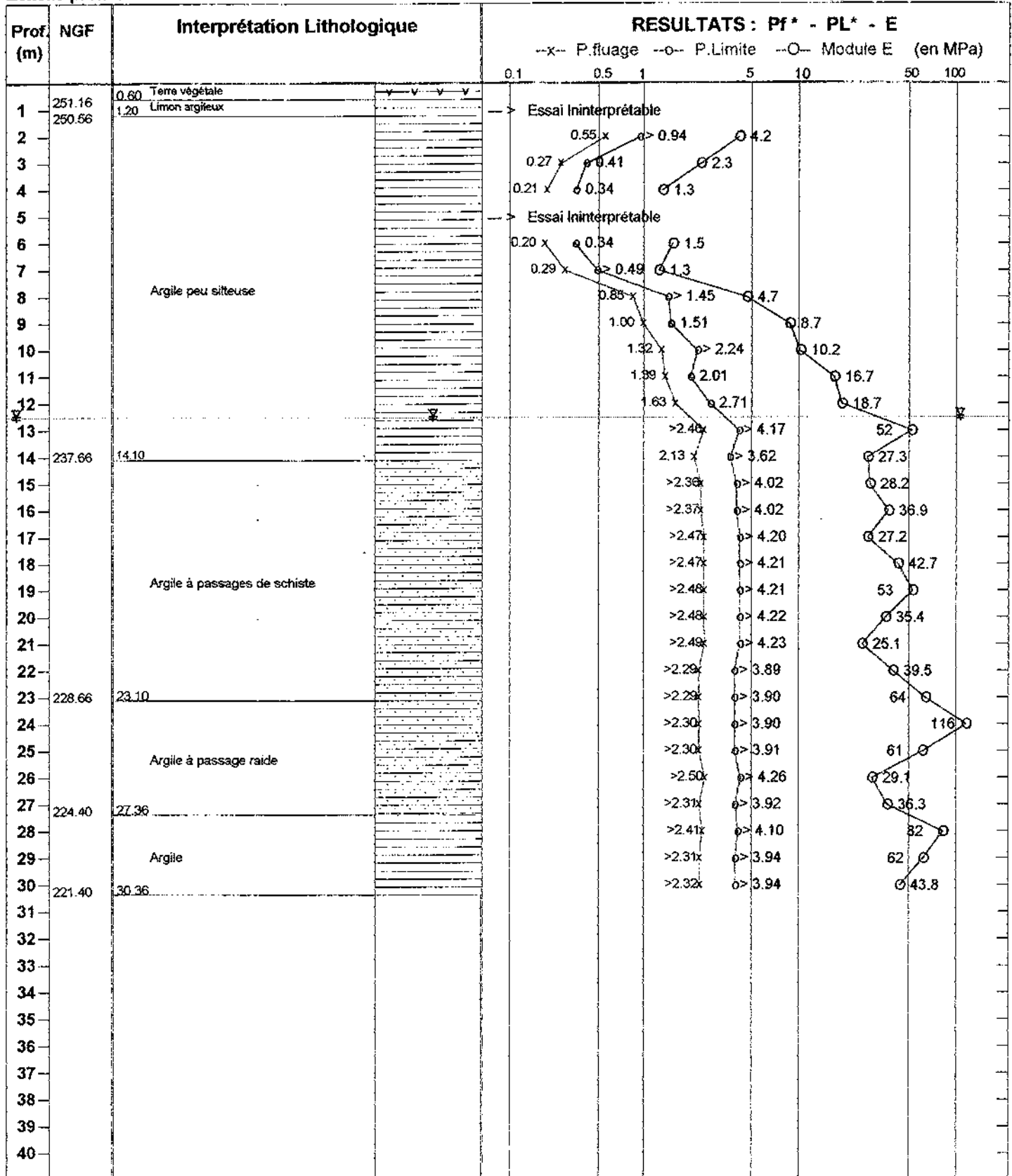
Dossier : D99/B455

- Y : 149778.836

- Z : 251.763

Echelle prof. : /

Nappe : eau à 12.50 m.



OUTILS DE FORAGE

Bilame Ø 66	30.36 m

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

13/09/99	21.26 m
14/09/99	30.36 m

Chantier : WALHORN-WELKENRAEDT

Localisation

Date : 06/10/99

Client : TUC RAIL

- X : 265522.095

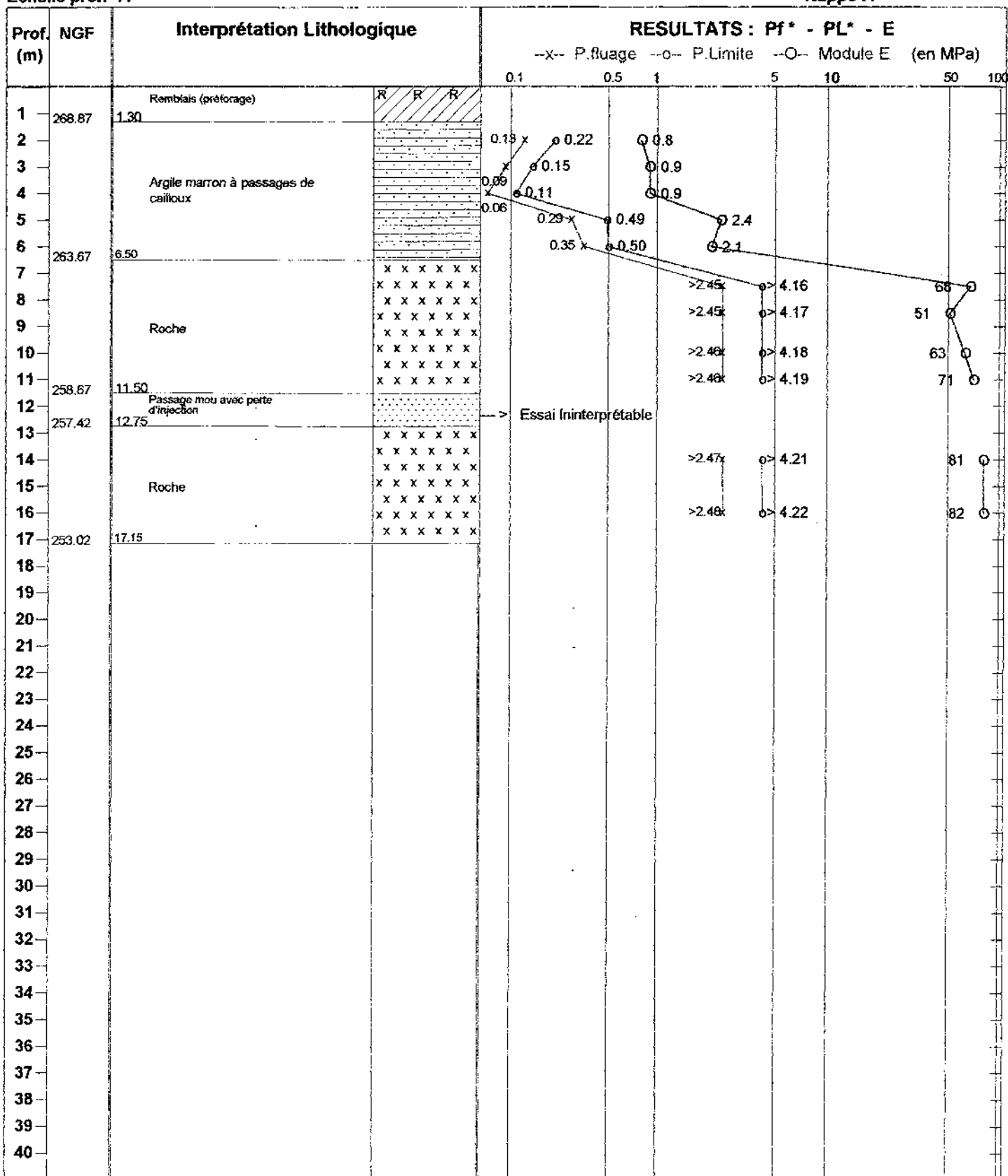
Dossier : D99/B455

- Y : 150051.685

- Z : 270.165

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Roto percussion Ø 66	17.15 m

TUBAGES

Tubage Ø 96 ls	02.50 m

DATES D'EXECUTION

06/10/99	17.15 m

Chantier : WALHORN-WELKENRAEDT

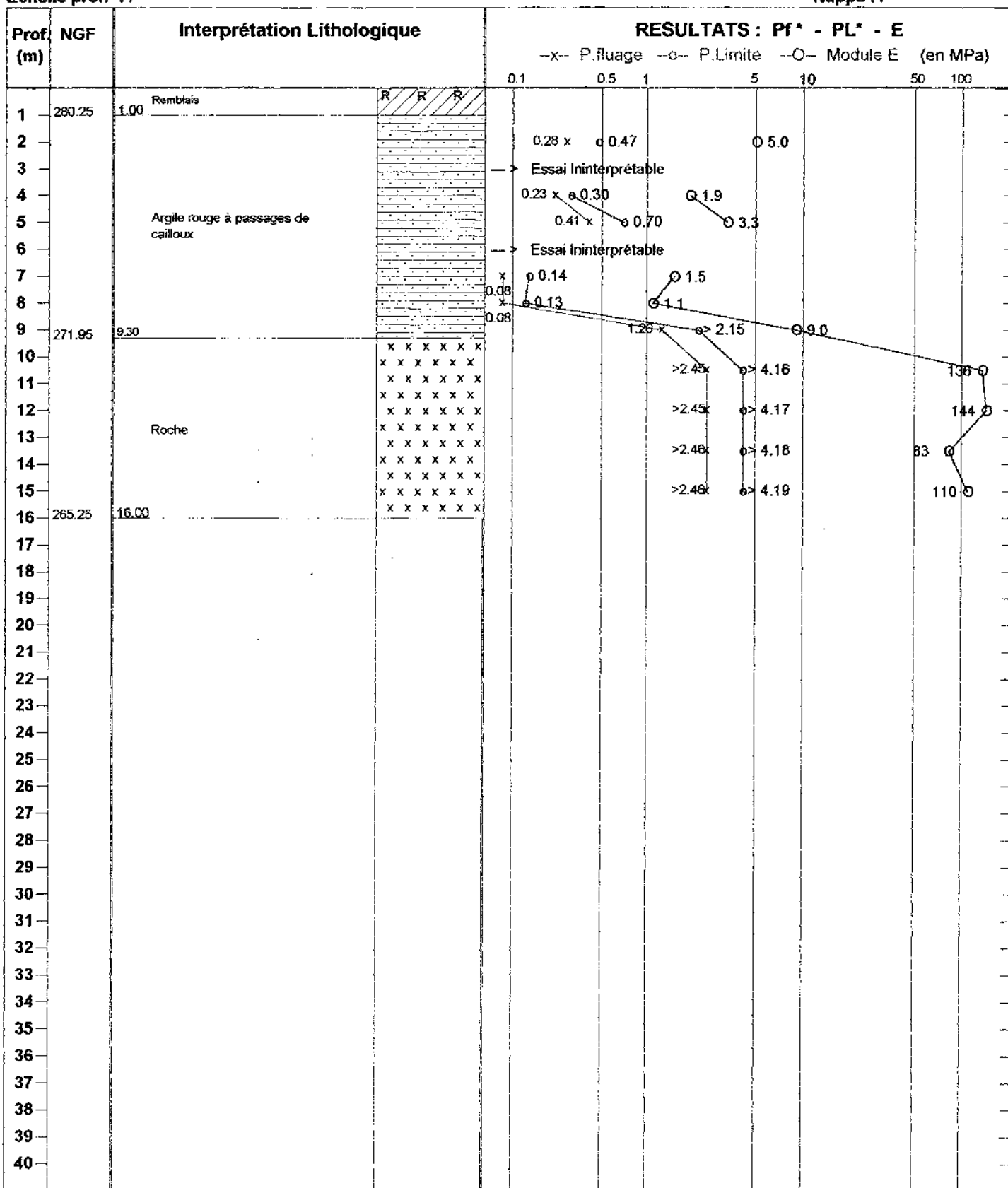
Localisation
 - X : 266400.851
 - Y : 150872.771
 - Z : 281.245

Date : 07/10/99

Client : TUC RAIL
 Dossier : D99/B455

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Roto percussion Ø 66	16.00 m

TUBAGES

Tubage Ø 96 LS	02.50 m

DATES D'EXECUTION

07/10/99	16.00 m

Chantier : WALHORN-WELKENRAEDT

Localisation

Date : 10/10/99

Client : TUC RAIL

- X : 267666.835

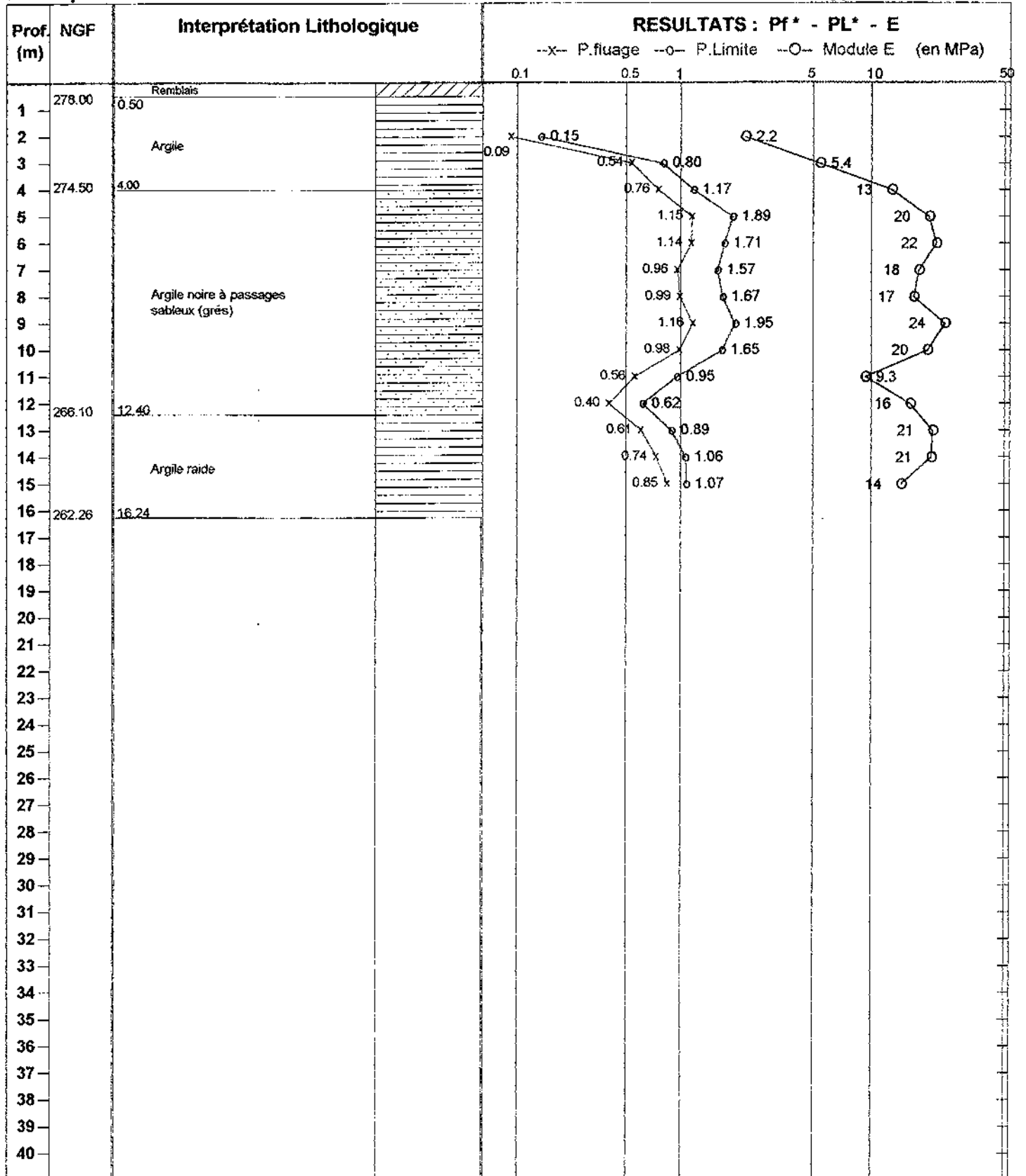
Dossier : D99/B455

- Y : 152400.184

- Z : 278.501

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

Rotapercussion Ø 66	16.24 m

Tubage Ø 96 LS	02.50 m

10/10/99	16.24 m

Chantier : WELKENRAEDT WALHORN

Localisation

Date : 1/10/99

Client : TUC RAIL

- X : 268093.504

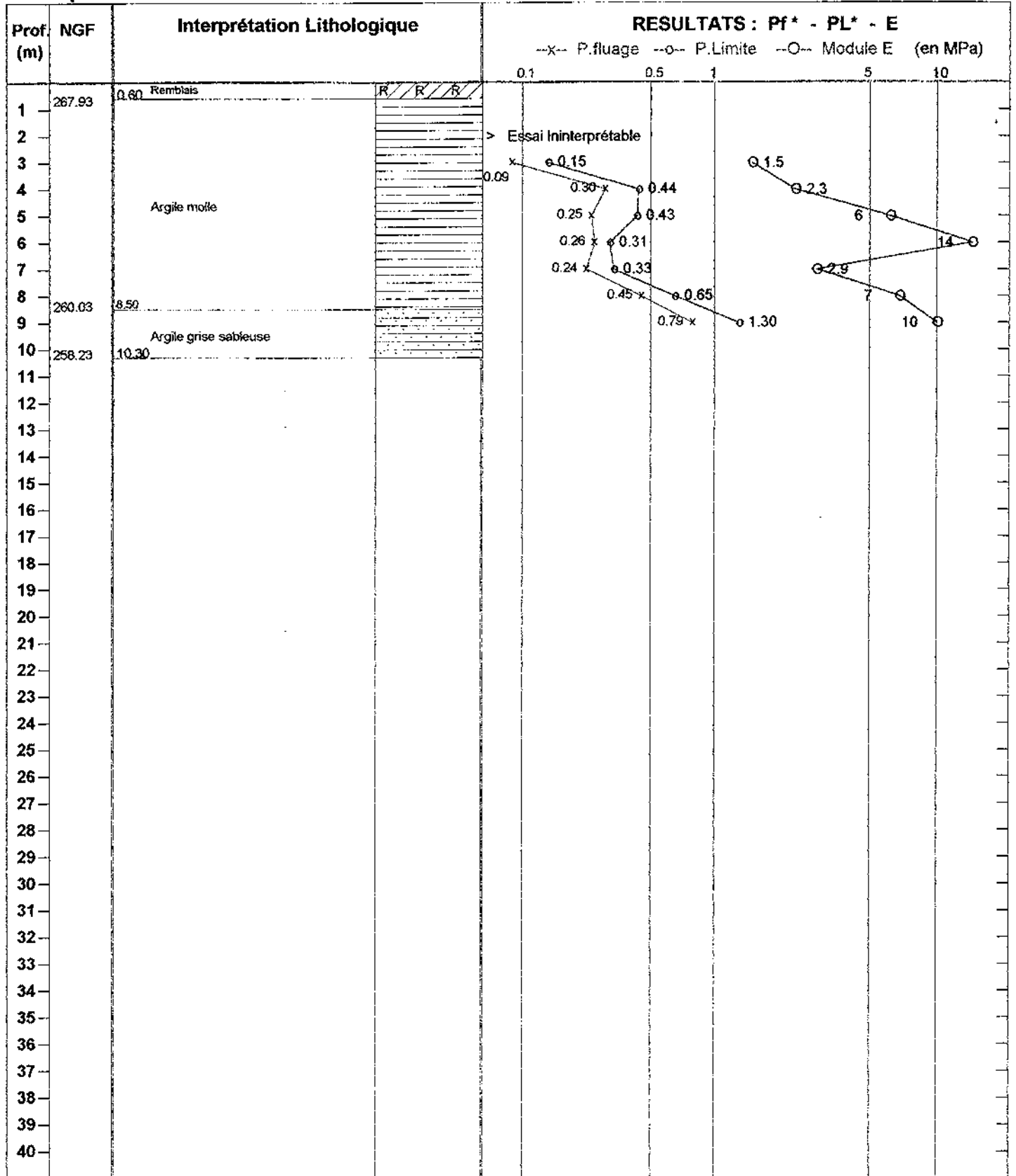
Dossier : D99/B455

- Y : 152913.170

- Z : 268.533

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

Roto percussion Ø 66	10.30 m

Tubage Ø 96 LS	02.50 m

1/10/99	10.30 m

ALIOS

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE P9364

Chantier : WALHORN-WELKENRAEDT

Localisation

Date : 11/10/99

Client : TUC RAIL

- X : 268297.833

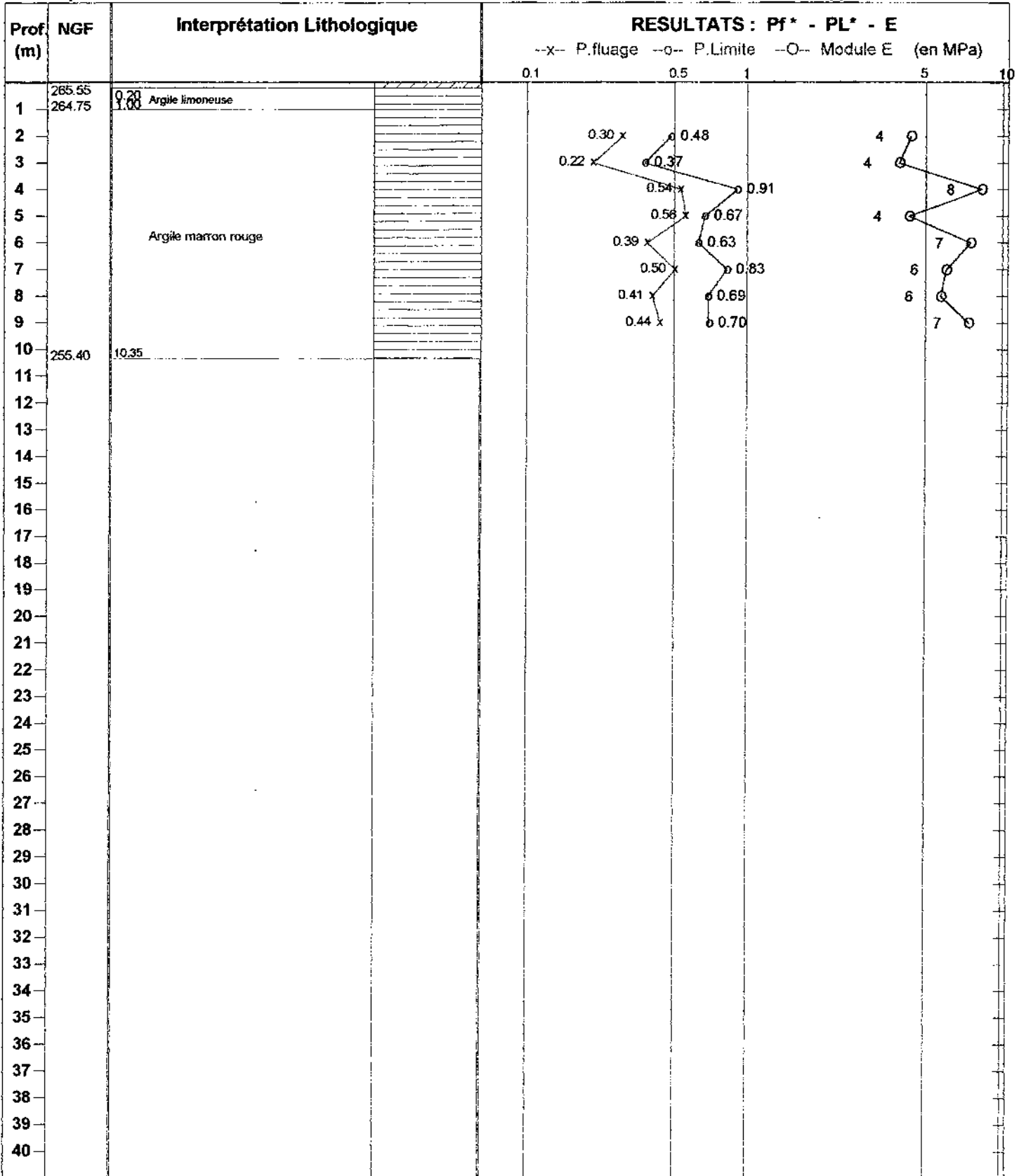
Dossier : D99/B455

- Y : 153159.749

- Z : 265.747

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Roto percussion Ø 66	10.35 m

TUBAGES

Tubage Ø 96 LS	02,50 m

DATES D'EXECUTION

11/10/99	10.35 m

Chantier : WALHORN-WELKENRAEDT

Localisation

Date : 11/10/99

Client : TUC RAIL

- X : 268754.327

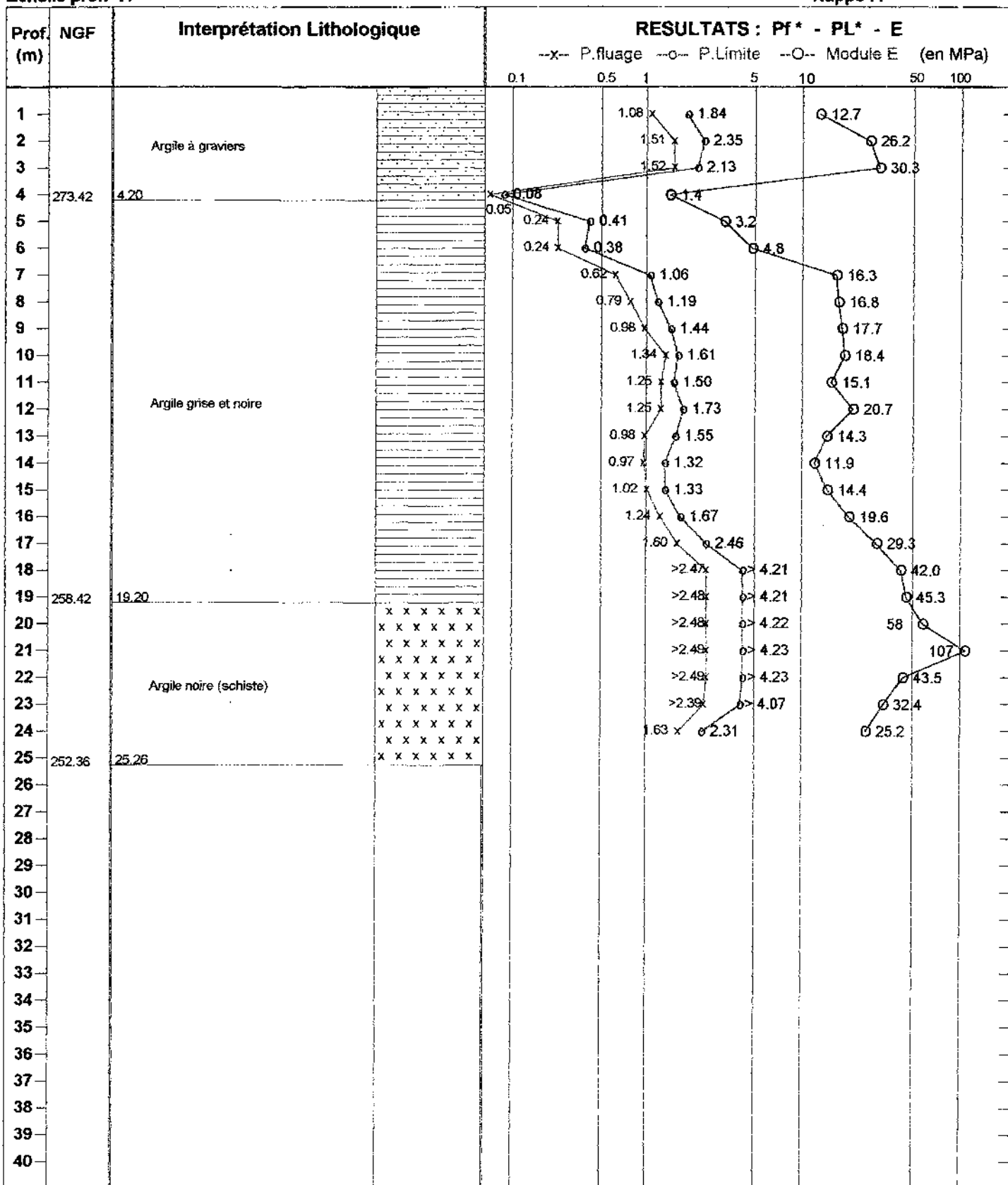
Dossier : D99/B455

- Y : 153844.958

- Z : 277.623

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Roto percussion Ø 66	25.26 m

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

11/10/99	25.26 m

ALIOS

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE P9382

Chantier : WALHORN-WELKENRAEDT

Localisation

Date : 12/10/99

Client : TUC RAIL

- X : 268807.098

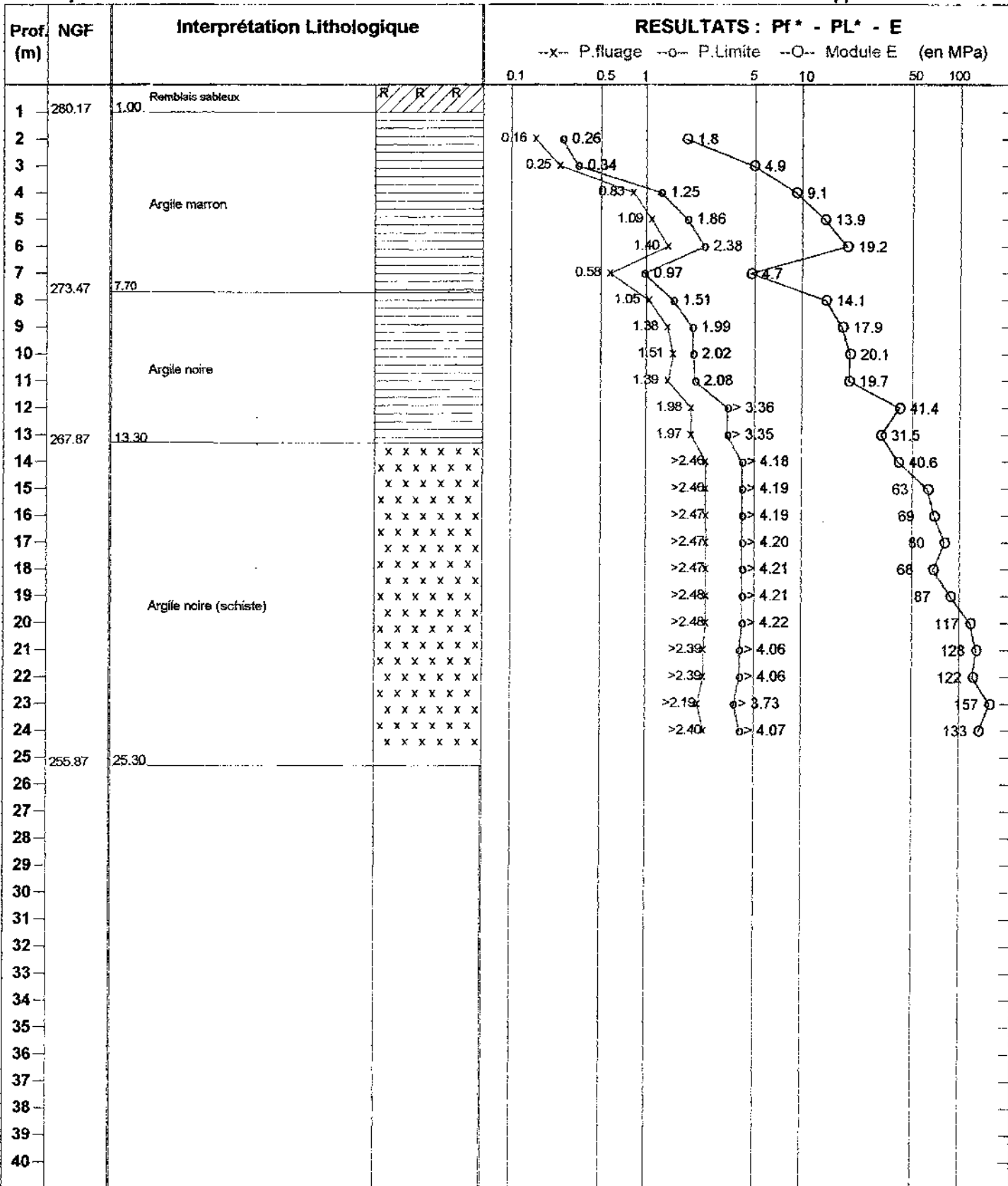
Dossier : D99/B455

- Y : 153979.832

- Z : 281.173

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Roto percussion Ø 66	25.33 m

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

12/10/99	25.33 m

ALIOS

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE P9388

Chantier : WALHORN-WELKENRAEDT

Localisation

Date : 13/010/99

Client : TUC RAIL

- X : 268911.164

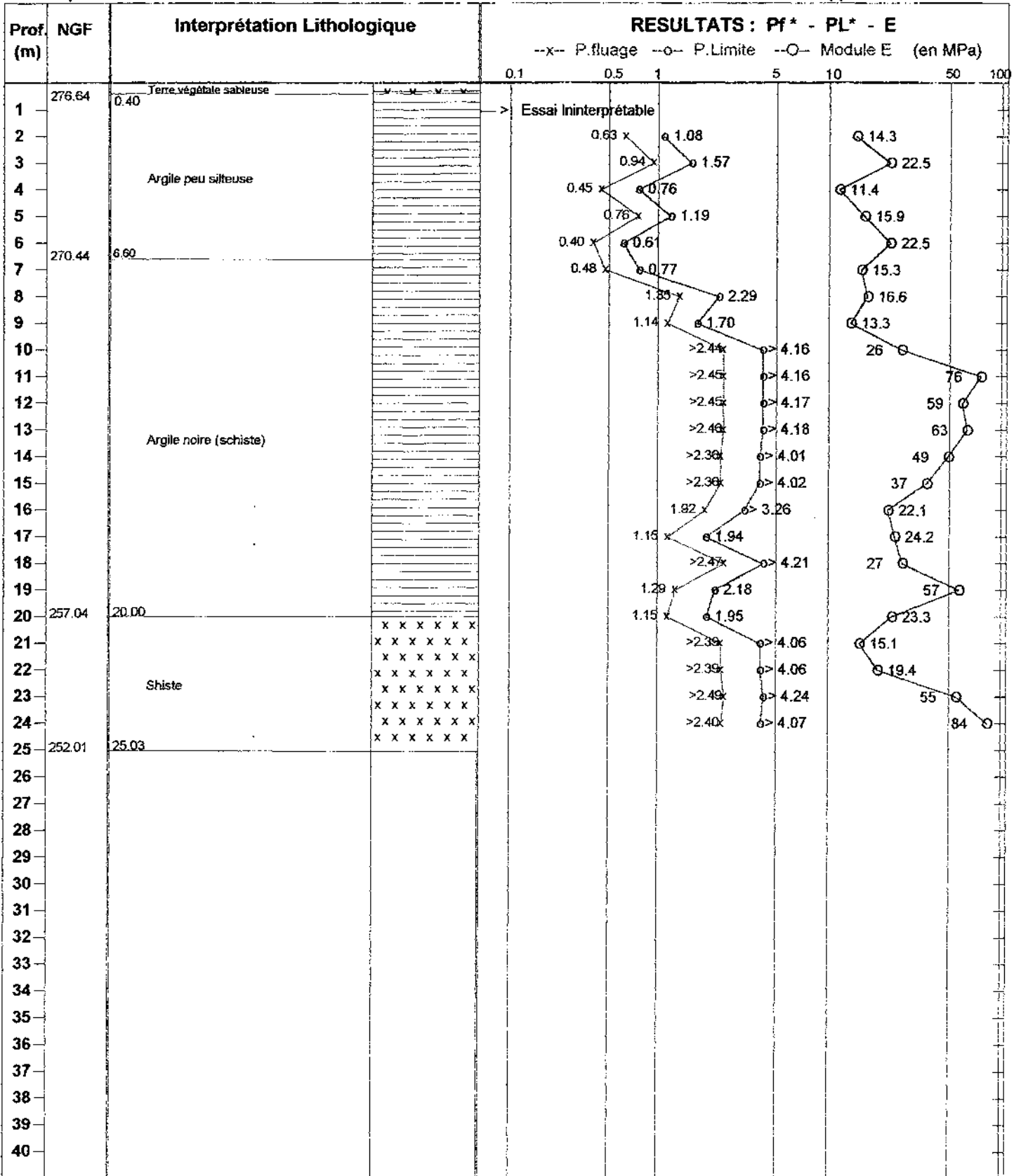
Dossier : D99/B455

- Y : 154467.566

- Z : 277.035

Echelle prof. : 1

Nappe : 1



OUTILS DE FORAGE

Roto percussion Ø 66	25.03 m

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

13/010/99	25.03 m

ALIOS

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE P9390

Chantier : WALHORN-WELKENRAEDT

Localisation

Date : 14/10/99

Client : TUC RAIL

- X : 268917.003

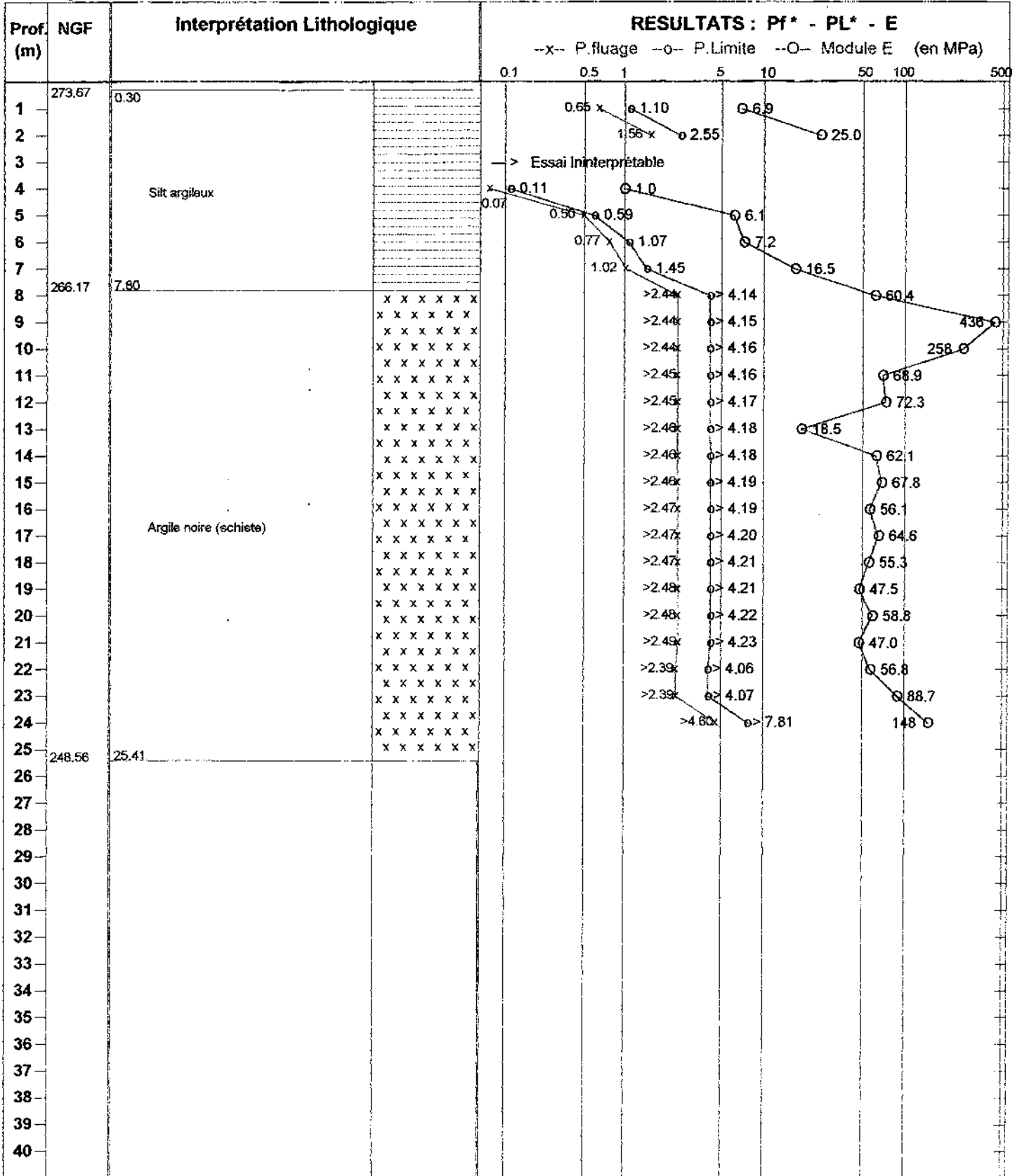
Dossier : D99/B455

- Y : 154561.423

- Z : 273.969

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Roto percussion Ø 66	25.41 m

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

14/10/99	25.41 m

Annexe 17 : Eléments de détermination de la valeur au bleu de méthylène (VBS)

La valeur au bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux est un paramètre d'identification permettant de mesurer la quantité et l'activité de la fraction argileuse (particules inférieures à 2µm) contenue dans un sol ou un matériau rocheux. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de la fraction 0/50 mm du sol étudié. L'essai consiste à mesurer la quantité de bleu adsorbée par un échantillon de fraction 0/5 mm. La quantité de bleu adsorbée est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol, celle-ci est essentiellement régie par l'importance des matériaux argileux. La valeur au bleu de méthylène VBS est calculée suivant la relation ci-après.

$$VBS = V \times C \times \frac{1 + w}{m_1}$$

avec :

- V volume de solution de bleu injecté (en centimètres cubes)
- m₁ masse humide de la prise d'essai (en grammes)
- w teneur en eau de la prise d'essai (fraction 0/5 mm)
- C proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 du sol sec.

Annexe 18 : Eléments de détermination de la granulométrie par tamisage et par sédimentométrie.

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la distribution pondérale de la taille des particules d'un sol. Elle est réalisée par tamisage pour les éléments du sol de dimension supérieure à $80\mu\text{m}$, par sédimentation pour les éléments passants à travers le tamis d'ouverture $80\mu\text{m}$.

Dans le cas de l'analyse granulométrique par tamisage, l'opération consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse de sol connue par brassage sous l'eau. Séché à l'étuve, cet ensemble est ensuite passé dans une série de tamis de mailles d'ouverture décroissante. La masse du refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale de l'échantillon analysé, permettant de tracer la courbe de refus cumulé du sol sur un intervalle [$80\mu\text{m} - D_{\text{max}}$] où D_{max} = diamètre de la particule la plus importante de la prise d'essai.

La méthode d'analyse granulométrique par sédimentation procède à la mise en suspension, dans une solution défloculante, des particules de sol dont le diamètre est inférieur à $80\mu\text{m}$. La vitesse de sédimentation des grains est fonction de leur dimension et la loi de Stokes donne, dans le cas de particules sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des particules et leur vitesse de décantation. En pratique, un densimètre plongé dans la solution permet de suivre au cours du temps l'évolution de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données. Le domaine d'application de la méthode concerne les particules dont le diamètre est compris entre $1\mu\text{m}$ et $80\mu\text{m}$.

Annexe 19 : Coupes lithologiques des sondages T1 à T4 et procès verbaux des essais de VBS et granulométrie établis pour les prises d'essais réalisées sur les tarières T1 à T4 (phase préliminaire de reconnaissance du site expérimental).

ALIOS

SONDAGE T1

Chantier : Site expérimental IUT - Bordeaux I

Client : Université Bx I
 Dossier : D99/B366

Localisation

- X :
- Y :
- Z : NGF

Echelle prof. : /

SONDEUSE :

Nappe : /

Récup %	Prof. (m)	NGF (m)	SOLS	E.C.H.	Wnat	% P80	% P2	VBS	Remarques
	2.10		Remblai limono-sableux contenant des débris de construction		13.7 18.6 16.4 21.1				
	3.30		Argile sableuse panachée gris / brun		15.2	54	28	5.6	
	8.10		Calcaire à astéries argileux très altéré - Refus tarière		13.8 24.9 13.2 13.7	80	16	2.4	
			Fin de Sondage						

OUTILS DE FORAGE

Tarière Ø 63 mm	08.10 m

TUBAGES

Aucun	08.10 m

DATES D'EXECUTION

10/12/99	08.10 m

OBSERVATIONS : Sans eau

ALIOS

SONDAGE T2

Chantier : Site expérimental IUT - Bordeaux I

Client : Université Bx I
 Dossier : D99/B366

Localisation

- X :
- Y :
- Z : NGF

Echelle prof. : /

SONDEUSE :

Nappe : eau à 7.50 m.

Récup %	Prof. (m)	NGF (m)	SOLS	PROF. (m)	Wnat	% P 80	% P 2	VBS	Remarques
	0.30		Terre végétale limono-sabieuse						
	1.00		Sable grossier limono-argileux brun	10.5					
	1.90		Sable limoneux brun humide	12.3					
	3.10		Sable grossier limoneux légèrement graveleux brun, humide. Devient légèrement plus argileux à partir de 2.80 m	10.7					
	5.60		Limons sableux fin	5.7					
	6.30		Limons argileux brun	4.2					
	7.30		Argile limoneuse brun / gris à éléments calcaires	10		51	28		
	7.70		Argile brun / gris	20.1					
	12.60		Argile brun / gris à éléments calcaires			58	28	6.2	
	15.00		Calcaire à astéries argileux saturé			58	35	11.1	
			Fin de Sondage						

OUTILS DE FORAGE

Tarière Ø 63 mm	15.00 m

TUBAGES

Aucun	15.00 m

DATES D'EXECUTION

10/12/99	15.00 m

ALIOS

SONDAGE T3

Chantier : Site expérimental IUT Bordeaux I

Localisation

Client : Université Bx I
 Dossier : D99/B366

- X :
 - Y :
 - Z : NGF

Echelle prof. : /

SONDEUSE :

Nappe : /

Récup %	Prof. (m)	NGF (m)	SOLS	COP.	What %	% P 80	% P 2	VBS	Remarques
	0.20								
	1.00		Sable limoneux brun	9.3					
	1.90		Limon sableux brun	14.3				5	
	3.40		Argile limoneuse brune	23					
	7.40		Calcaire argileux altéré à passées argileuses	19.6					
	8.00		Calcaire franc - Refus tarière	12.5	64	26	4.3		
			Fin de Sondage	19.2					
					68	18	2.4		

OUTILS DE FORAGE

Tarière Ø 63 mm	08.00 m

TUBAGES

Aucun	08.00 m

DATES D'EXECUTION

10/12/99	08.00 m

OBSERVATIONS : Sans eau

ALIOS

SONDAGE T4

Chantier : Site expérimental IUT Bordeaux I

Localisation

Client : Université Bx I
Dossier : D99/B366

- X :
- Y :
- Z : NGF

Echelle prof. : /

SONDEUSE :

Nappe : eau à 3.0 m.

Récup %	Prof (m)	NGF (m)	SOLS	FROM	Wnat %	% P 80	% P 2	VBS	Remarques
			Remblai sablo-limono graveleux	7.6					
	1.40			7.6					
	1.90		Sable argilo-limoneux grs / brun	9.2					
			Argile grise	13.8					
	3.20			22.3	88	36	4		
			Sable grossier saturé brun	20.4					
	4.00			15.2					
	4.60		Sable grossier argileux saturé brun	13.8					
			Sable grossier limono-argileux saturé à passées argileuses	12.7					
	7.60				30 / 52	33	3.2		
			Argile grise sableuse		68	41	4.4		
	10.60								
			Calcaire à astéries argileux altéré						
	15.00		Fin de Sondage						

OUTILS DE FORAGE

Tarière Ø 63 mm	15.00 m

TUBAGES

Aucun	15.00 m

DATES D'EXECUTION

10/12/99	15.00 m

CEMAGREF
Groupement de BORDEAUX

ESSAIS AU BLEU

Laboratoire de
MECANIQUE DES SOLS

Date d'impression : 24/ 3/ 2000

Nom du site : IUT

No.	Sond	Profondeur (metres)		Type de pass (mm)	% elems < 2 μ	P ss (g)	V bli (cm3)	V eau (cm3)	Val de bl. (g)	Sur sp (m2/g)	Act.bl. f<2 μ (%)
1	T 1	2.10	3.30	5.000	29.00	86	485	500	5.6	118	19.45
2	T 1	3.30	8.10	5.000	17.00	88	215	500	2.4	51	14.37
3	T 2	5.60	6.30	5.000	28.00	77	475	500	6.2	129	22.03
4	T 2	7.70	12.60	5.000	34.50	62	690	500	11.1	233	32.26
5	T 3	1.00	1.90	5.000	28.20	77	385	500	5.0	105	17.73
6	T 3	1.90	3.40	5.000	28.20	85	365	500	4.3	90	15.23
7	T 3	3.40	7.40	5.000	18.50	45	110	500	2.4	51	13.21
8	T 4	1.90	3.20	5.000	37.30	40	160	500	4.0	84	10.72
9	T 4	4.60	7.60	5.000	33.00	39	125	500	3.2	67	9.71
10	T 4	7.60	10.60	5.000	41.00	35	310	500	8.2	185	21.60
11	T 2 3	3.10	5.70	5.000	28.00	80	355	500	4.4	93	15.85

N°So	Prof	coup	Pds humide	Pds sec	Teneur en eau	Nature du sol , observations
T1	0,50m	28	180,08	170,06	13,66	
T1	1,00m	78	216,81	197,71	18,61	
T1	1,50m	66	190,81	180,26	16,43	
T1	2,00m	16	181,94	165,79	21,14	
T1	2,50m	40	160,52	152,51	15,19	
T1	3,50m	1	173,69	164,67	13,77	
T1	3,80m	61	215,93	196,78	24,93	
T1	4,00m	69	153,26	147,70	13,20	
T1	4,50m	90	164,63	156,20	13,66	

T2	0,50m	41	166,92	161,42	10,45	
T2	1,00m	59	170,77	162,05	12,32	
T2	1,50m	62	183,92	174,63	10,65	
T2	2,00m	51	195,41	189,74	5,73	
T2	2,50m	52	211,80	207,05	4,18	
T2	3,00m	72	171,44	164,88	9,97	
T2	3,50m	2	173,56	156,40	20,05	

T3	0,50m	35	169,71	163,50	9,34	
T3	1,00m	33	182,86	171,59	14,28	
T3	1,50m	91	170,32	155,80	23,03	
T3	2,00m	34	178,06	166,18	19,58	
T3	2,50m	55	192,39	181,08	12,50	
T3	3,00m	7	155,95	146,77	19,24	

T4	0,50m	114	216,57	205,39	7,63	
T4	1,00m	36	198,46	191,62	7,63	
T4	1,50m	45	203,19	195,73	9,23	
T4	2,00m	120	145,94	135,45	13,81	
T4	2,50m	129	196,10	171,89	22,26	
T4	3,00m	6	203,17	181,39	20,42	
T4	3,50m	30	228,65	209,91	15,22	
T4	4,00m	19	172,36	161,20	13,83	
T4	4,50m	85	187,61	175,90	12,71	

LABORATOIRE

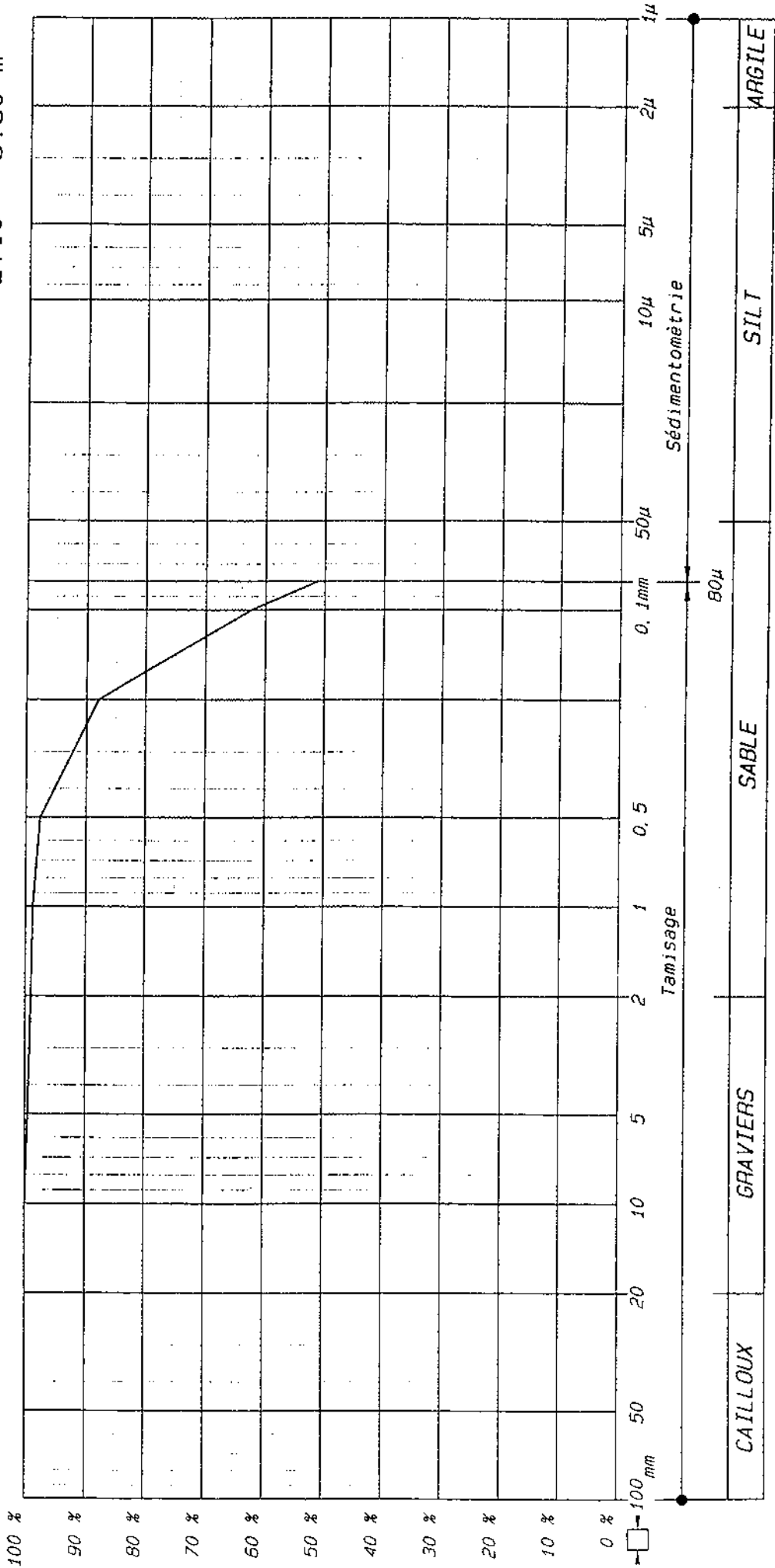
DE

MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 1

Profondeur: 2.10 - 3.30 m



LABORATOIRE

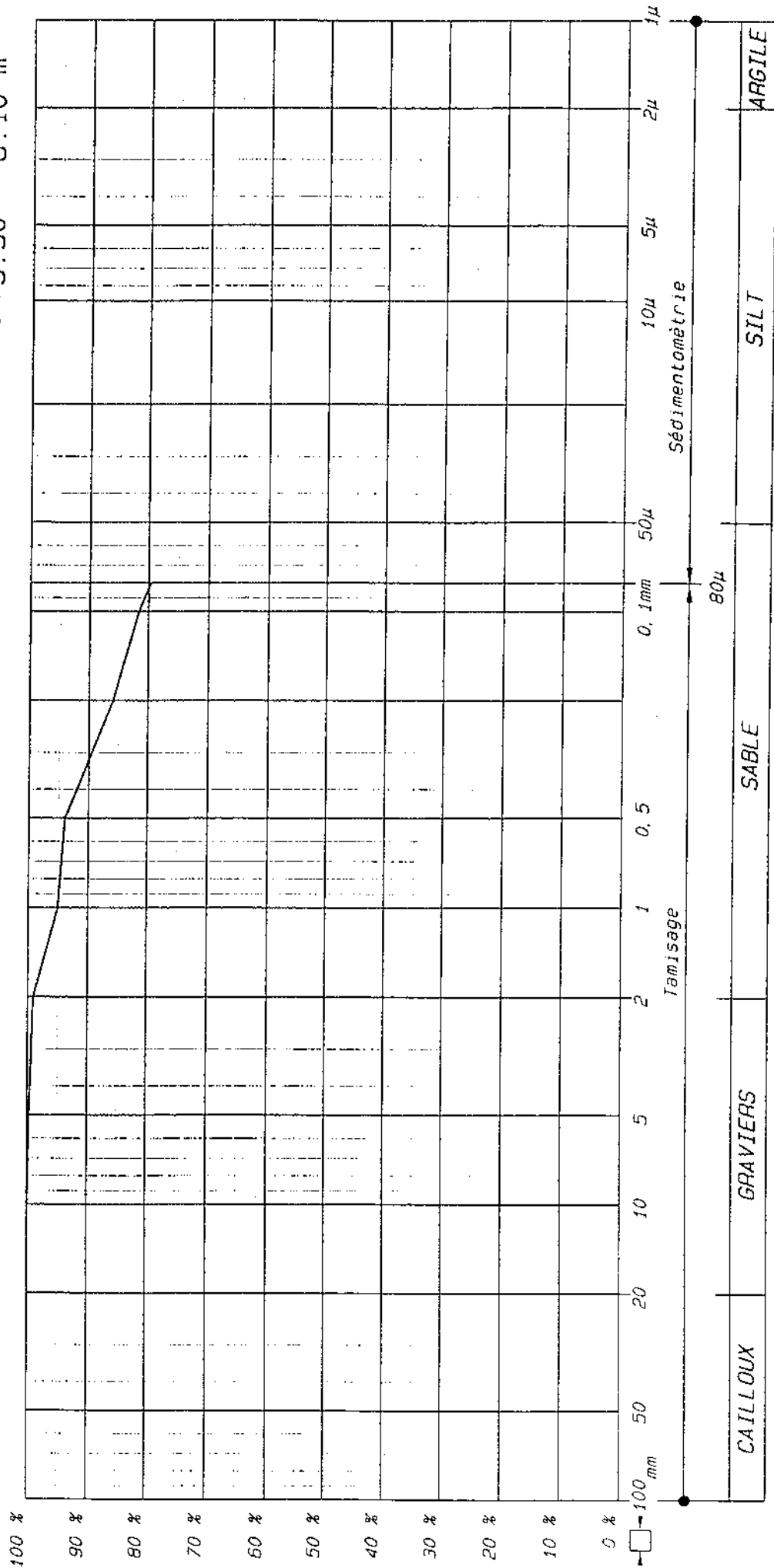
DE

MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 1

Profondeur: 3.30 - 8.10 m



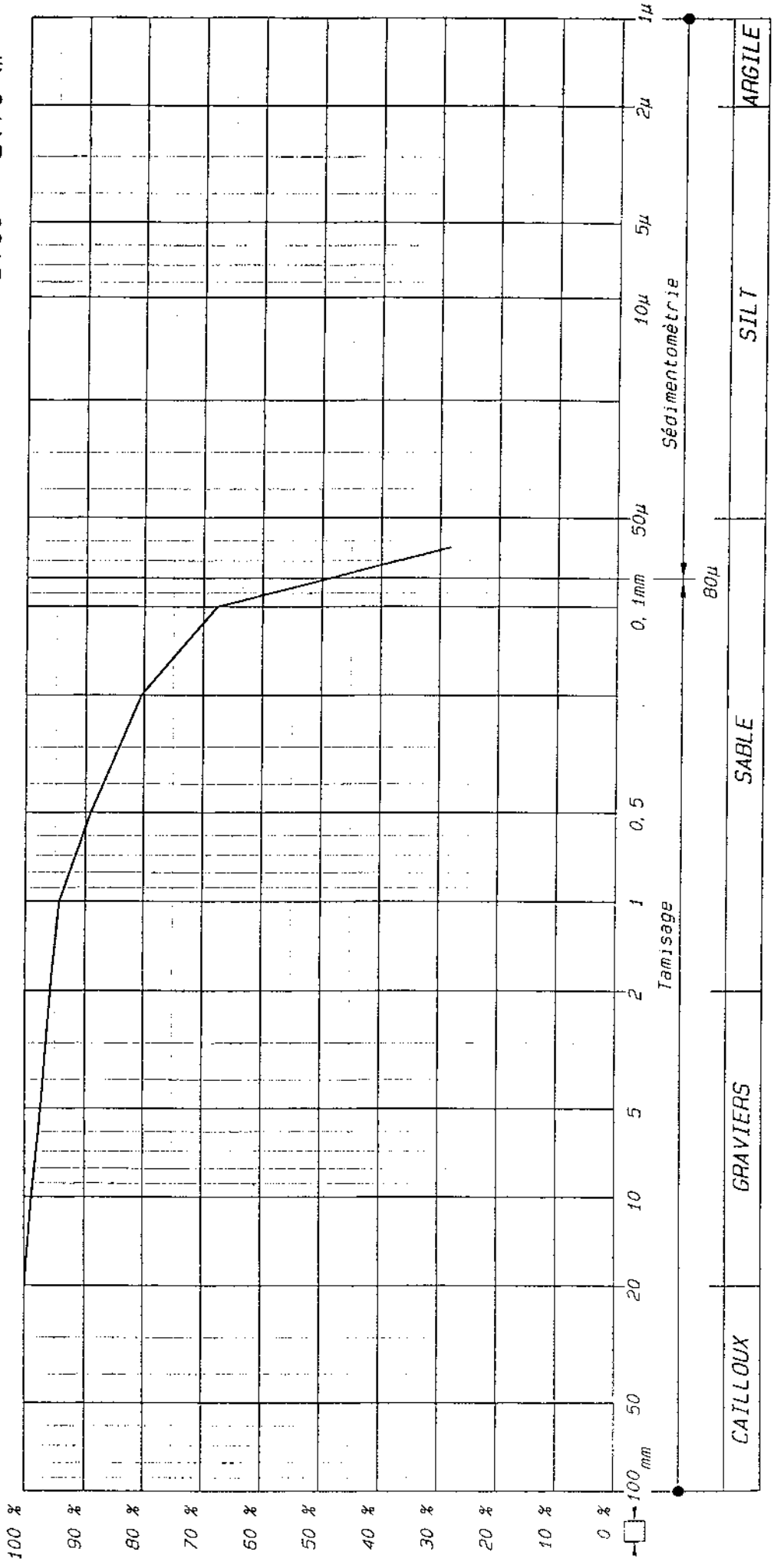
LABORATOIRE
DE

MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 2

Profondeur: 3.10 - 5.70 m



80μ

Sédimentométrie

Tamissage

CAILLOUX	GRAVIERES	SABLE	SILT	ARGILE
----------	-----------	-------	------	--------

LABORATOIRE

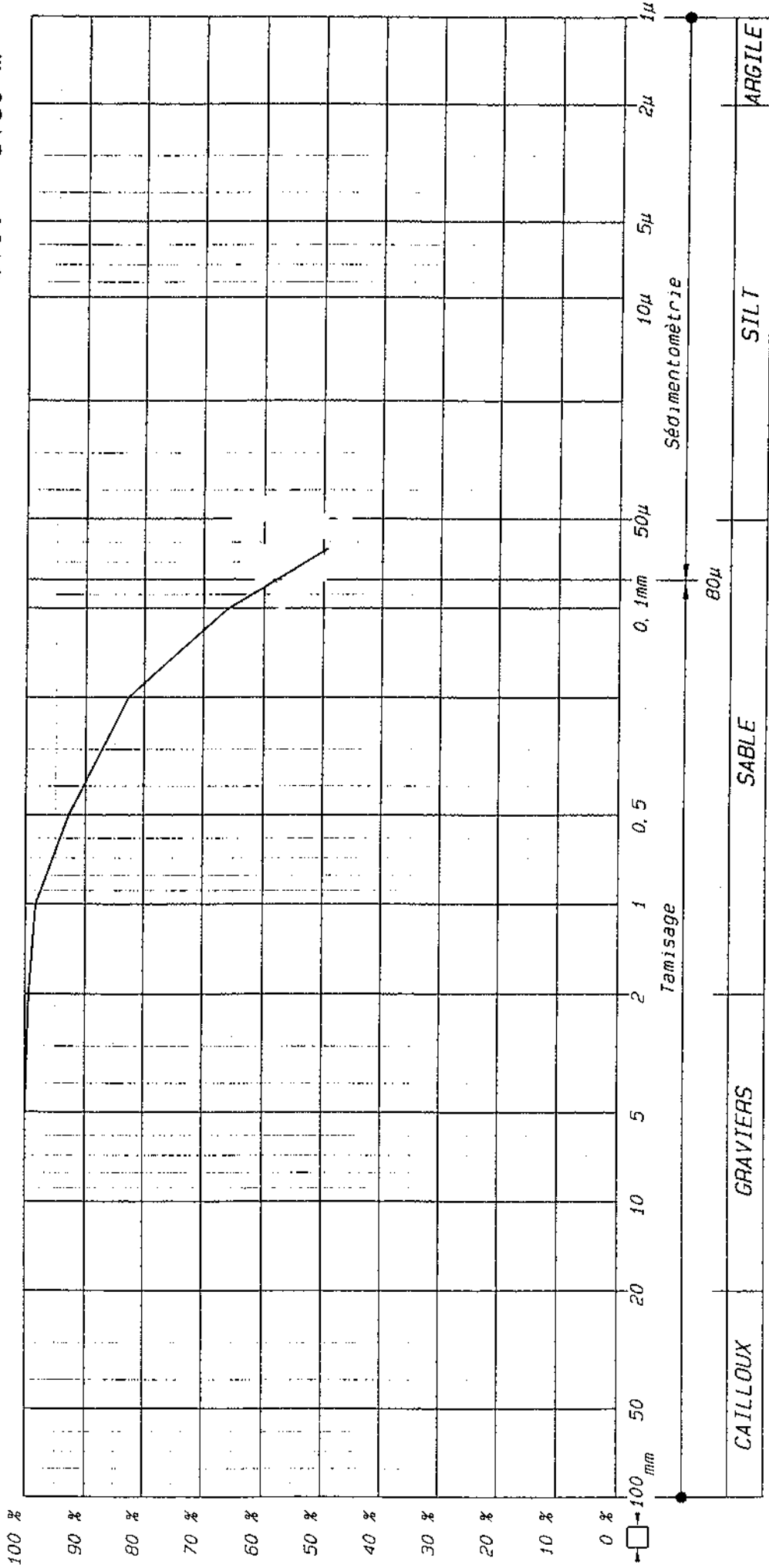
DE

MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 2

Profondeur: 5.60 - 6.30 m



LABORATOIRE

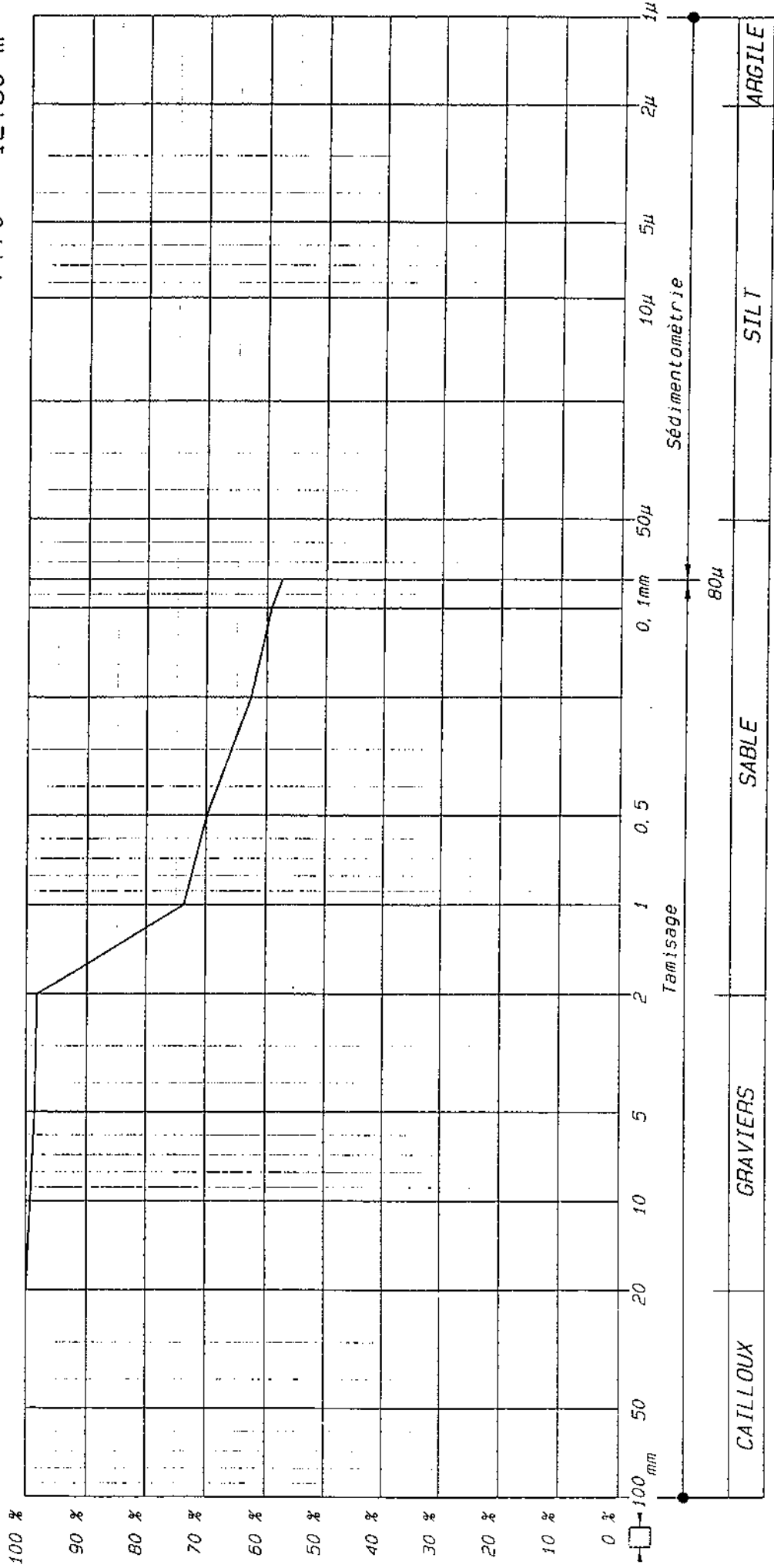
DE

MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 2

Profondeur: 7.70 - 12.60 m



POUR LE DÉTAIL DES POINTS DES ÉLÉMENTS DE DIAMÈTRE INTÉRIEUR À 100 μm...

LABORATOIRE

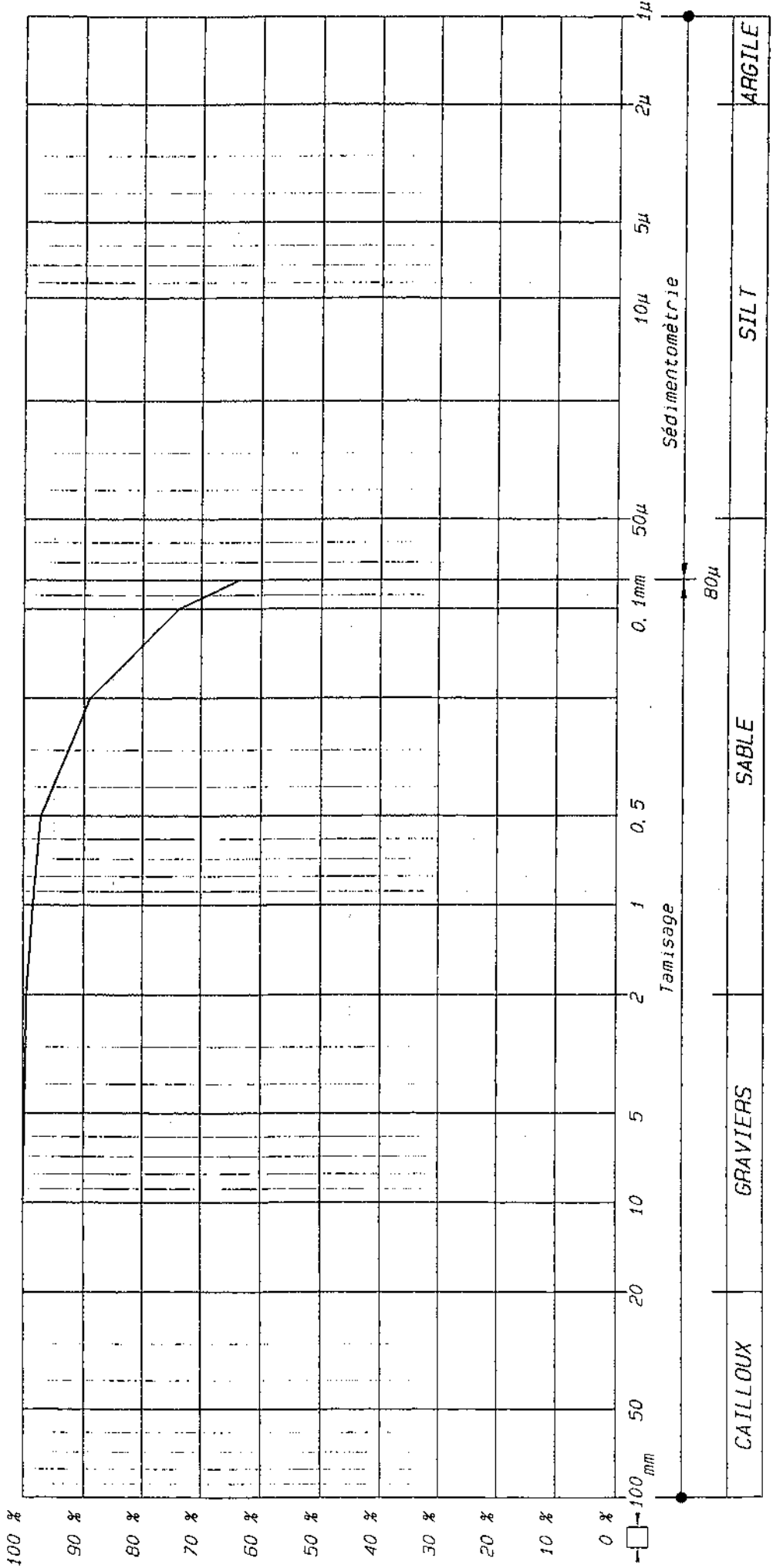
DE

MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 3

Profondeur: 1.90 - 3.10 m



CAILLOUX GRAVIERES SABLE SILT ARGILE

LABORATOIRE

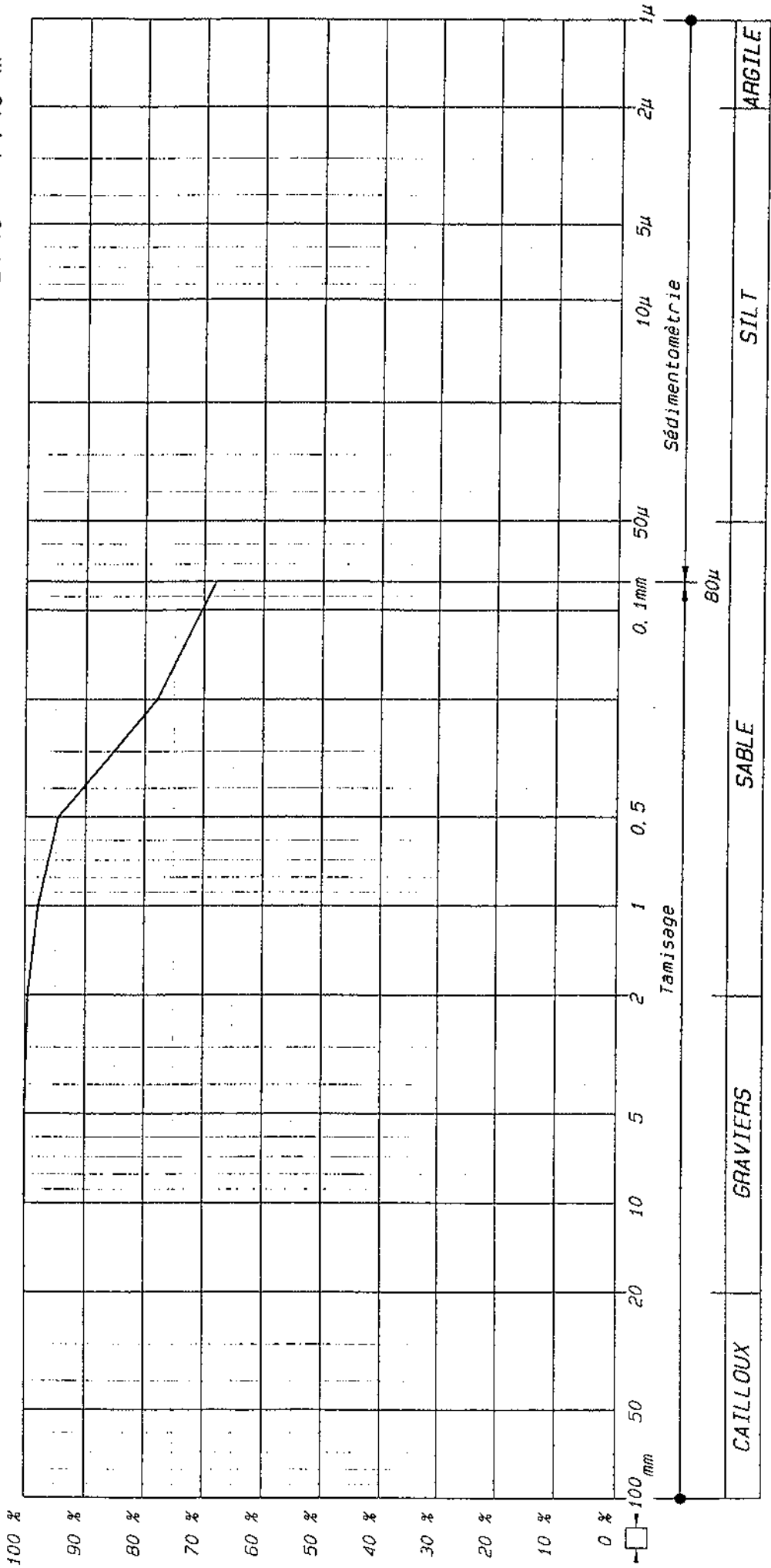
DE

MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 3

Profondeur: 3.40 - 7.40 m



80µ

CAILLOUX GRAVIERES SABLE SILT ARGILE

POUR LE CLASSEMENT EN CLASSE DES SOLS, LES ELEMENTS DE DIAMETRE INFERIEUR A 2 MICROMETRES SONT CONSIDERES COMME DE L'ARGILE.

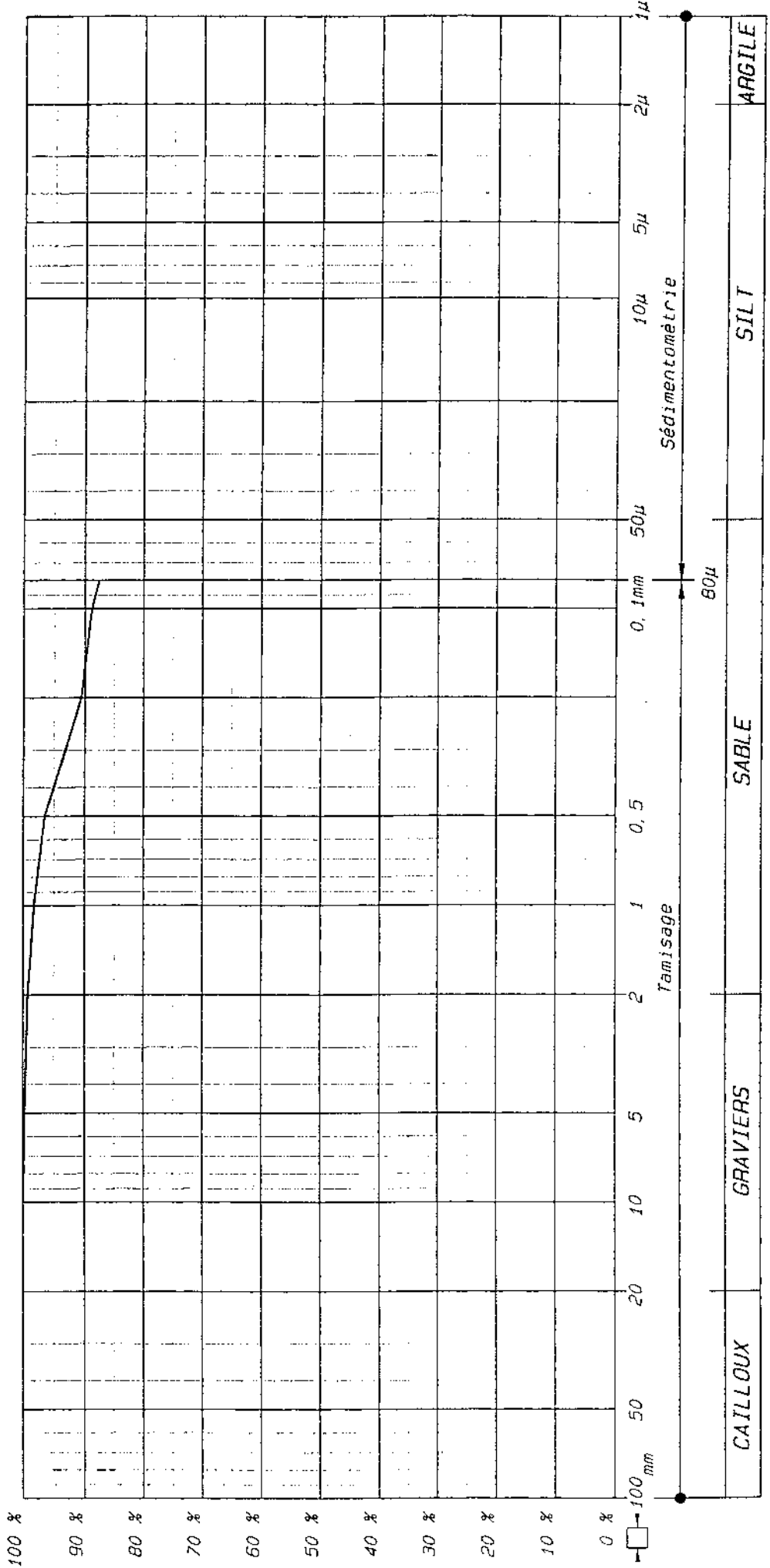
LABORATOIRE

DE
MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 4

Profondeur: 1.90 - 3.20 m



CAILLOUX

GRAVIERS

SABLE

SILT

ARGILE

LABORATOIRE

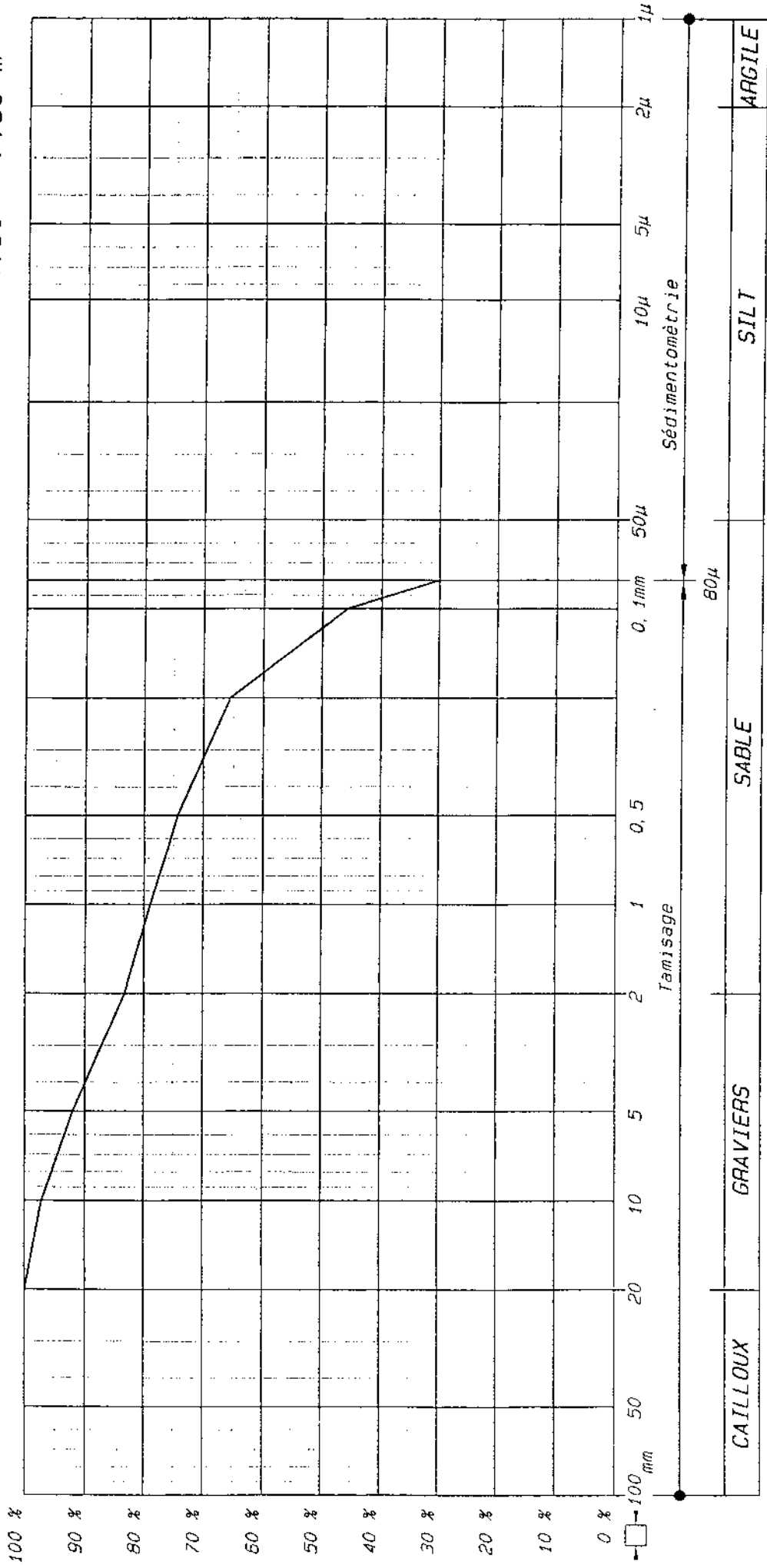
DE

MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 4

Profondeur: 4.60 - 7.60 m



LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

DOSSIER : IUT

Sondage : T 4

Profondeur: 7.60 - 10.60 m

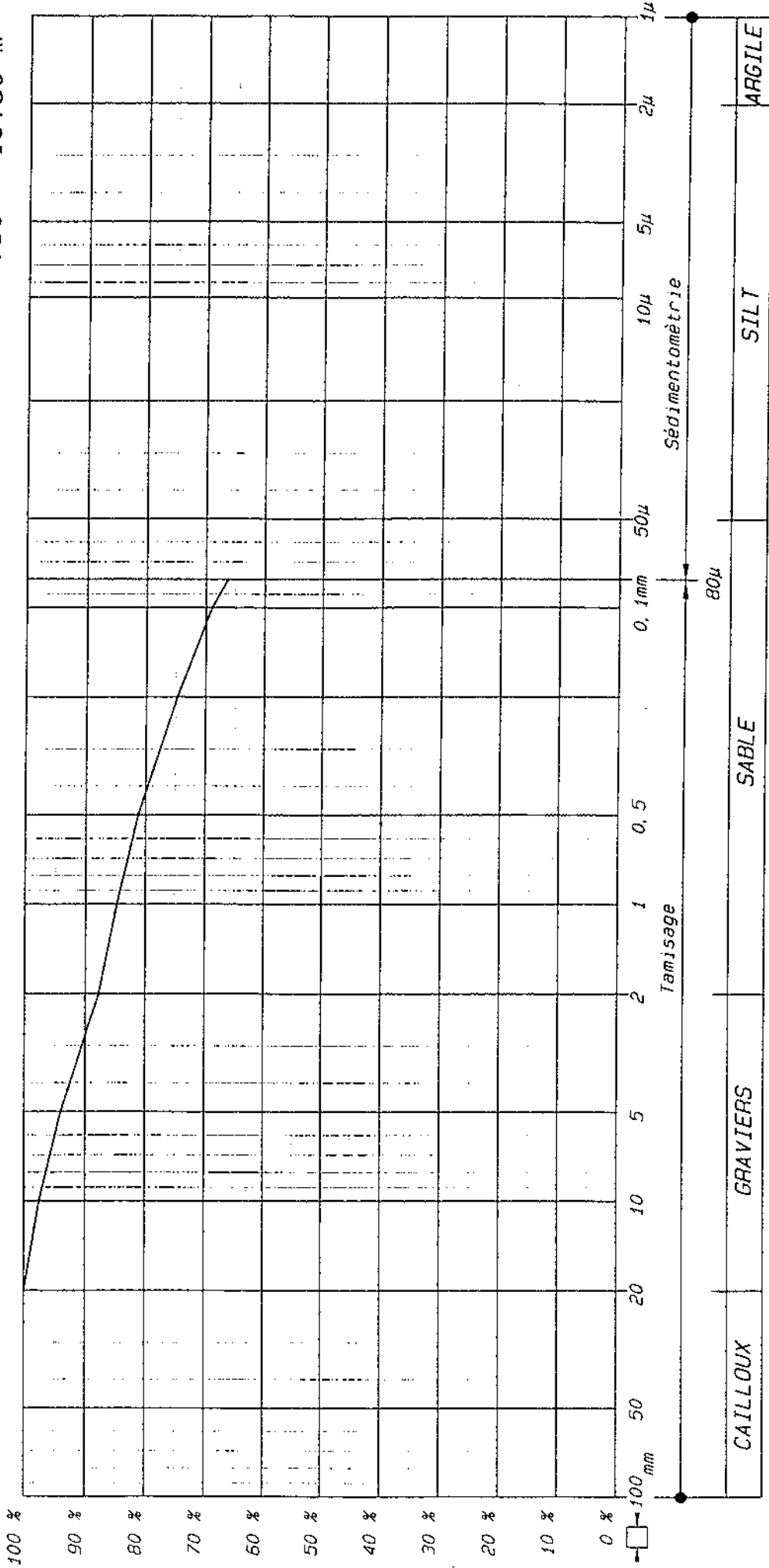


Diagramme de granulométrie montrant le pourcentage des éléments de diamètre inférieur à l'abscisse.

**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

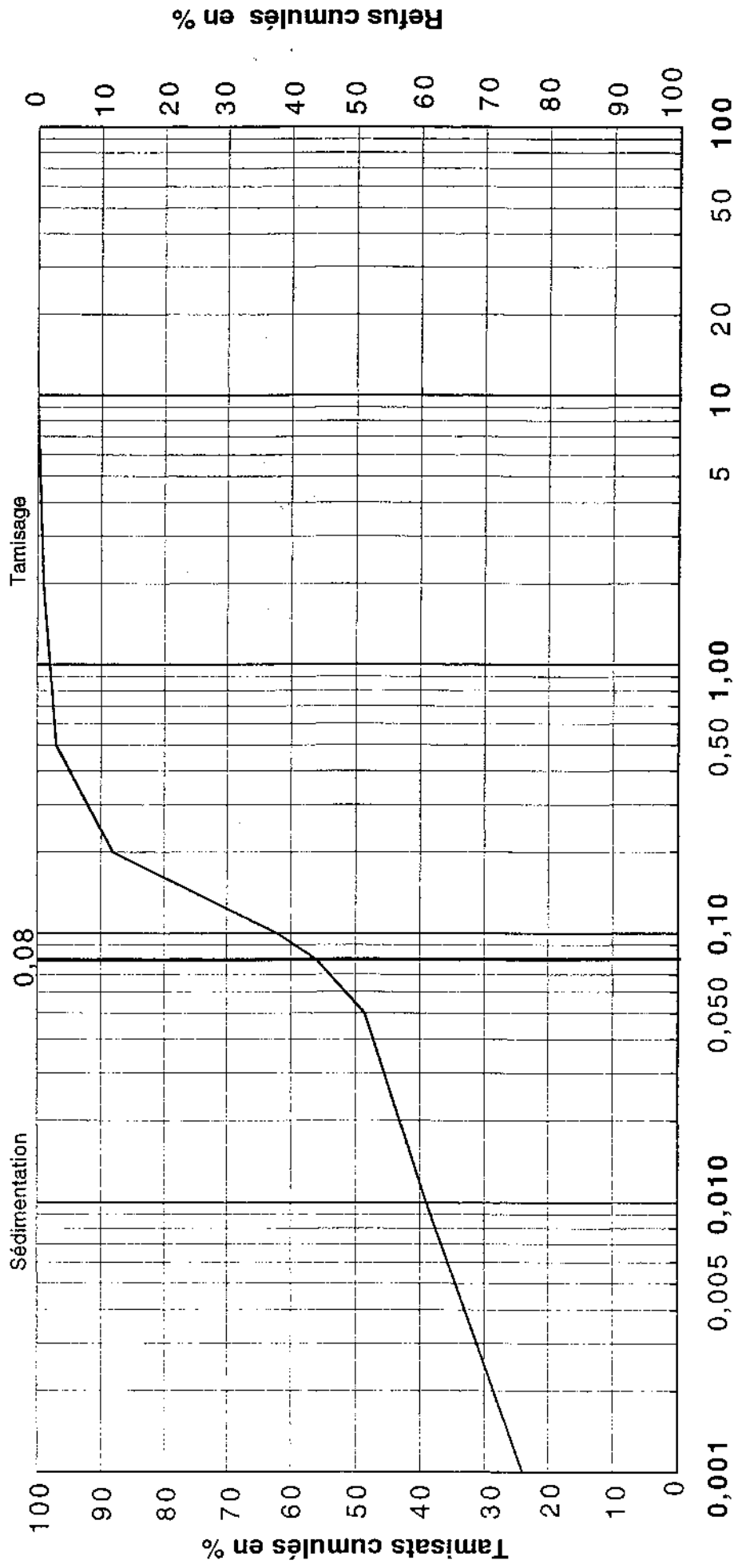
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 1

Profondeur en m : 2,10-3,30

le : 17/02/00



Ouverture nominale des tamis à maille carrée en mm

**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

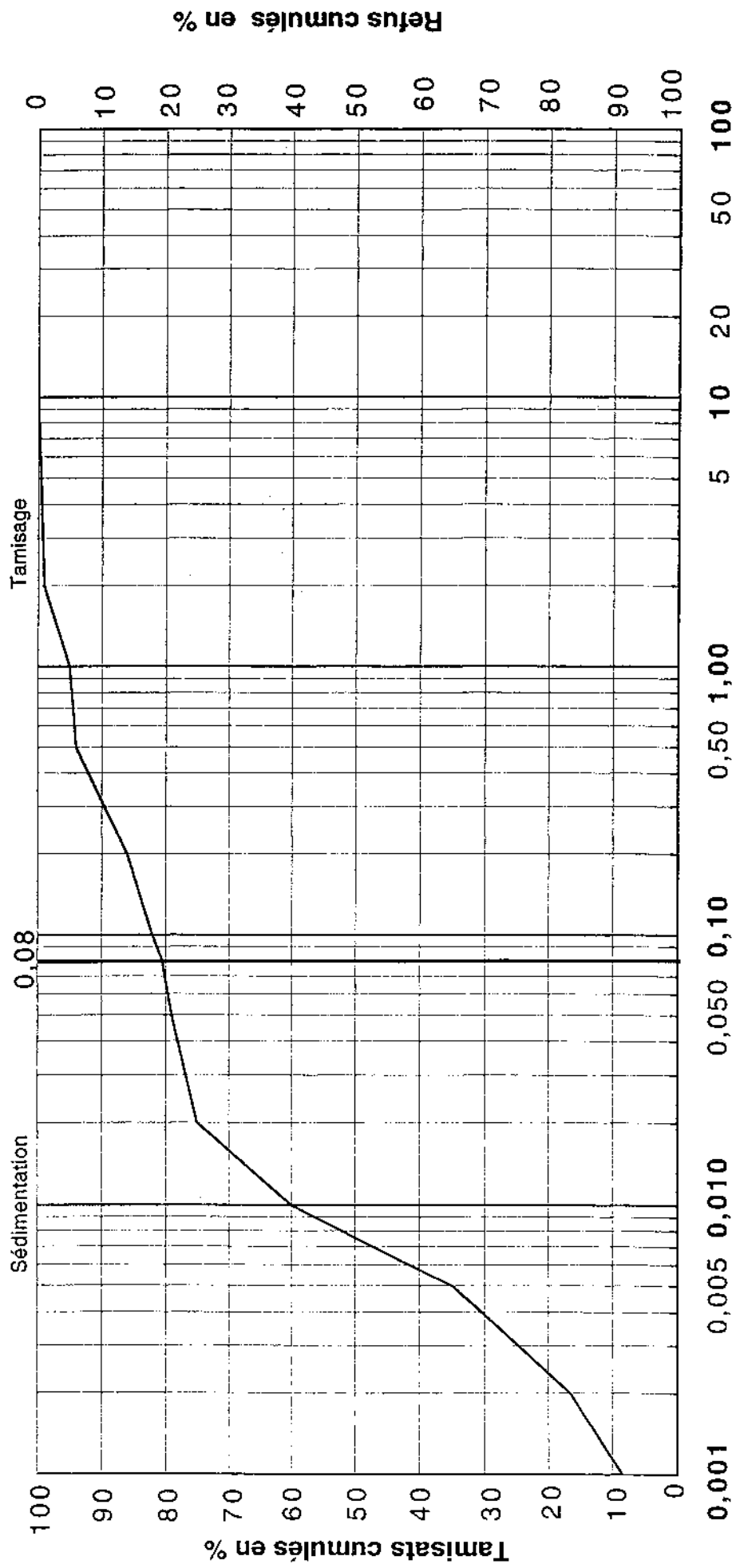
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 1

Profondeur en m : 3,30-8,10

le : 17/02/00



Ouverture nominale des tamis à maille carrée en mm

**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

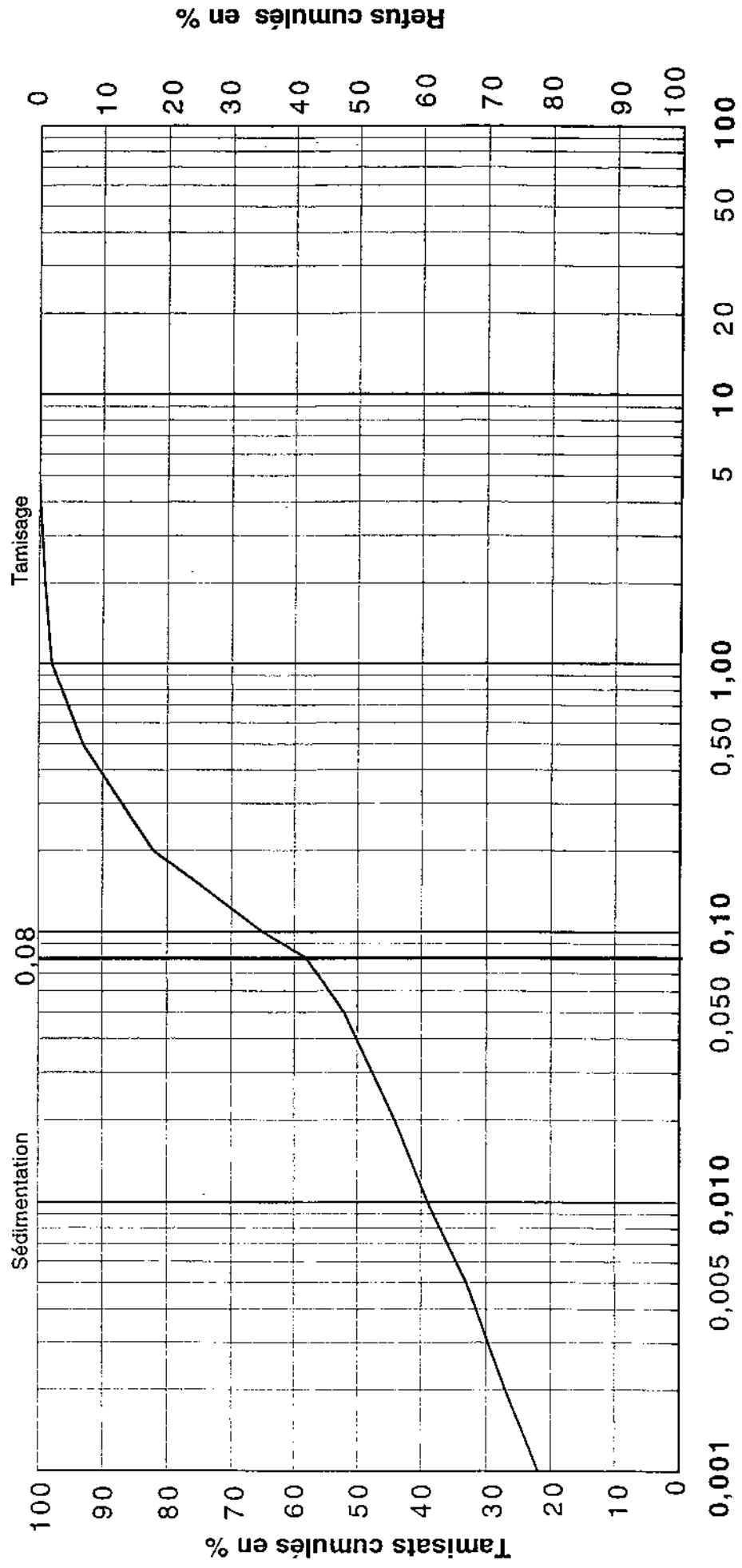
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 2

Profondeur en m : 5,60-6,30

le : 17/02/00



Ouverture nominale des tamis à maille carrée en mm

**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

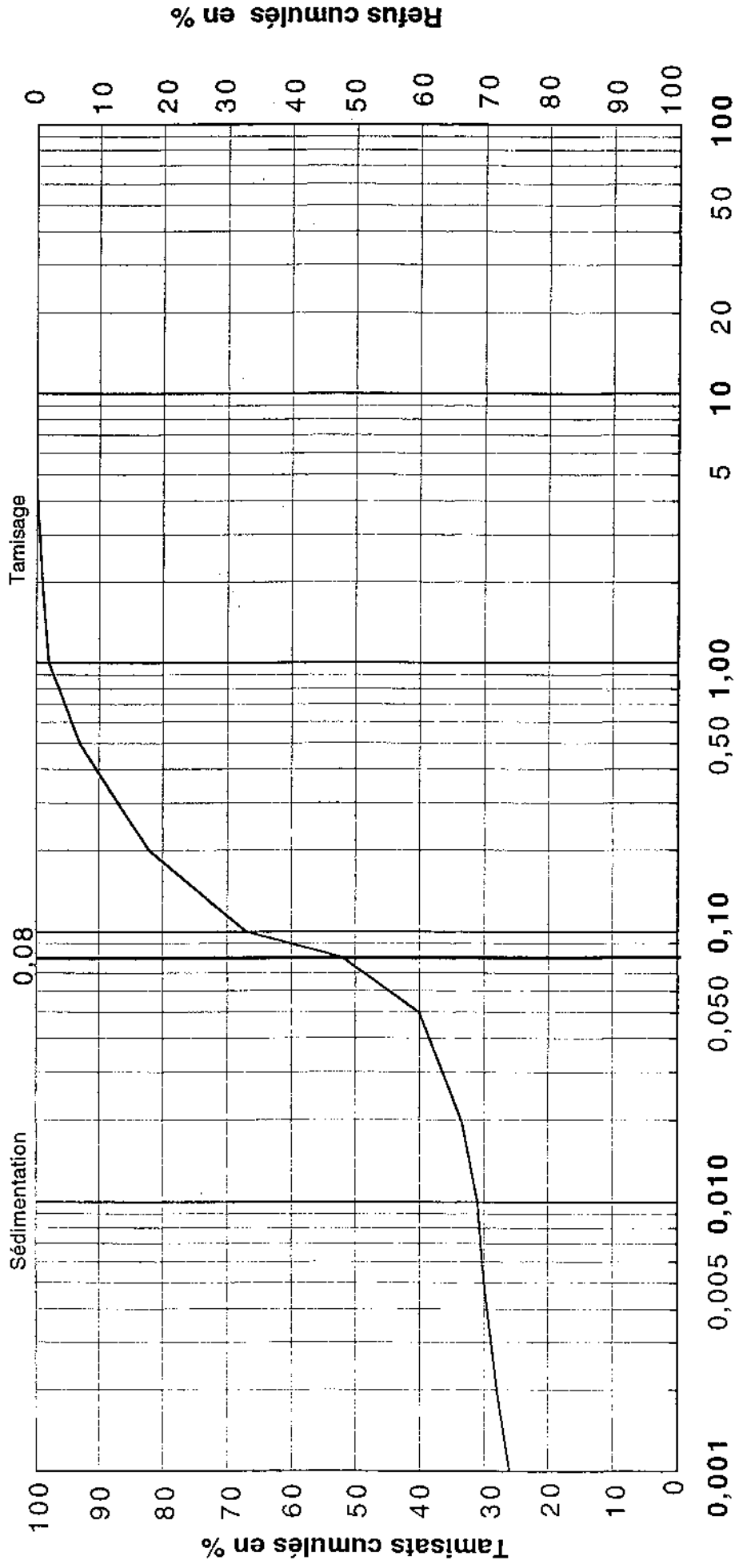
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 21

Profondeur en m : 3,10-5,70

le : 02/03/00



Ouverture nominale des tamis à maille carrée en mm

**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

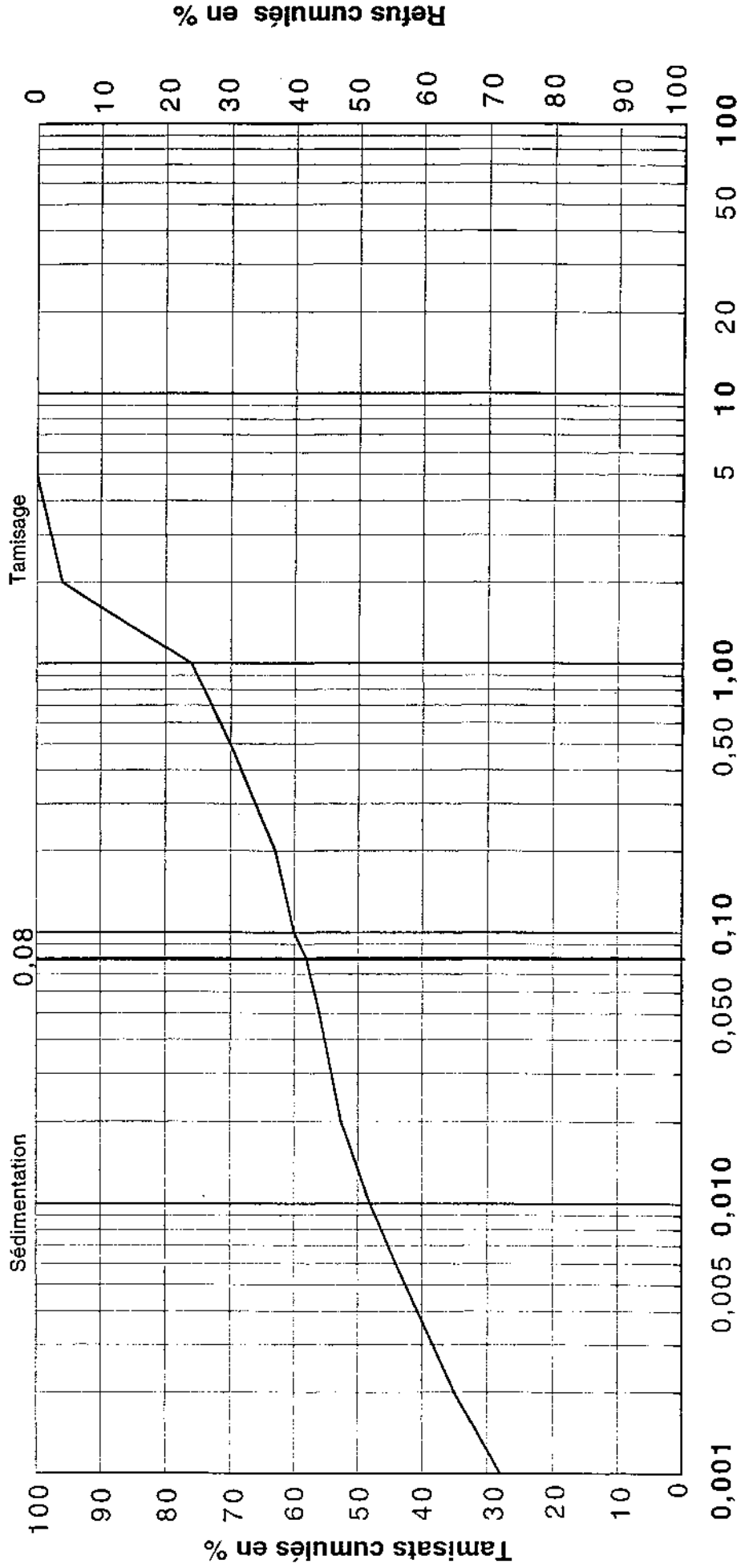
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 2

Profondeur en m : 7,70-12,60

le : 14/03/00



Ouverture nominale des tamis à maille carrée en mm

**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

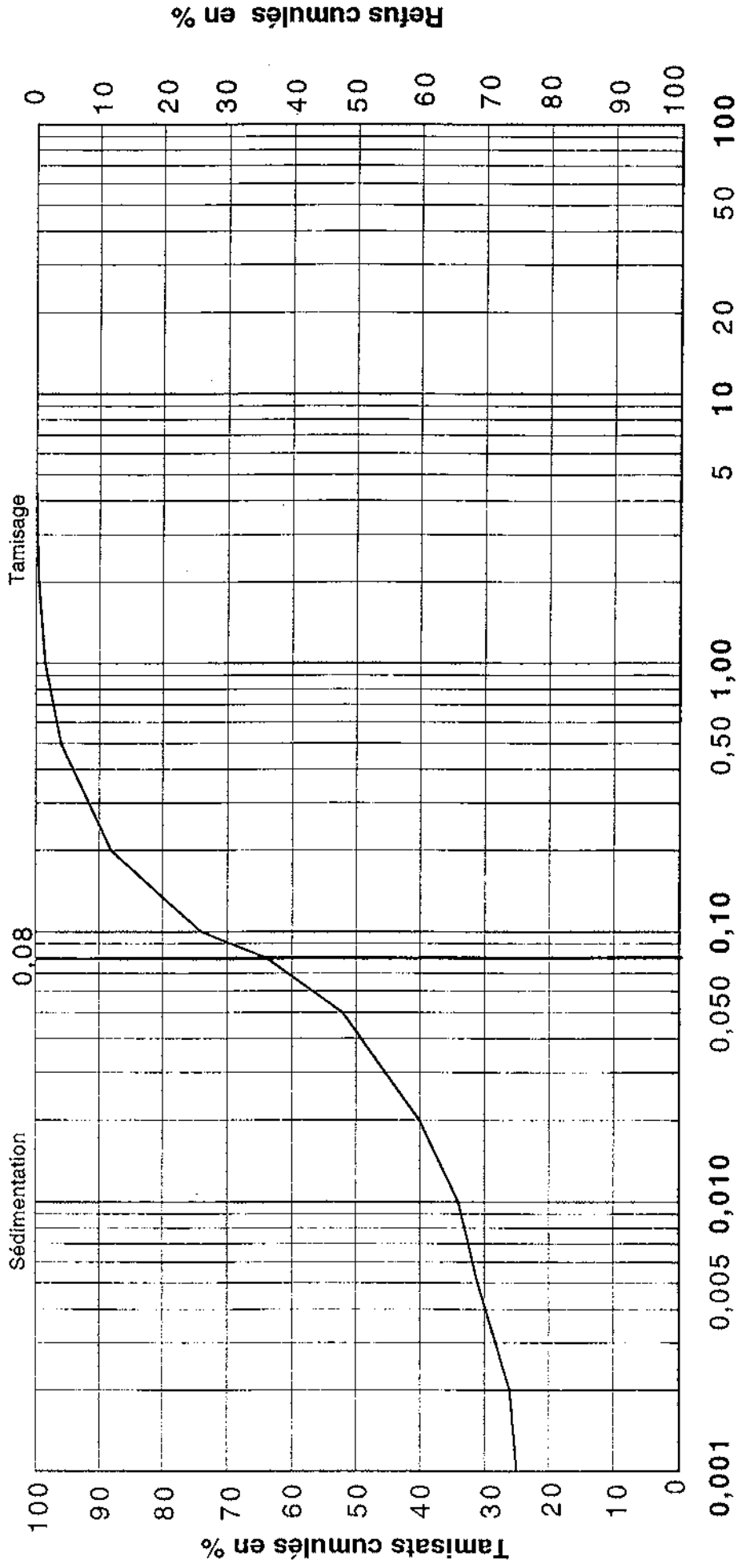
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 3

Profondeur en m : 1,90-3,10

le : 10/03/00



Ouverture nominale des tamis à maille carrée en mm

**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

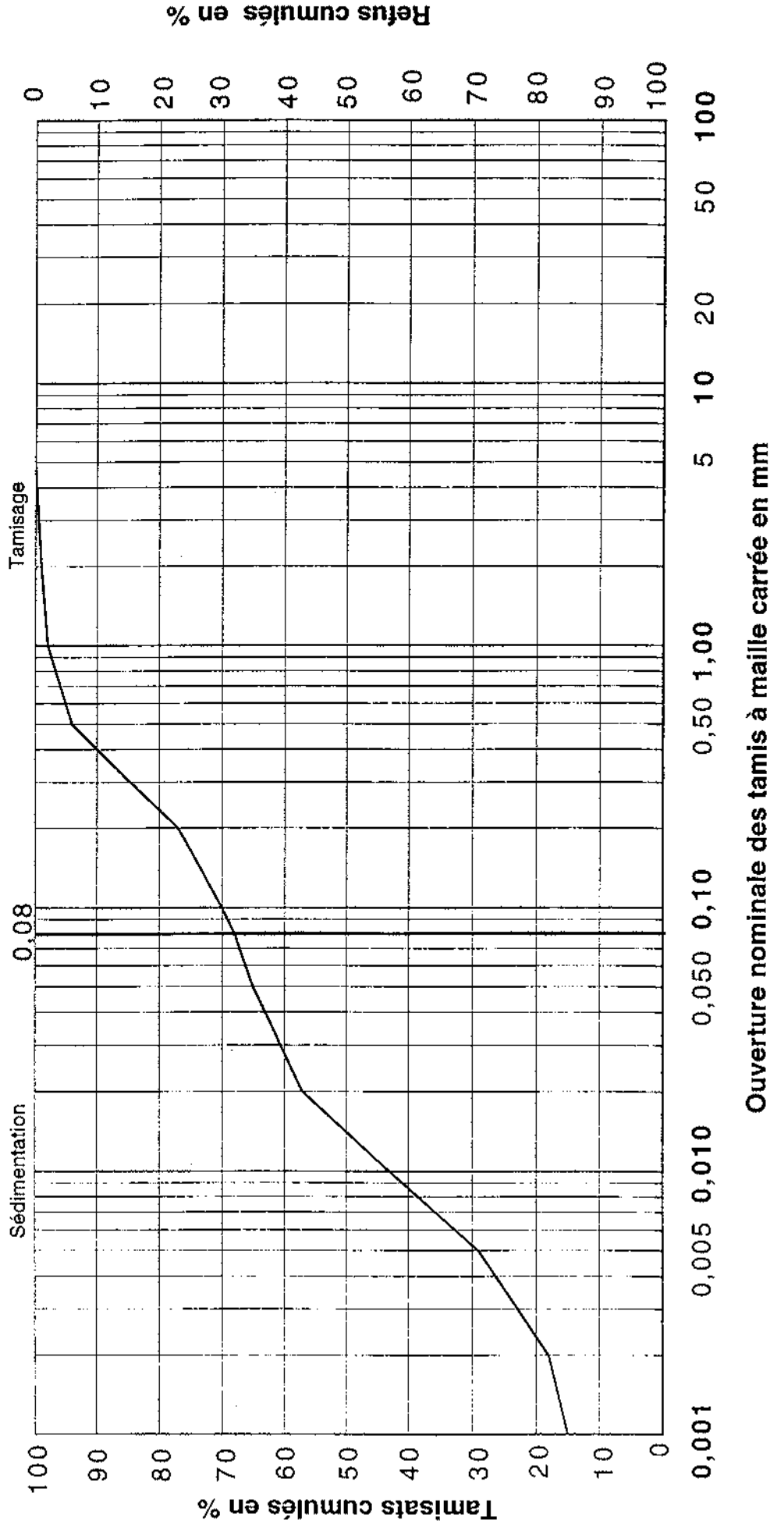
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 3

Profondeur en m : 3,40-7,40

le : 06/03/00



**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

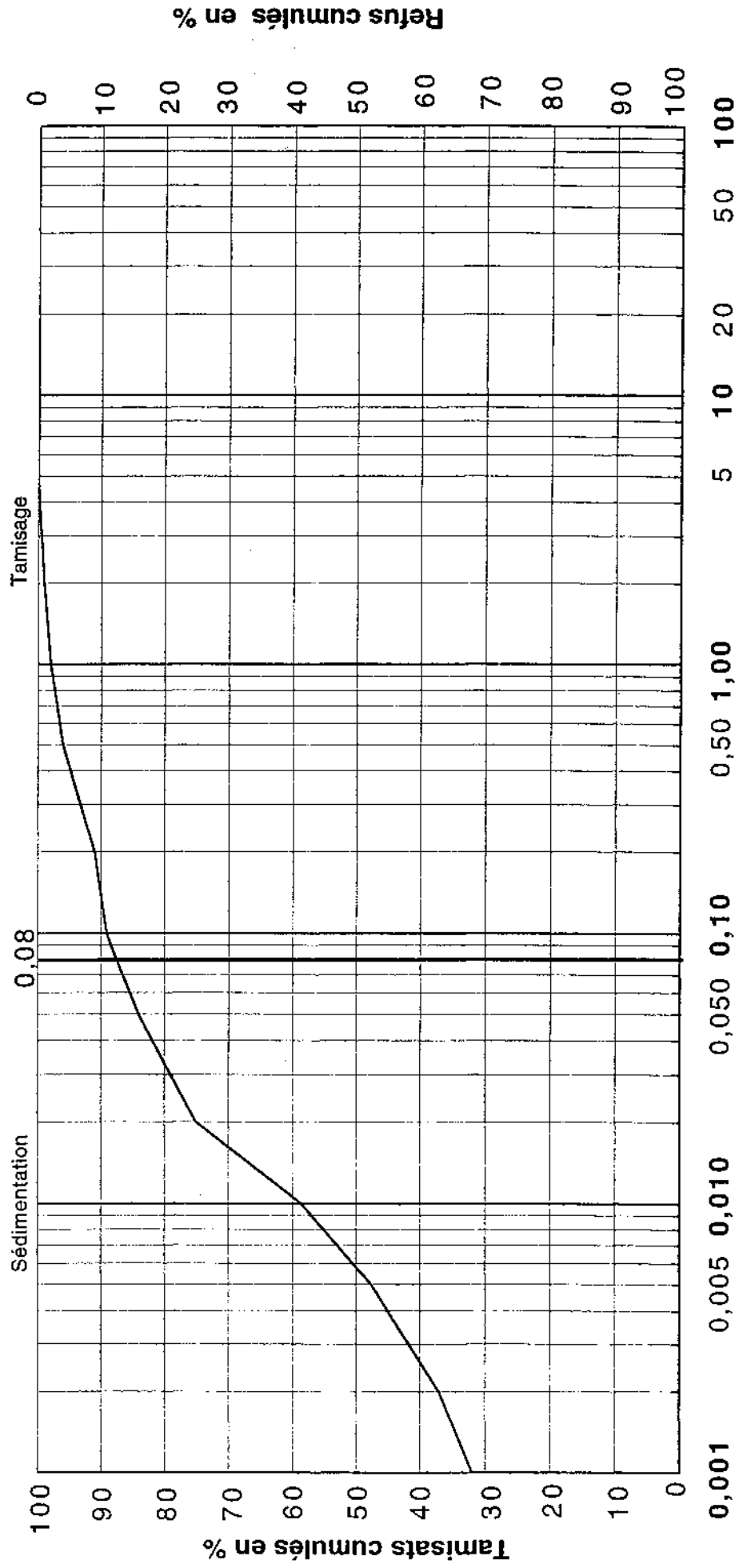
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 4

Profondeur en m : 1,90-3,20

le : 14/03/00



Ouverture nominale des tamis à maille carrée en mm

**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

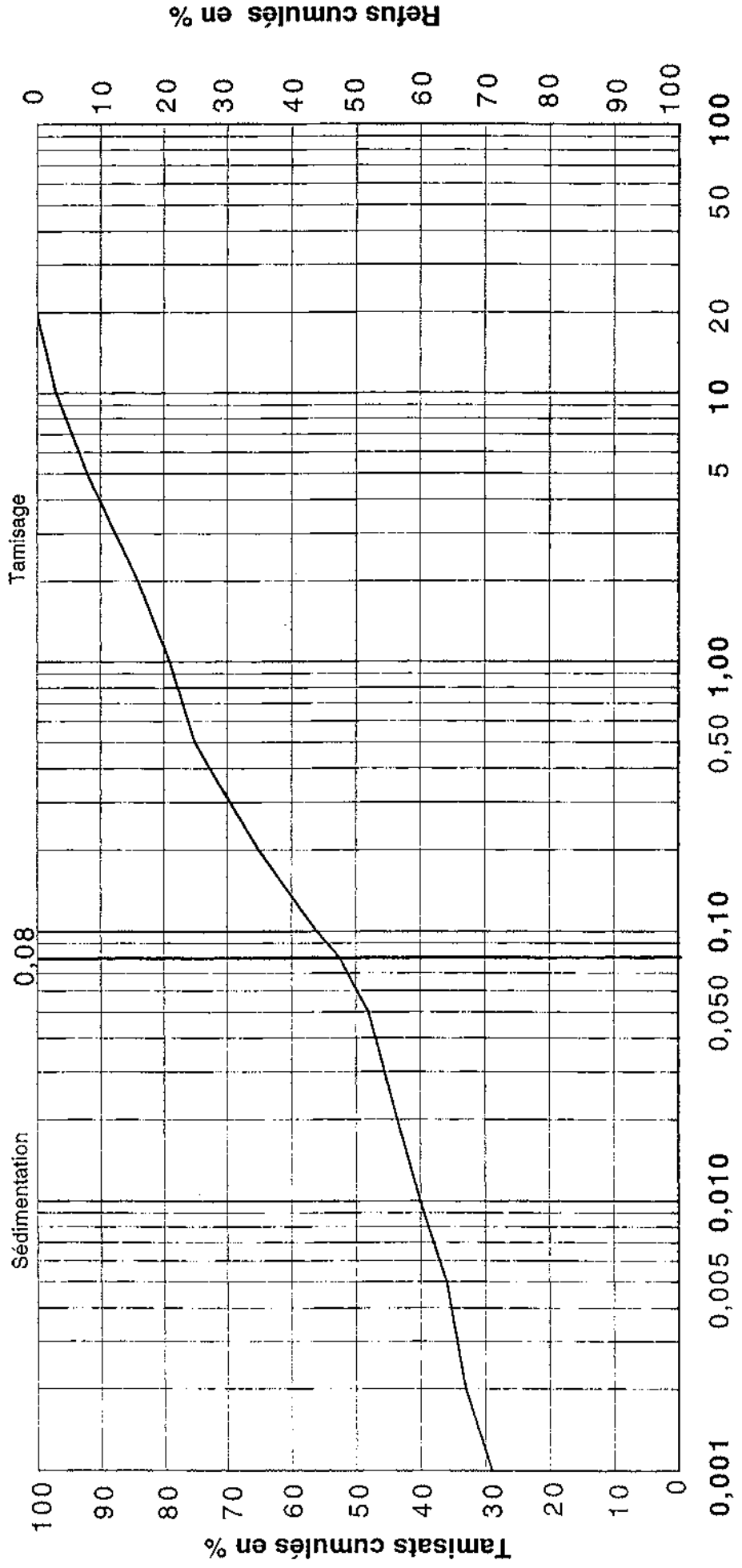
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 4

Profondeur en m : 4,60-7,60

le : 14/03/00



Ouverture nominale des tamis à maille carrée en mm

**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
ET SÉDIMENTATION**

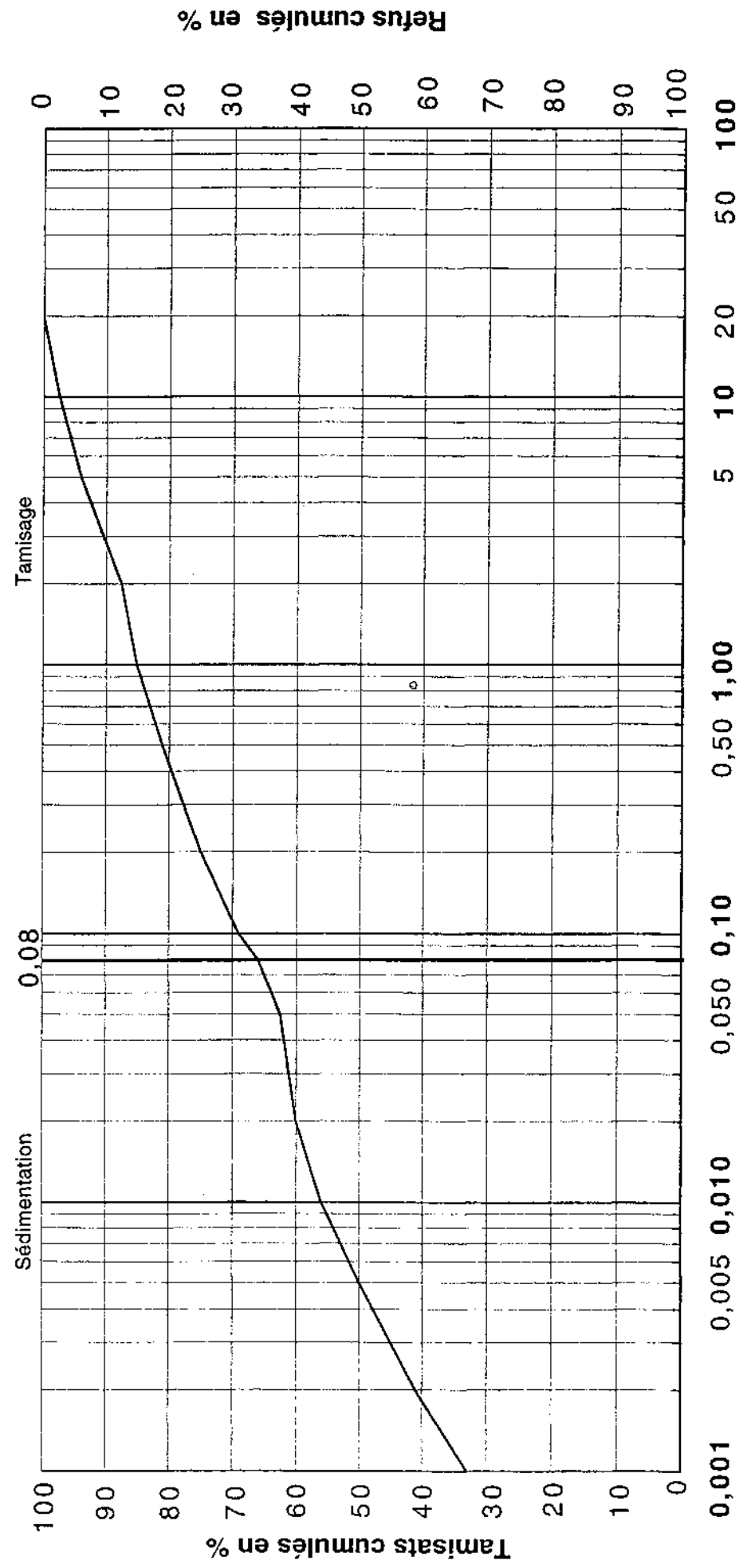
Norme NF P 94-056 et NF P 94-057

DOSSIER : IUT de Bordeaux (33)

Sondage : T 4

Profondeur en m : 7,60-10,60

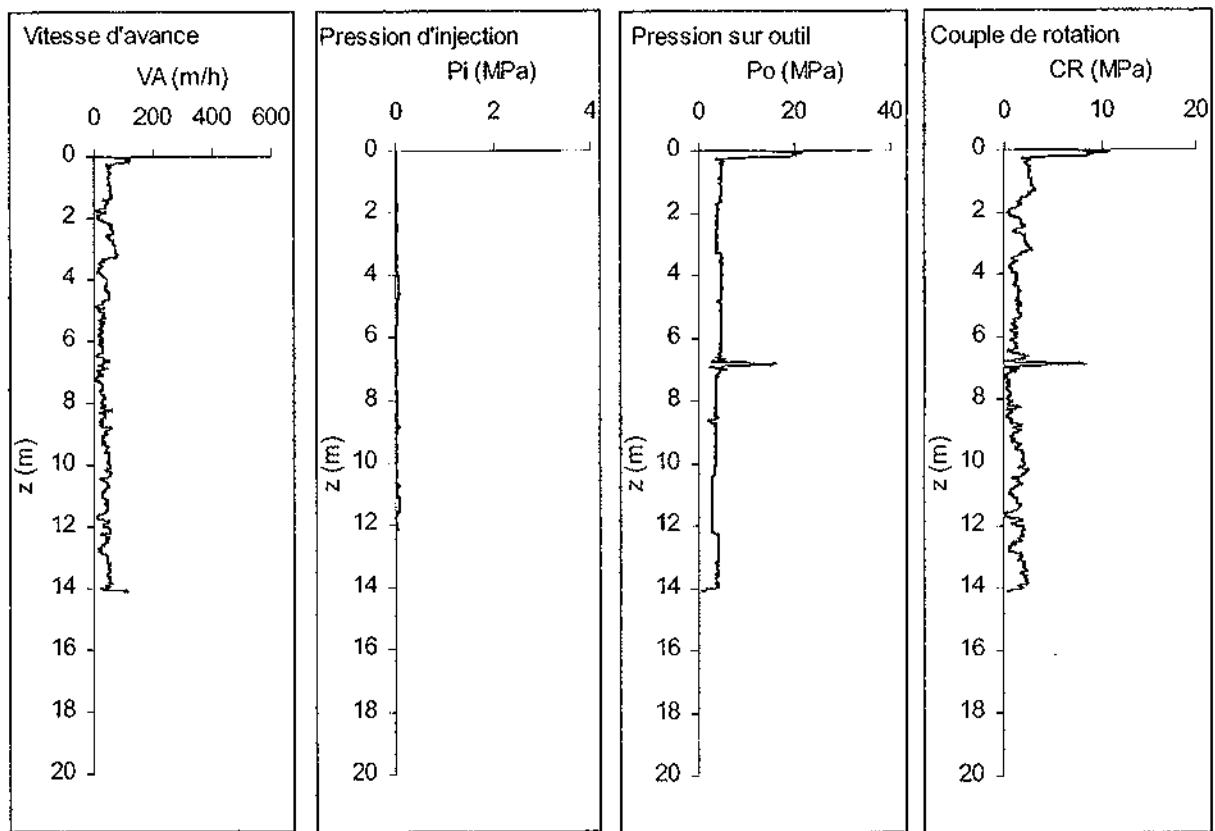
le : 14/03/00



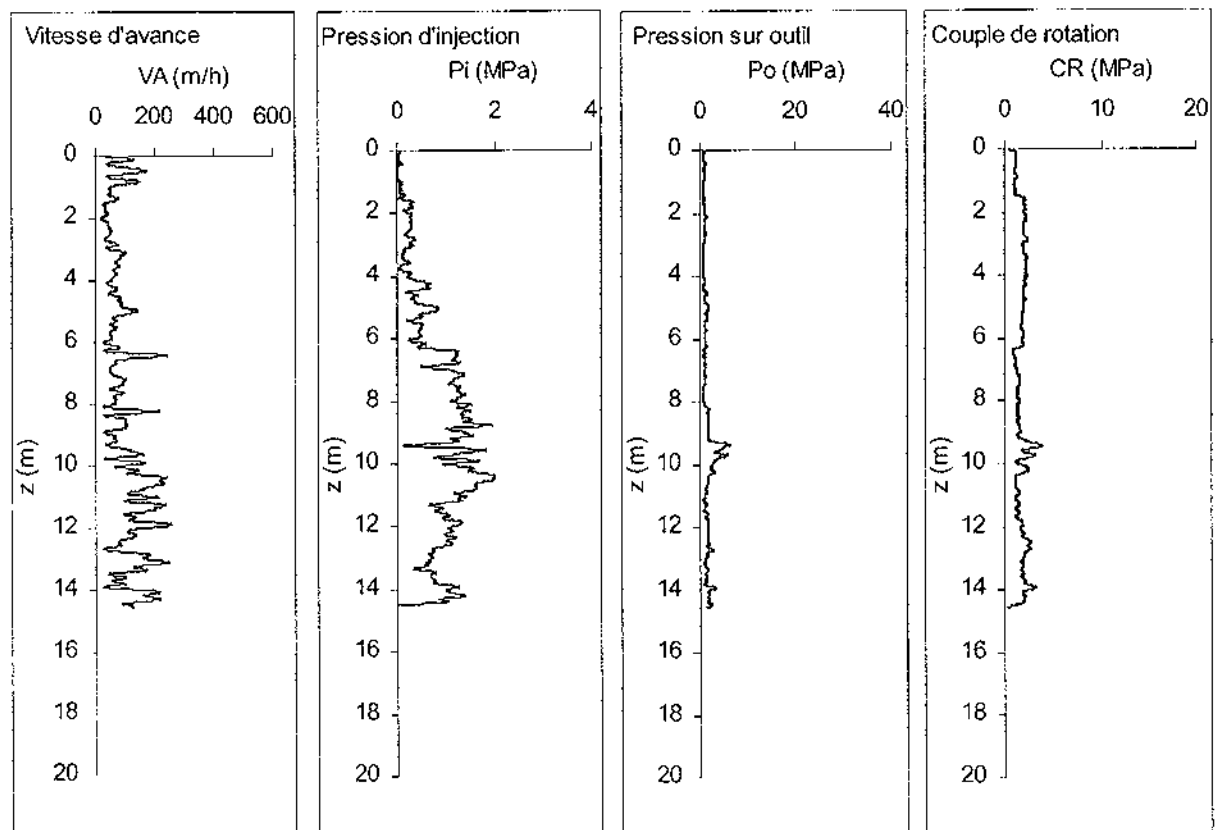
Ouverture nominale des tamis à maille carrée en mm

Annexe 20 : Log. diagraphiques (données filtrées) et log. pressiométriques obtenus lors de la reconnaissance du site expérimental de l'IUT.

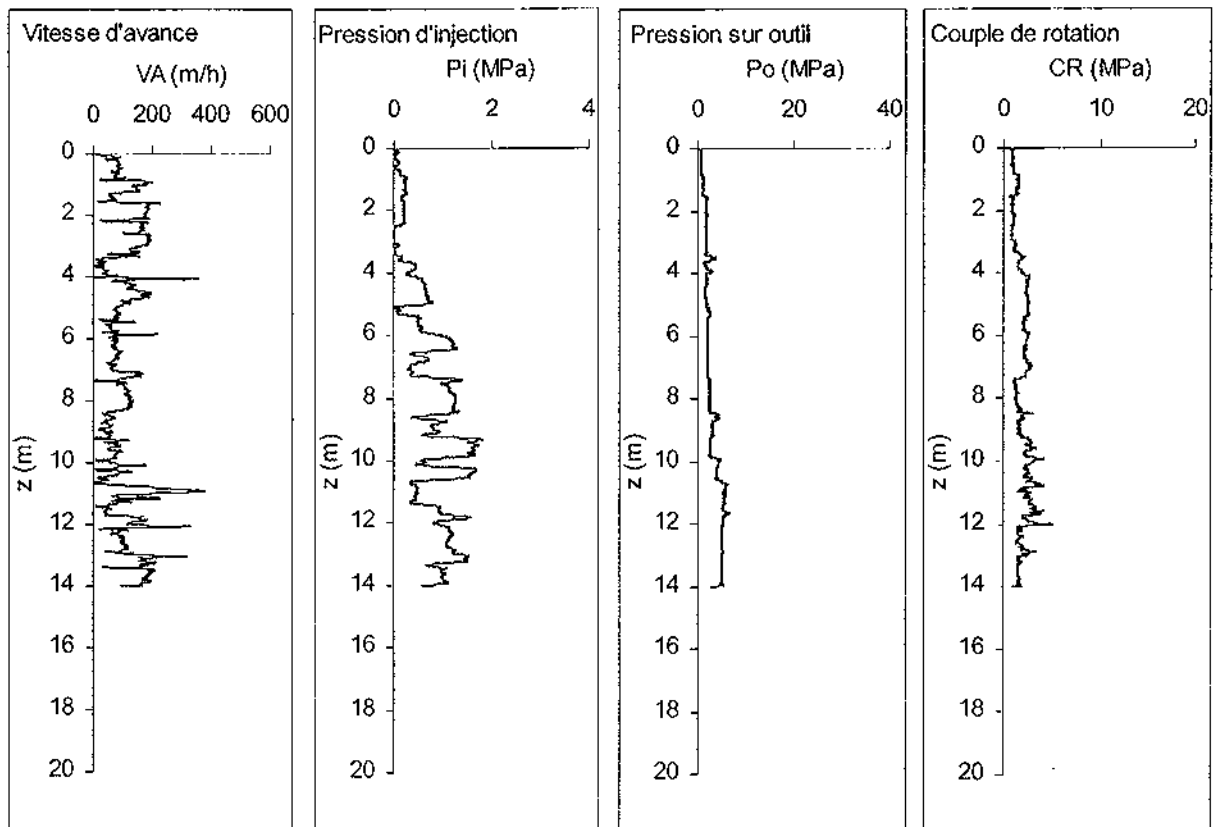
Forage SP1



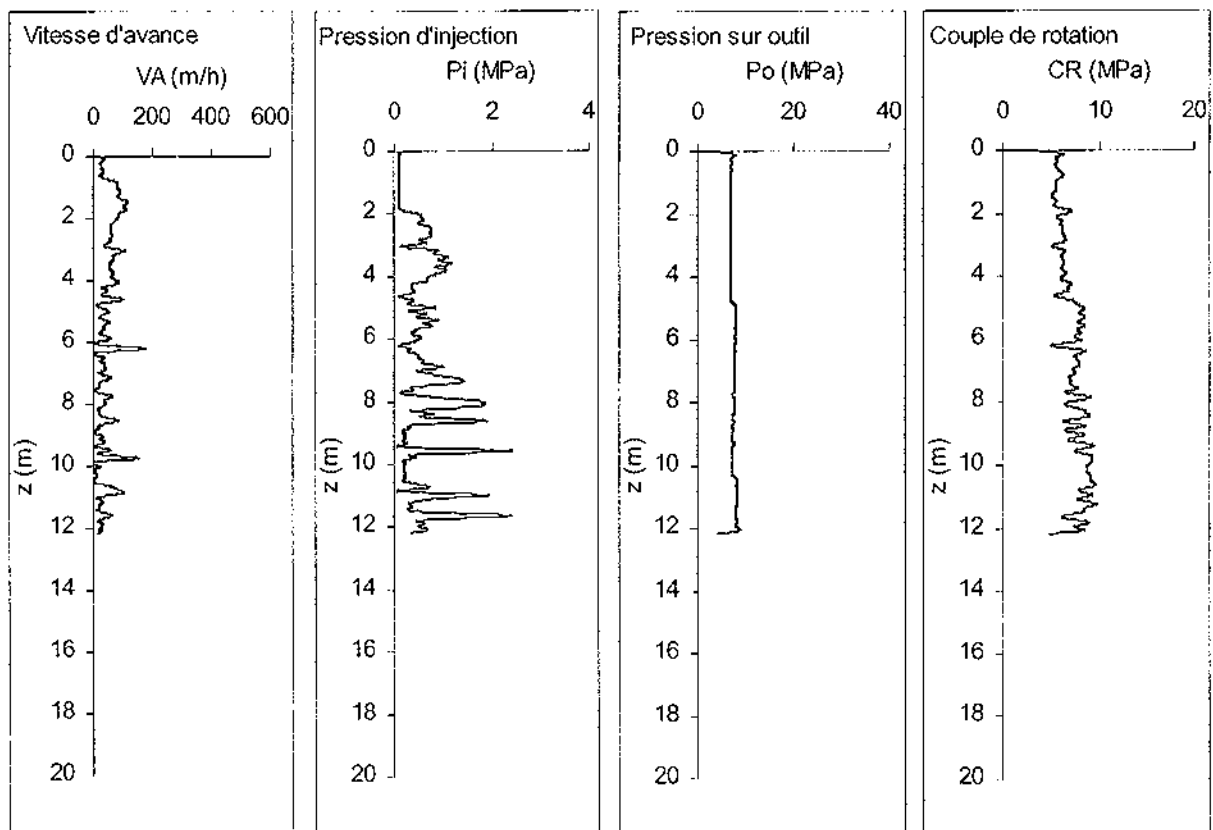
Forage SP2



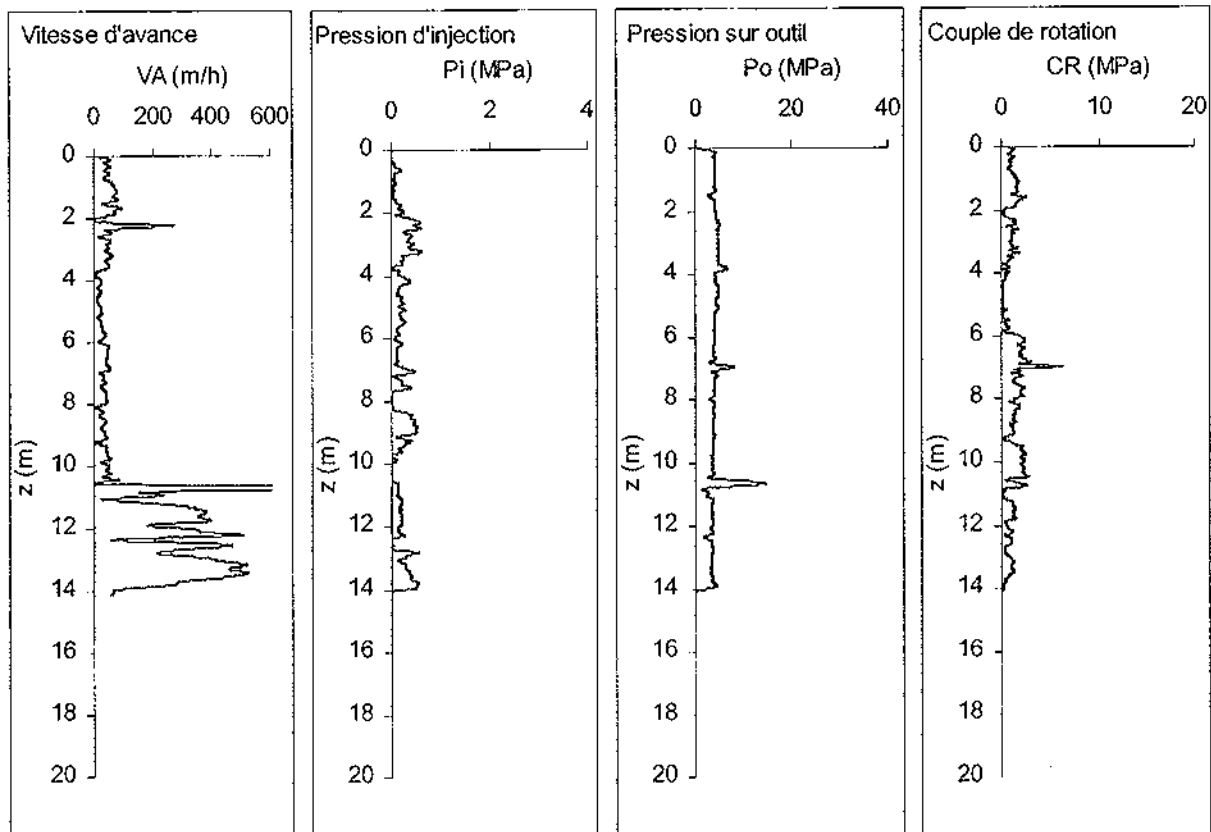
Forage SP3



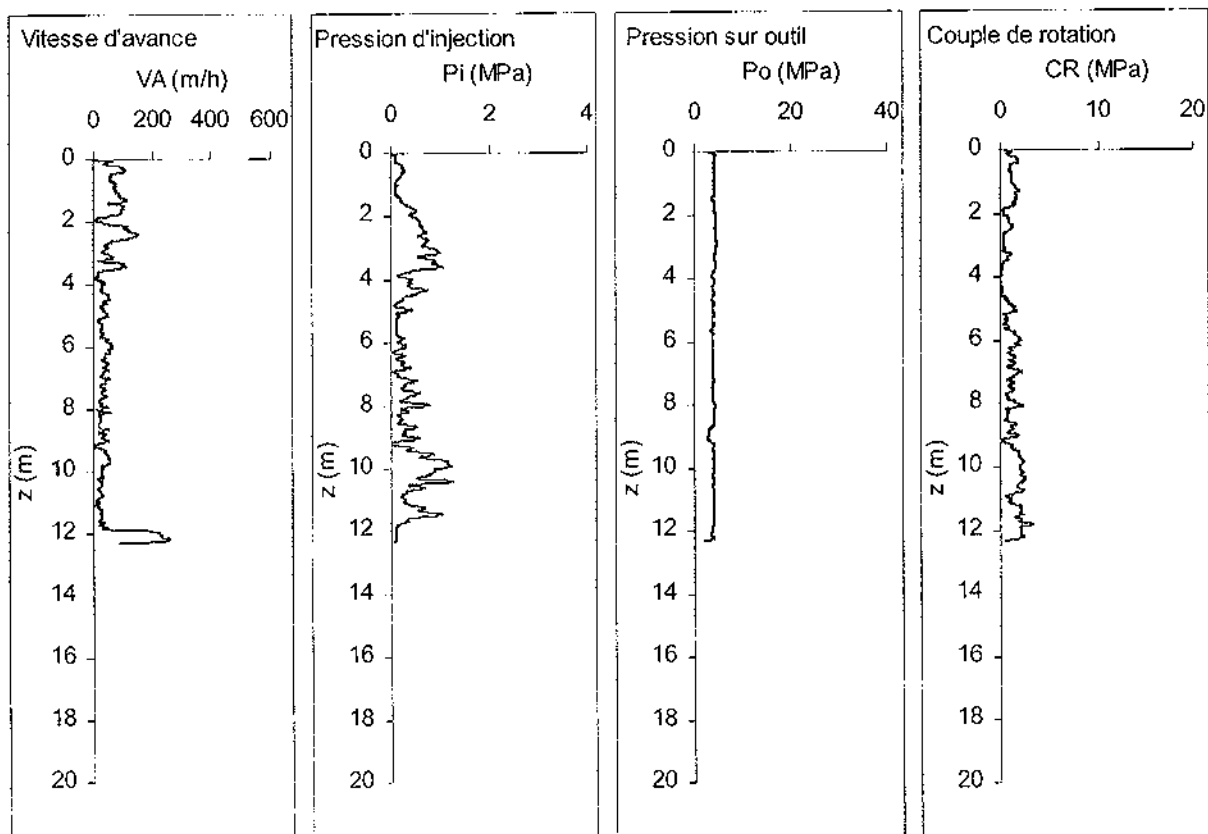
Forage SP4



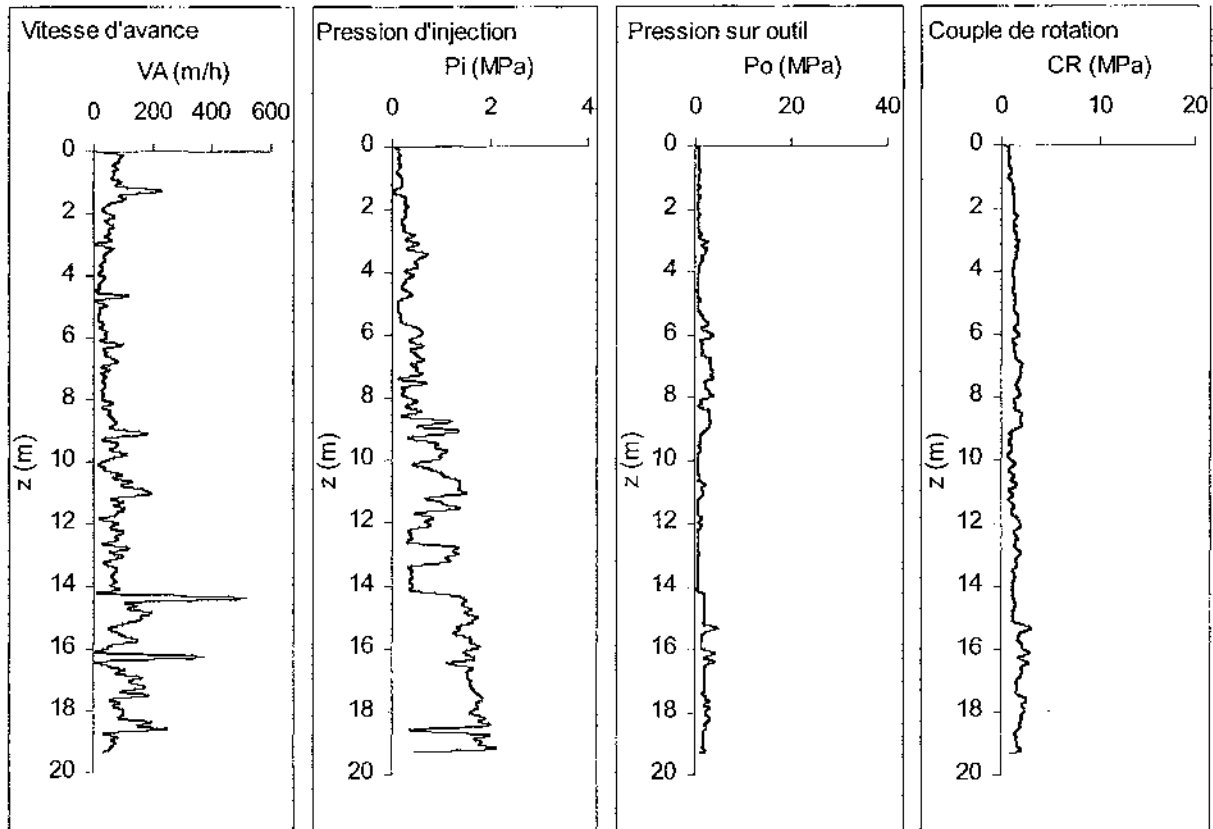
Forage SP5



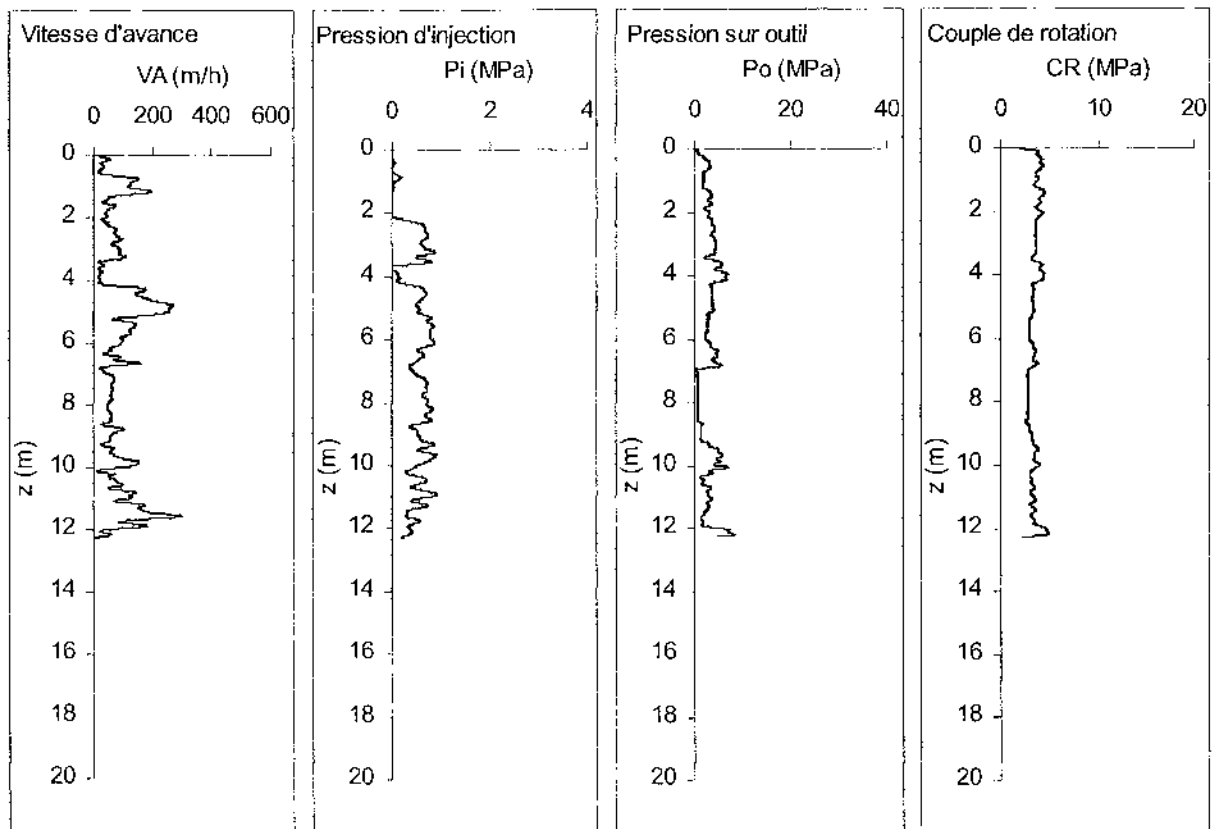
Forage SP6



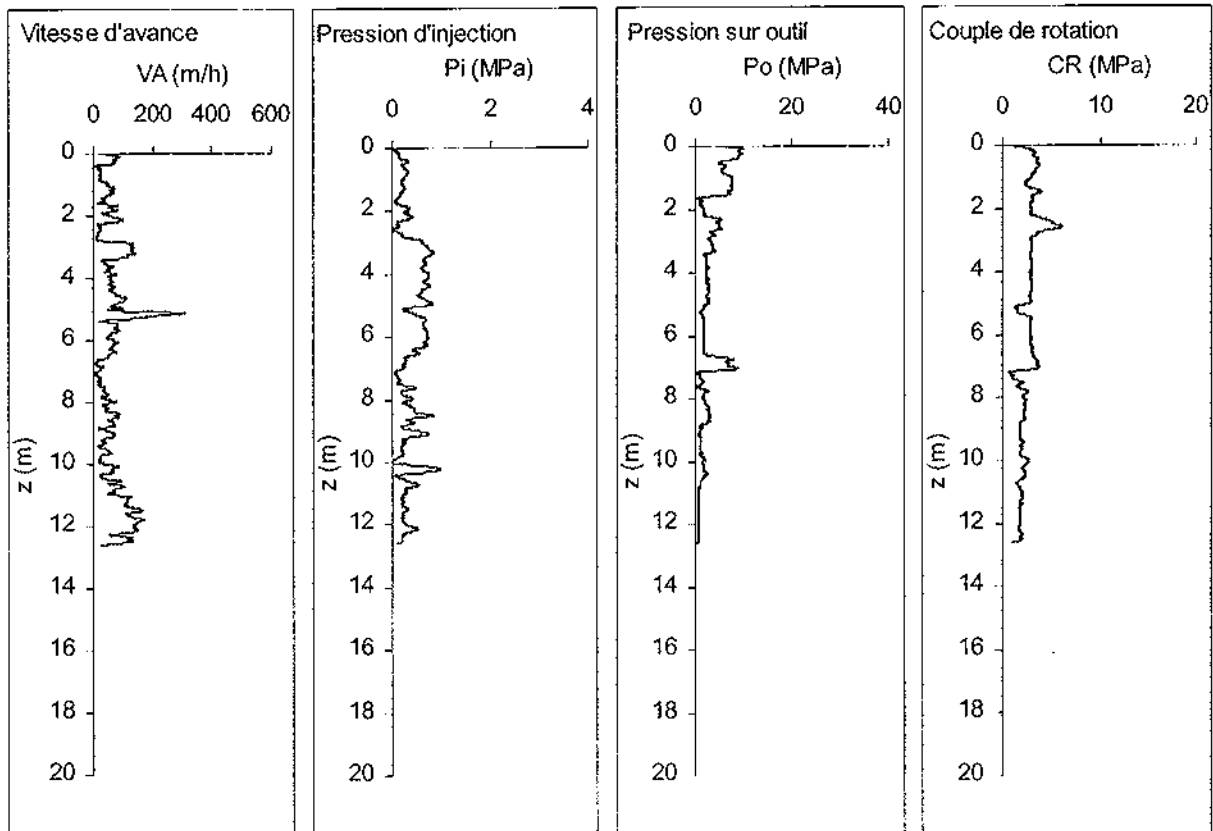
Forage SP7 jBPV



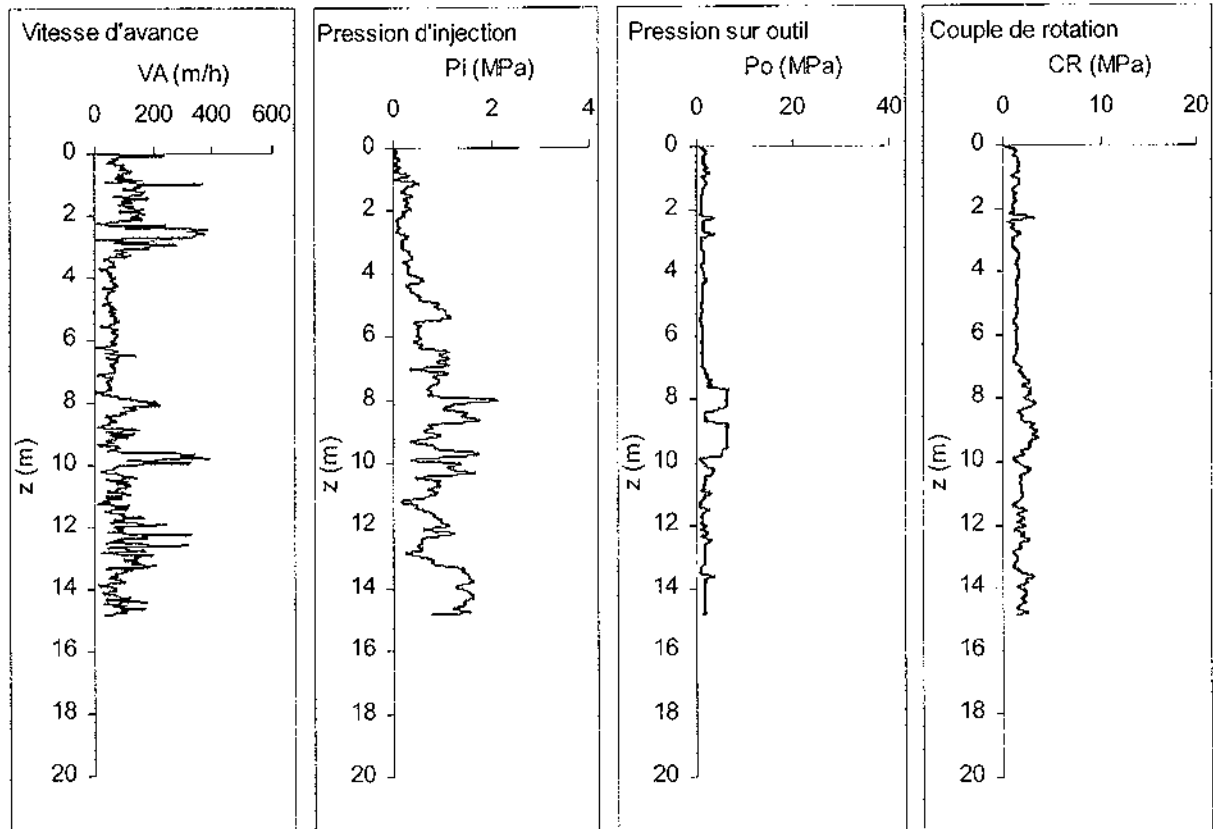
Forage SP7 jBL



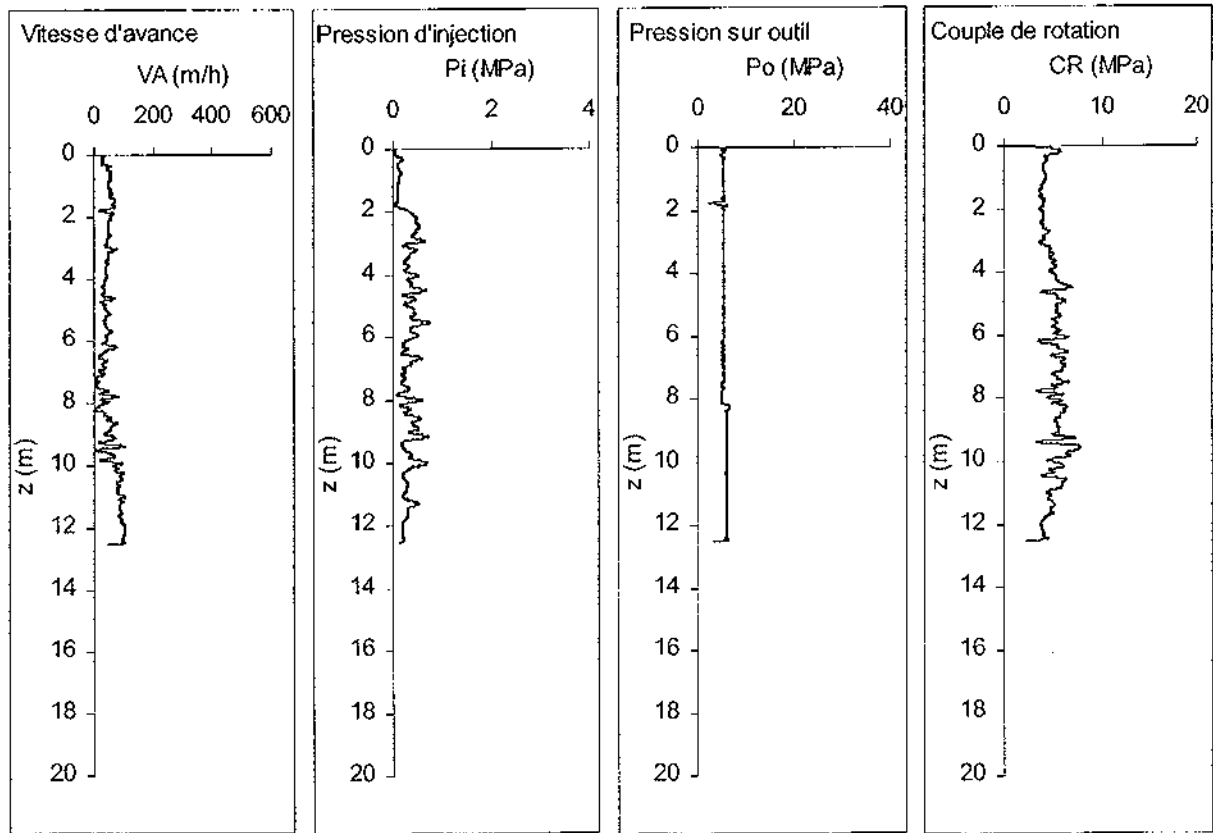
Forage SP7 jPLL



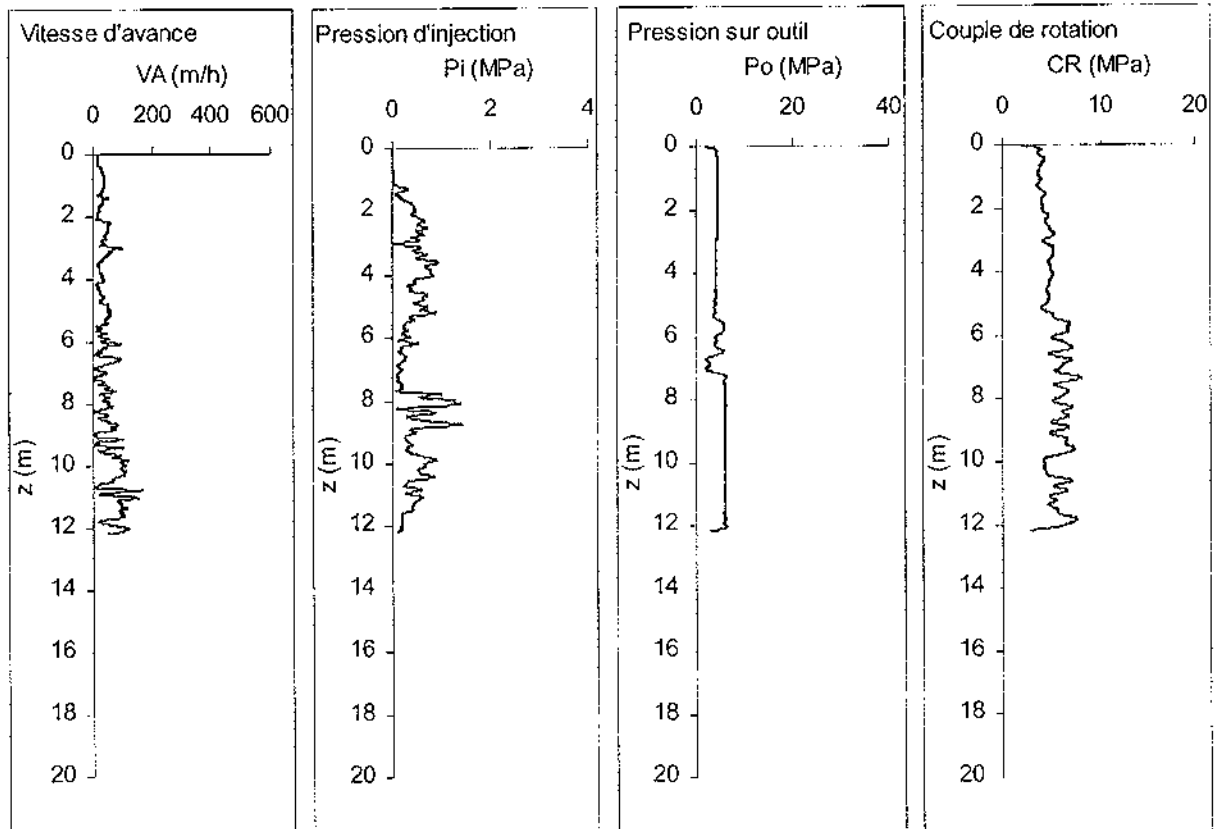
Forage SP8



Forage SP9



Forage SP10



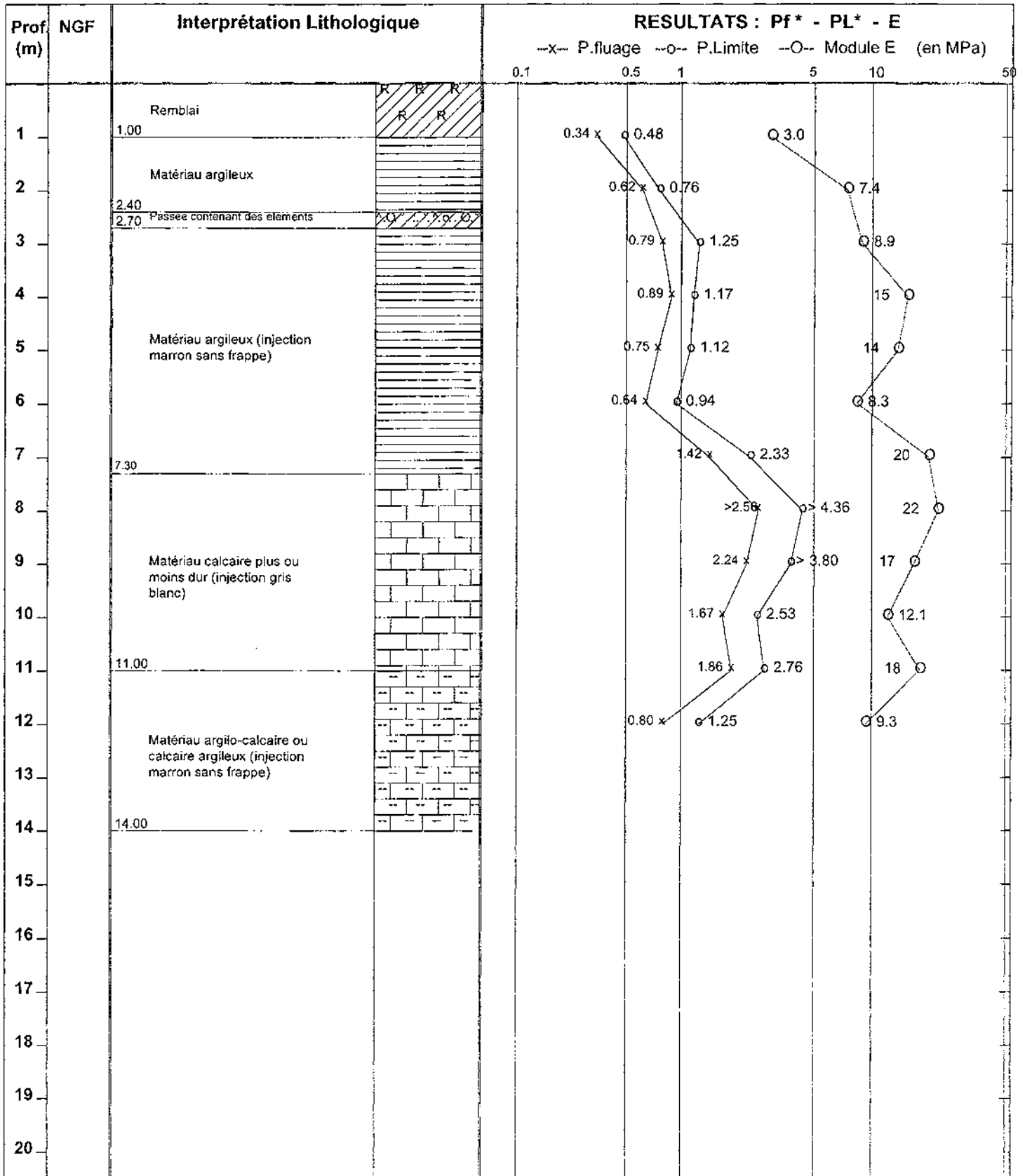
Chantier : IUT de Genie civil Bordeaux I
 Client : Université Bordeaux I
 Dossier : D99/B366

Localisation
 -X :
 -Y :
 -Z :

Date : 21/03/00

Echelle prof. : /

Nappe : /



Outils de forage

tailant à plaquettes Ø 64 mm	14.00 m

TUBAGES

GSP + eau	14.00 m

DATES D'EXECUTION

21/03/00	14.00 m

OBSERVATIONS : Sans eau

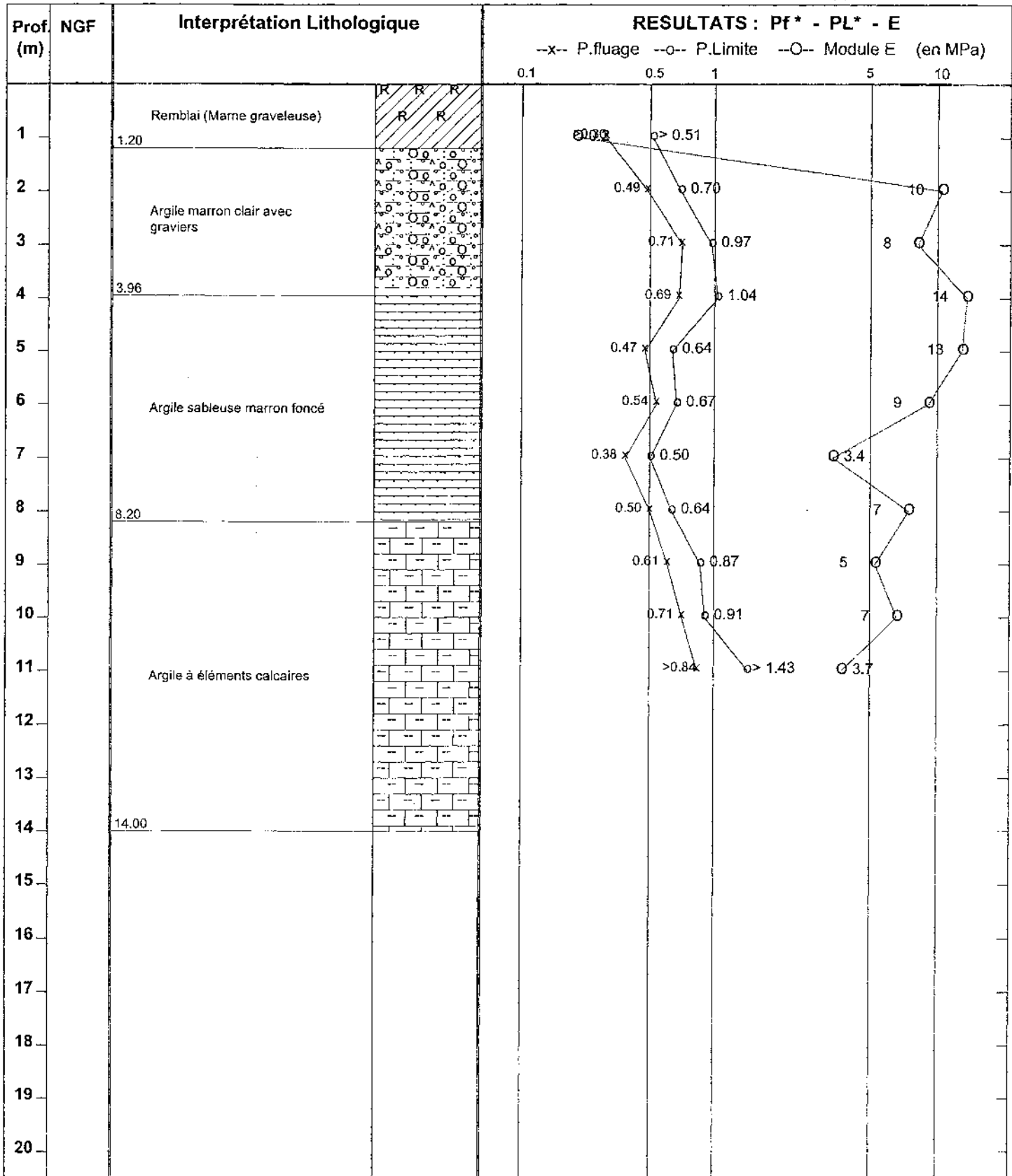
Chantier : IUT Génie Civil -BX I-
 Client : Université Bordeaux I
 Dossier : D99/B366

Localisation
 -X :
 -Y :
 -Z :

Date : 30/03/00

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Taillant à plaquettes	14.00 m

TUBAGES

Sans tubage	14.00 m

DATES D'EXECUTION

30/03/00	14.00 m

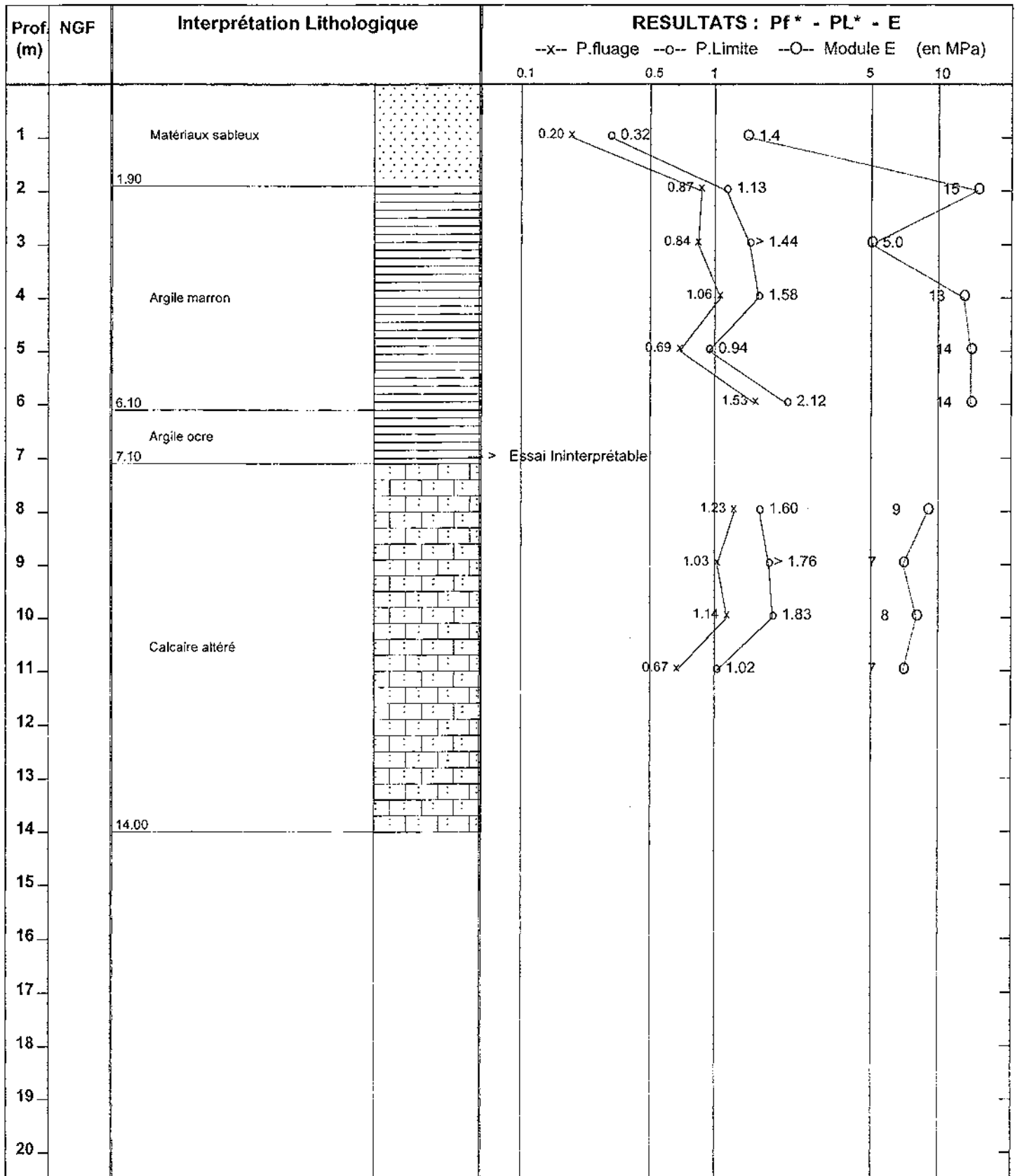
Chantier : Site expérimental IUT Bx I
 Client : Université Bx I
 Dossier : D99/B366

Localisation
 -X :
 -Y :
 -Z :

Date : 19/04/00

Echelle prof. : /

Nappe : /



Outils de forage

Destructif Ø 63 mm / outil à boutons	14.00 m

Tubages

Aucun / GSP	14.00 m

Dates d'exécution

19/04/00	15.10 m

OBSERVATIONS : nappe ? car fluide de forage

ALIOS

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE SP4

Chantier : Site expérimental de l'IUT

Client :
Dossier : D99

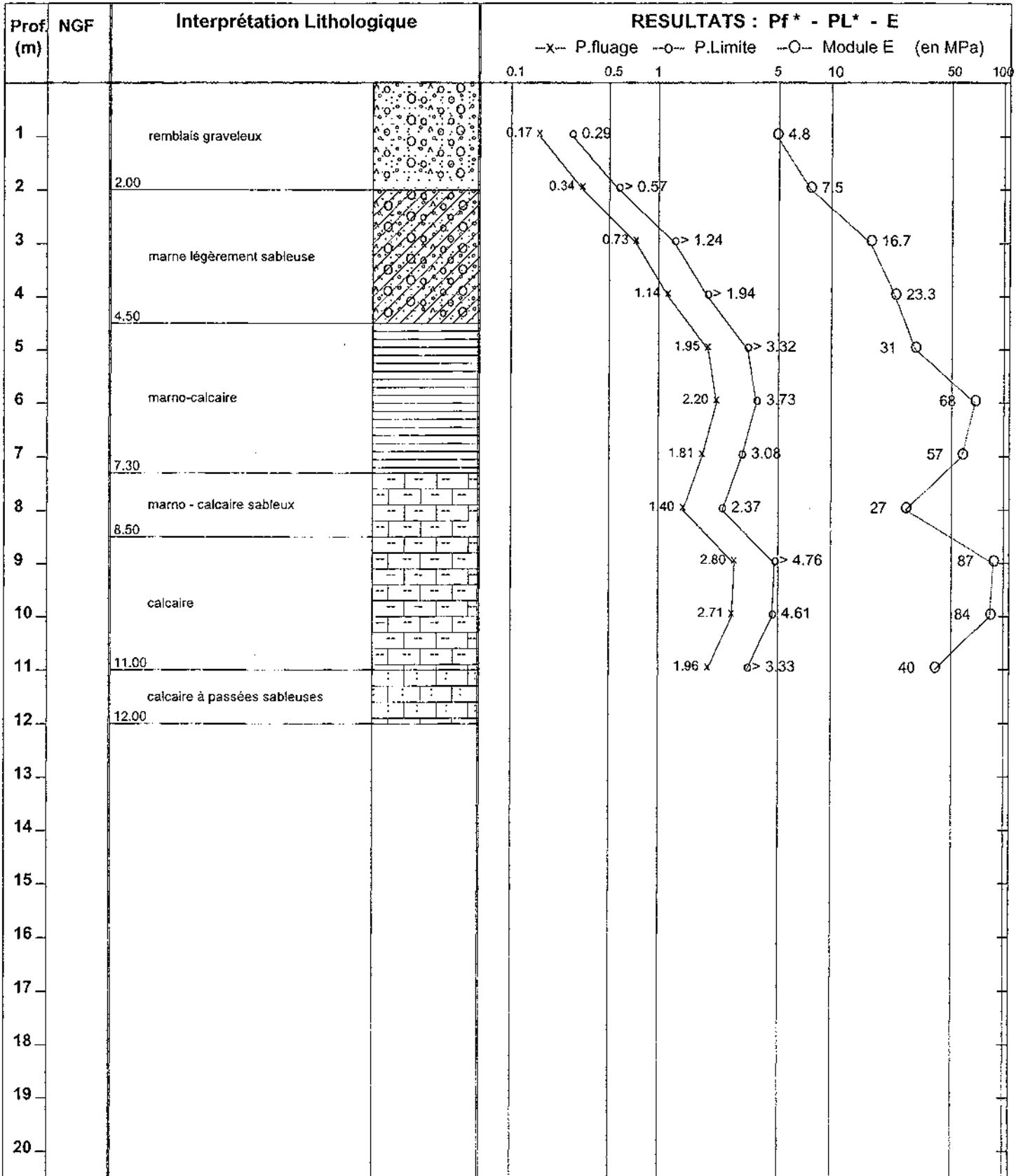
Localisation

-X :
-Y :
-Z :

Date : 13/07/01

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Tricone Ø 63 mm	12.00 m

TUBAGES

GSP	12.00 m

DATES D'EXECUTION

13/07/01	12.00 m

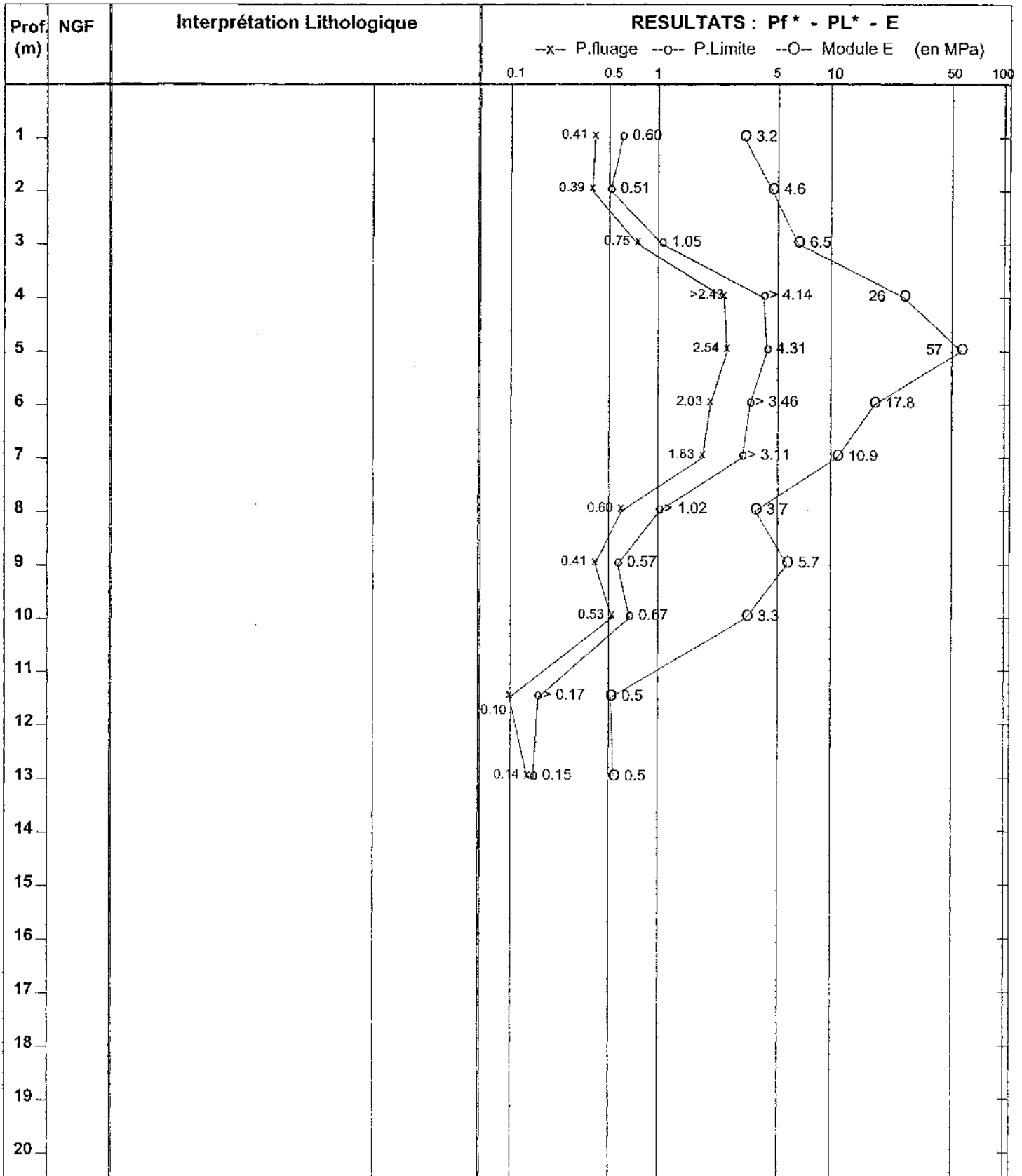
Chantier : IUT Génie Civil (Université Bordeaux I)
 Client : Université Bordeaux I
 Dossier : 99 366

Localisation
 -X :
 -Y :
 -Z :

Date : 22/03/00

Echelle prof. : /

Nappe : /



Outils de forage

Tubages

Dates d'exécution

22/03/00	14.00 m

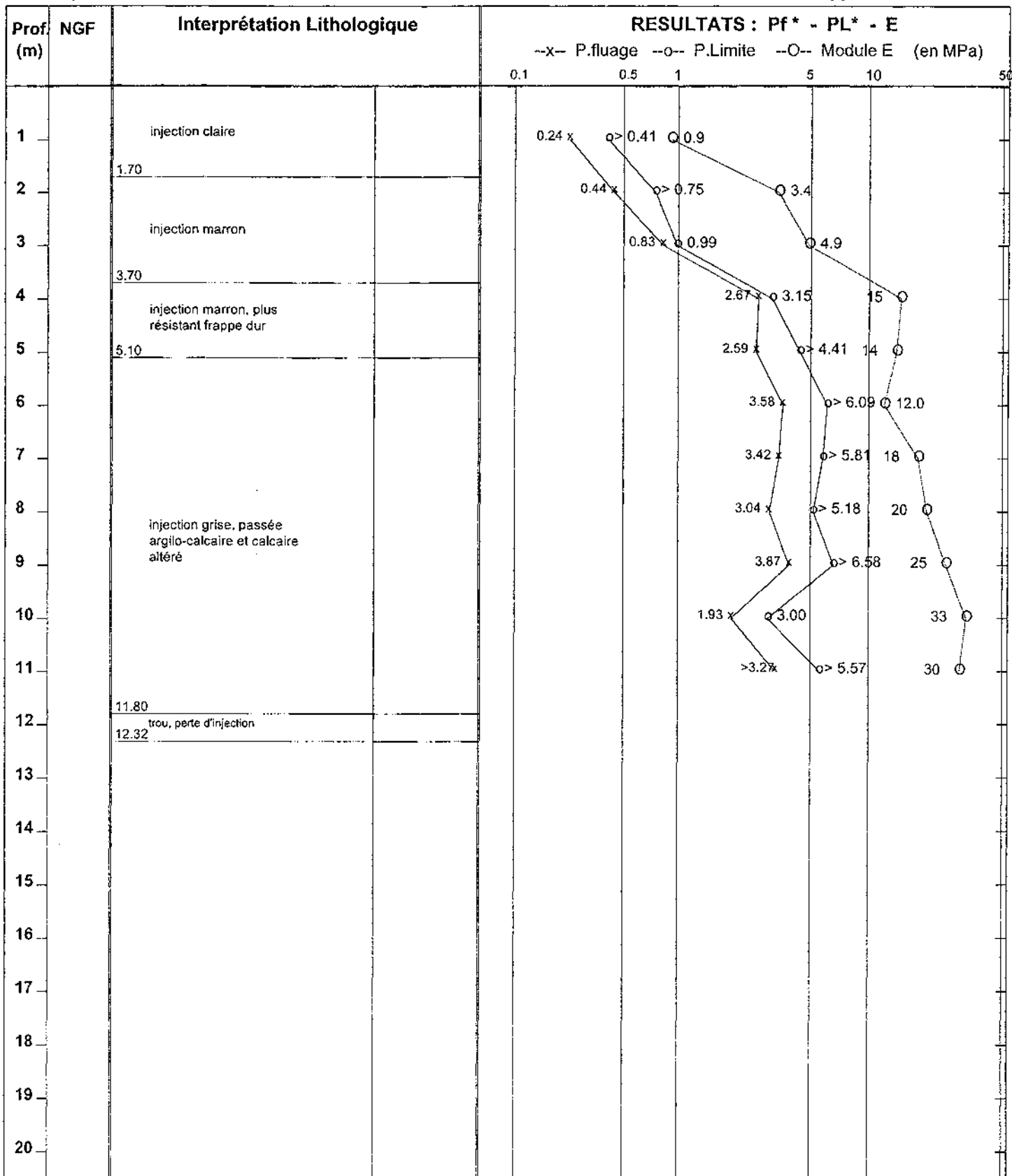
Chantier : IUT Bordeaux I
 Client : Université Bordeaux I
 Dossier : D99/B366

Localisation
 - X :
 - Y :
 - Z :

Date : 23-24/03/00

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

taillant Ø 63 mm	12.34 m

TUBAGES

eau + GSP	12.34 m

DATES D'EXECUTION

23-24/03/00	12.34 m

OBSERVATIONS : Ne peut être observé

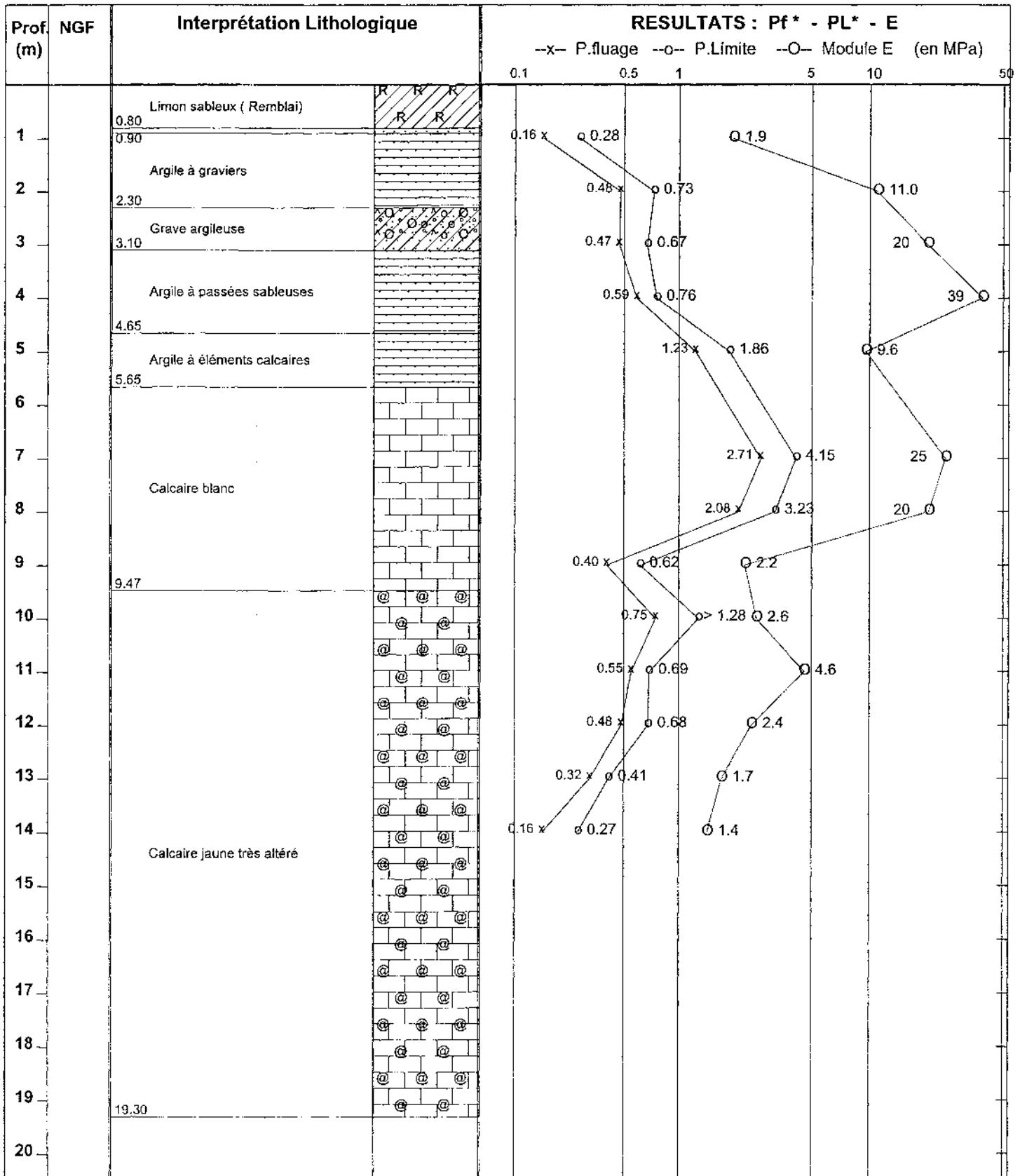
Chantier : Site expérimental - IUT Génie Civil Bx I
 Client : CDGA - Université Bordeaux I
 Dossier : D99/B366

Localisation
 -X :
 -Y :
 -Z :

Date : 28/03/00

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Taillant à boutons Ø 63 mm	19.30 m

TUBAGES

aucun (eau + GSP)	19.30 m

DATES D'EXECUTION

28/03/00	19.30 m

OBSERVATIONS : forage destructif (eau + GSP)

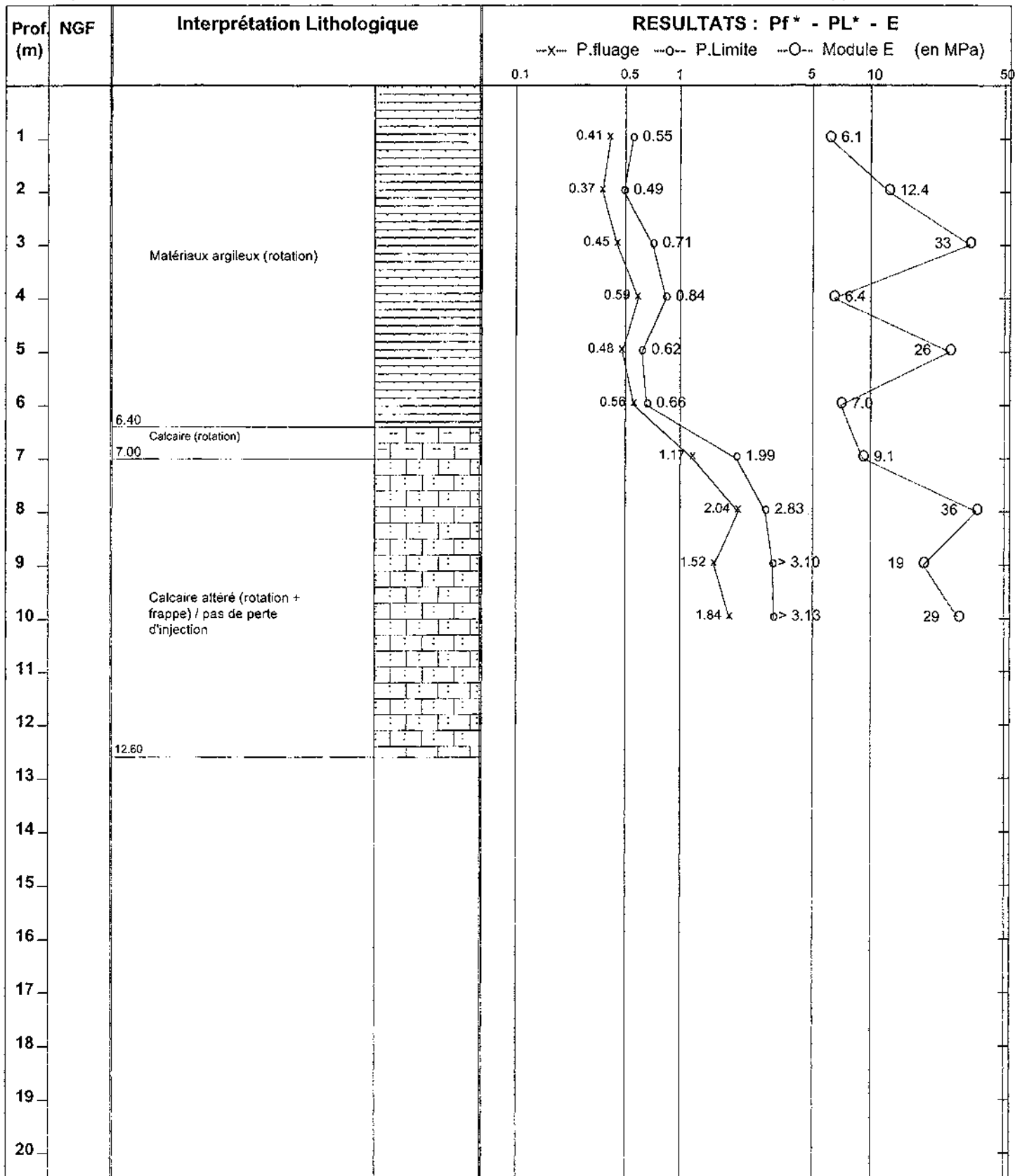
Chantier : Université Bordeaux I
 Client : IUT Bordeaux I
 Dossier : D99/B366

Localisation
 -X :
 -Y :
 -Z :

Date : 06/06/00

Echelle prof. : /

Nappe : /



Outils de forage

Taillant à plaquettes Ø 63 mm	12.60 m

TUBAGES

eau + GSP	12.60 m

DATES D'EXECUTION

06/06/00	12.60 m

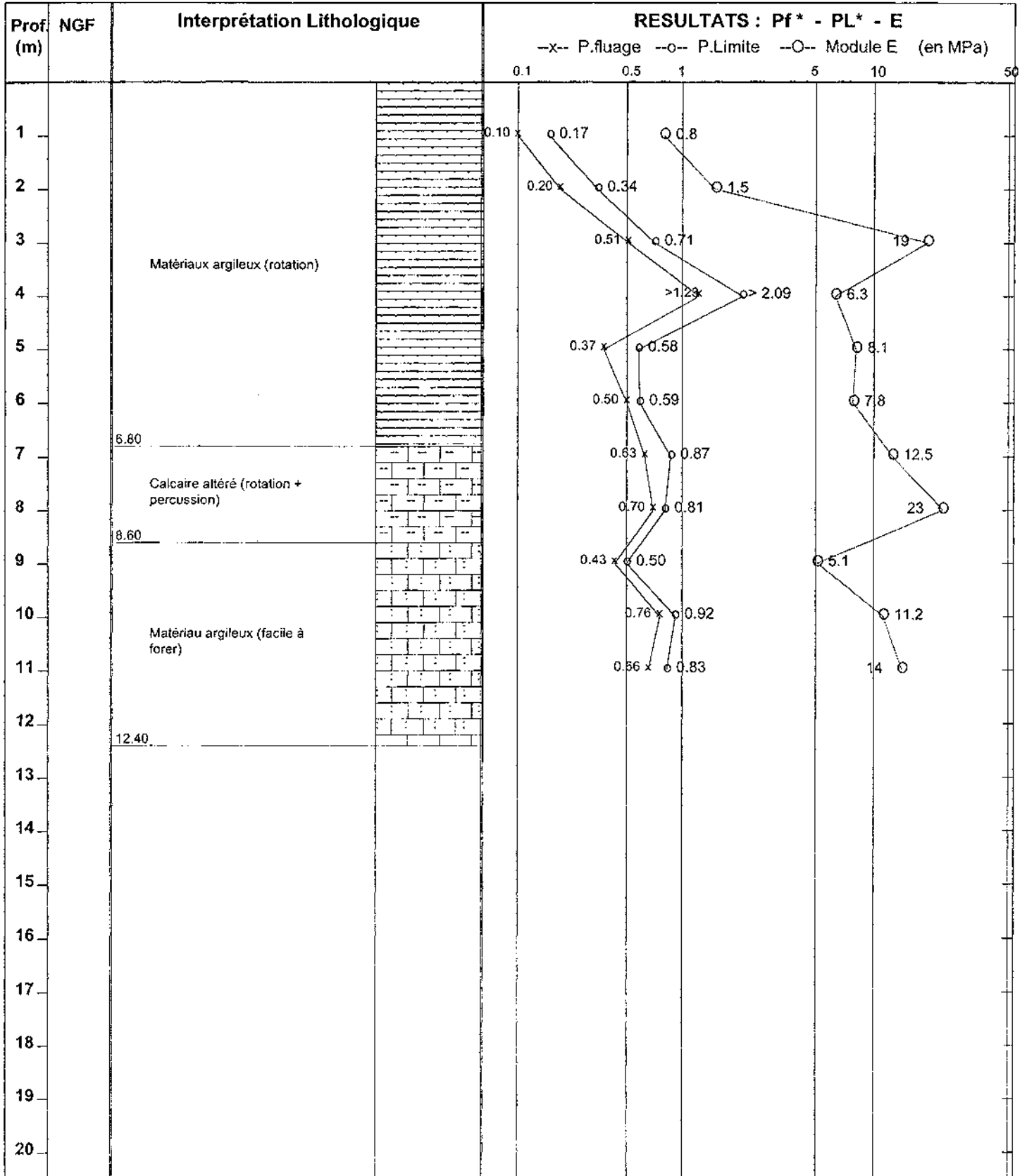
Chantier : Université Bordeaux I
 Client : IUT Bordeaux I
 Dossier : D99/B366

Localisation
 -X :
 -Y :
 -Z :

Date : 06/06/00

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Taillant à boutons Ø 63 mm	12.40 m

TUBAGES

aucun (eau + GSP)	12.40 m

DATES D'EXECUTION

07-08/06/00	12.40 m

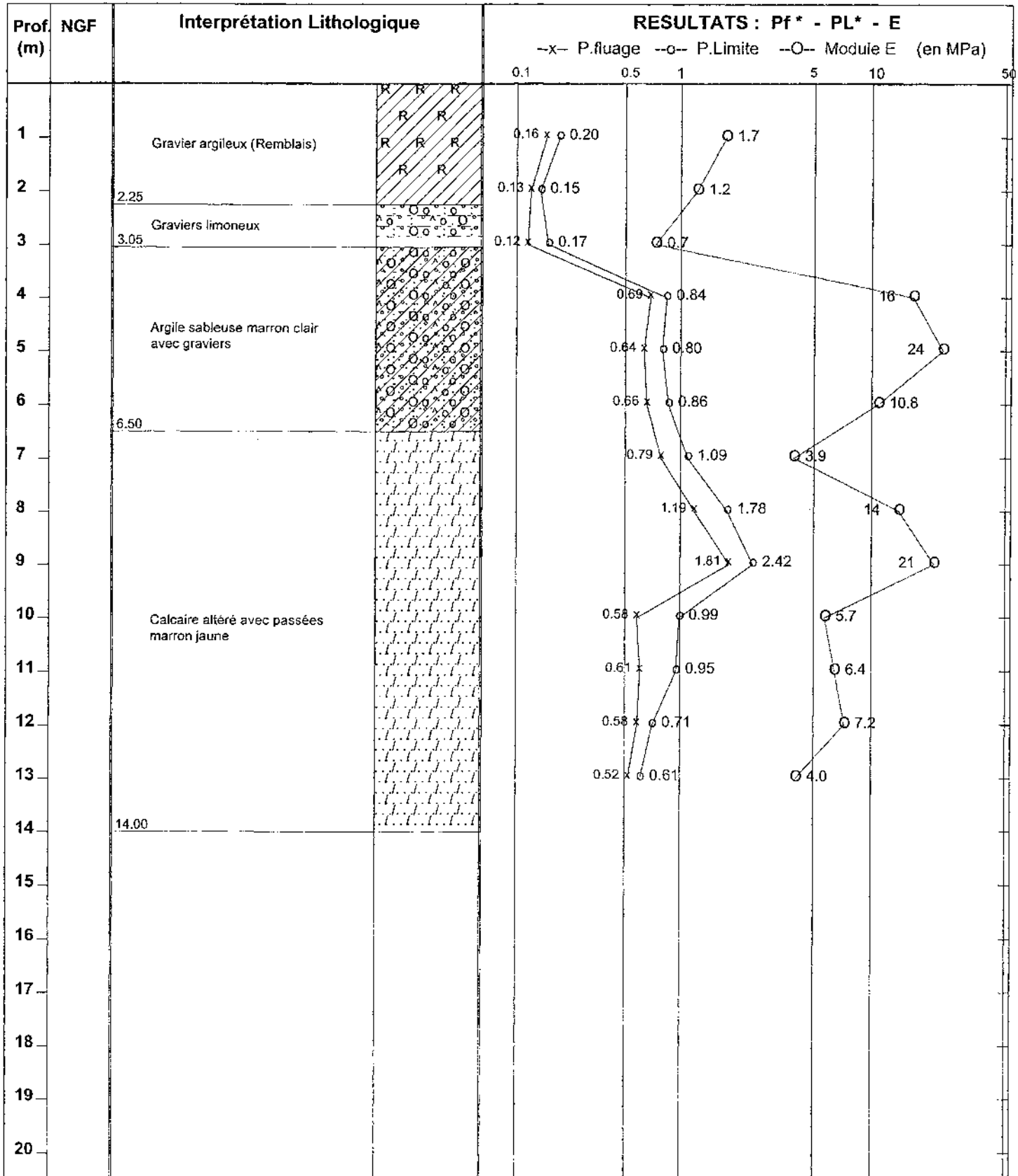
Chantier : Site expérimental IUT Bordeaux I
 Client : Université Bordeaux I
 Dossier : D99/366

Localisation
 - X :
 - Y :
 - Z :

Date : 29/03/00

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

	14.00 m

TUBAGES

Sans tubage	14.00 m

DATES D'EXECUTION

29/03/00	14.00 m

Chantier : Site expérimental de l'IUT

Client :
Dossier : D99

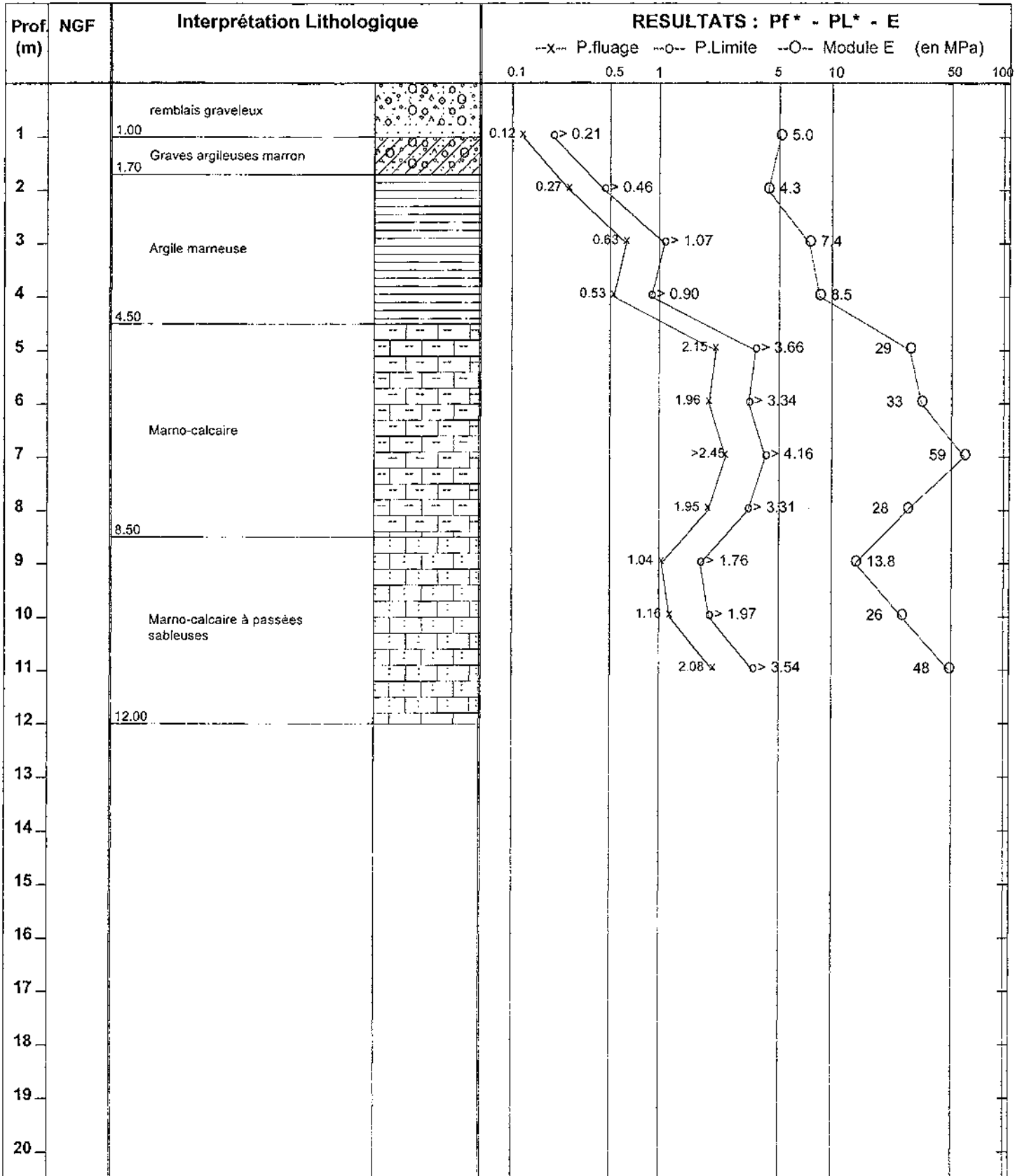
Localisation

-X :
-Y :
-Z :

Date : 12/07/01

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Tricone Ø 63 mm	12.00 m

TUBAGES

GSP	12.30 m

DATES D'EXECUTION

12/07/01	12.30 m

OBSERVATIONS : forage au GSP

Chantier : Site expérimental de l'IUT

Client :
Dossier : D99

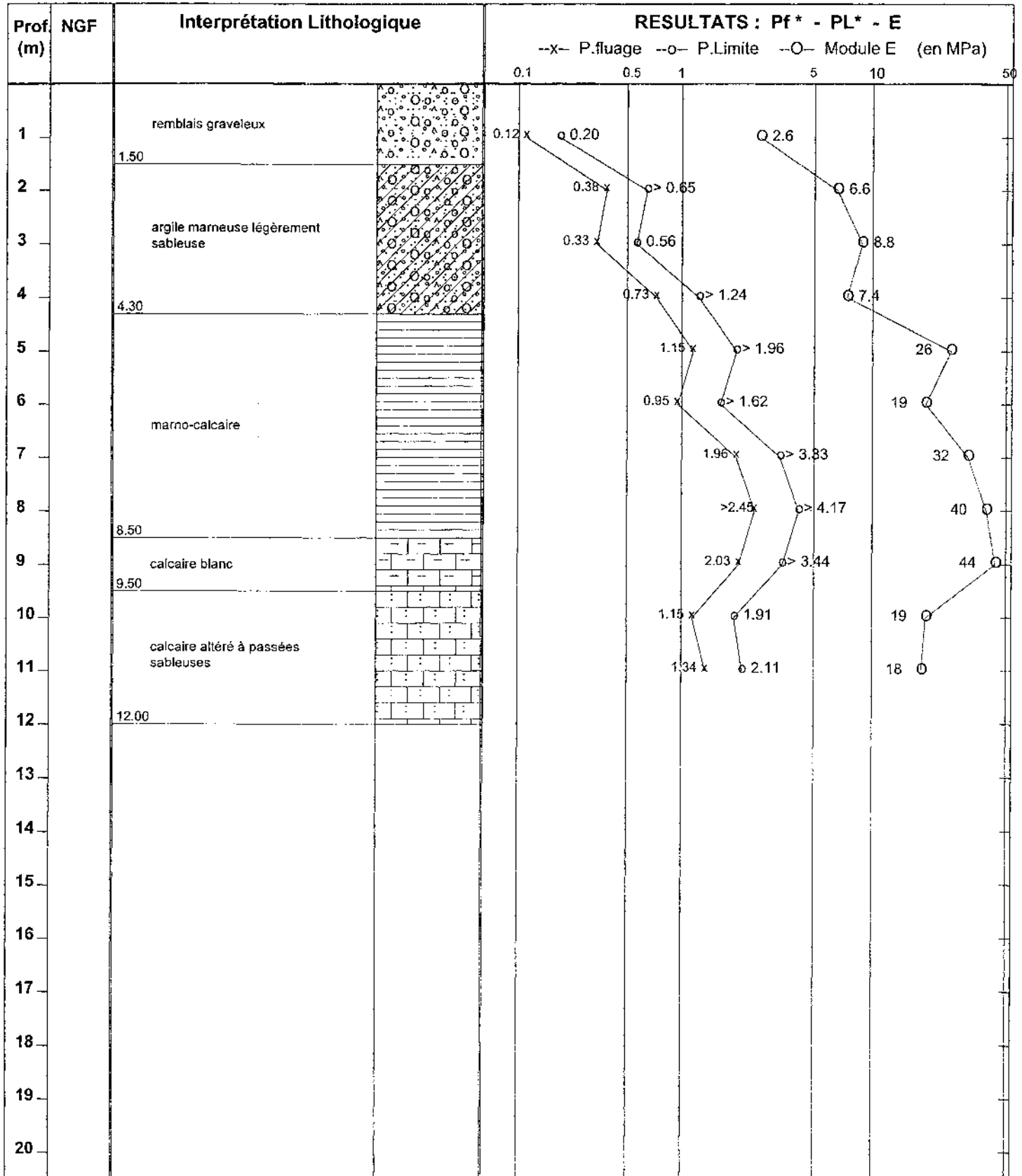
Localisation

-X :
-Y :
-Z :

Date : 12/07/01

Echelle prof. : /

Nappe : /



OUTILS DE FORAGE

Tricone Ø 63 mm	12.00 m

TUBAGES

GSP	12.00 m

DATES D'EXECUTION

12/07/01	12.00 m

Annexe 21 : Coupes lithologiques établies pour les sondages carottés C1 et C2.

ALIOS

SONDAGE C1

Chantier : Site expérimental IUT Bordeaux I

Client : Université Bx I
Dossier : D99/B366

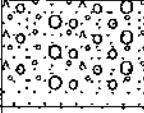
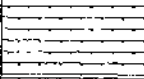
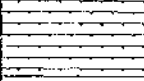
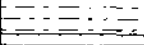
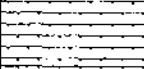
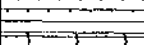
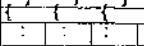
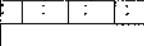




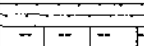
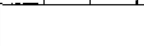
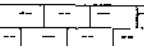
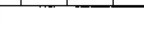
Localisation

- X :
- Y :
- Z : NGF

Echelle prof. : /

SONDEUSE :

Nappe : /

Récup %	Prof (m)	NGF (m)	SOLS	RCM	Wnat %	% P 80	% P 2	VBS	Remarques
	0.60		V V V V V TV et sable lgt. limoneux + quelques graviers						
	2.00		 Sable et graviers						
	3.10		 Limon ocre argilo-sableux, + argileux vers 3.0 m						
	4.10		 passées jaunes / blanc / gris + traces d'oxydations + petits éléments calcaires						
	4.60		 Limon ocre sableux + qqles graviers						
	5.60		 Argile lgt. sableuse très compacte						
	5.90		 Matériau argileux remanié Argile + compacte						
	6.50		 Passage progressif vers calcaire à astéries						
	7.10		 Calcaire + présent, les veines argileuses s'estompent						
	8.00		 Carotte vide						
	8.30		 Sable grossier argileux ocre, saturé (cote 8.30 m)						
	8.60		 Sable grossier argileux calcaires / argile						
	9.80		 rien - traces de sbles argileux -						
	10.10		 Argile grise + éléments calcaires						
	10.40		 Calcaire compacte						
	11.00		 Vide						
	11.60		 Calcaire - est-ce que les deux morceaux étaient collés ? Fin de Sondage						

OUTILS DE FORAGE

Carottier Ø 116 mm	11.60 m

TUBAGES

	11.60 m

DATES D'EXECUTION

31/05 et 02/06/00	11.60 m

ALIOS

SONDAGE C2

Chantier : Site expérimental de l'IUT (TALECE 33)

Client :
Dossier : D99

Localisation
- X :
- Y :
- Z : NGF

Echelle prof. : /

SONDEUSE :

Nappe : /

Récup %	Prof (m)	NGF (m)	SOLS	Essais triax.	Remarques
	2.00		remblais graveleux (proche canalisation)		
	2.60		argile sableuse		
	3.00		argile calcaire à éléments calcaire		
	4.50		argile calcaire à éléments calcaire (élt. calcaire ++ importants)		
	5.30		marno-calcaire (calcaire + ou - altéré / grains cm / - de cohésion entre grains)		
	6.00		marno-calcaire (calcaire + ou - altéré / grains cm / - de cohésion entre grains)		
	6.50		calcaire altéré (élt de 3 / 4 cm dans matrice argilo-calcaire)		
	7.20		pas d'échantillon (passée sableuse)		
	7.70		sable lgt. argileux (pas de réaction avec HCl) devient plus grossier avec z.		
	7.90		Gros cailloux calcaire (5/6cm) pris dans mat.		
	8.20		pas d'échantillon (passée sableuse)		
	8.70		pas d'échantillon (passée sableuse)		
	9.00		sable		
	9.70		sable + blocs calcaire		
	10.30		blocs calcaires + argile (faible quantité)		
	10.80		sable fin argileux à graviers (quartz)		
	11.20		argile calcaire à éléments calcaires		
	12.00		cailloux calcaire dans matrice argileuse (proportion + importante qu'entre 9.20 et 9.70)		
			pas d'échantillon (sable)		
			Fin de Sondage		

OUTILS DE FORAGE

carottier Ø 116mm	12,00 m

TUBAGES

DATES D'EXECUTION

11/06/01	12,00 m

Annexe 22 : Procès verbaux des essais triaxiaux réalisés sur le site expérimental (IUT - Talence / Gradignan)



CEMAGREF

GROUPEMENT DE BORDEAUX

LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

ESSAI TRIAXIAL

Non Consolidé Non Drainé

DOSSIER: IUT

Echantillon: S 01 Prof: 2.00m
2.20m

Densité des grains (k s / k w): 2.74

Eprouvette: h: 80 mm - d: 39 mm

Echantillon: non remanié

Vitesse de déformation: 15 µ/min

OBSERVATIONS

Critère de rupture:

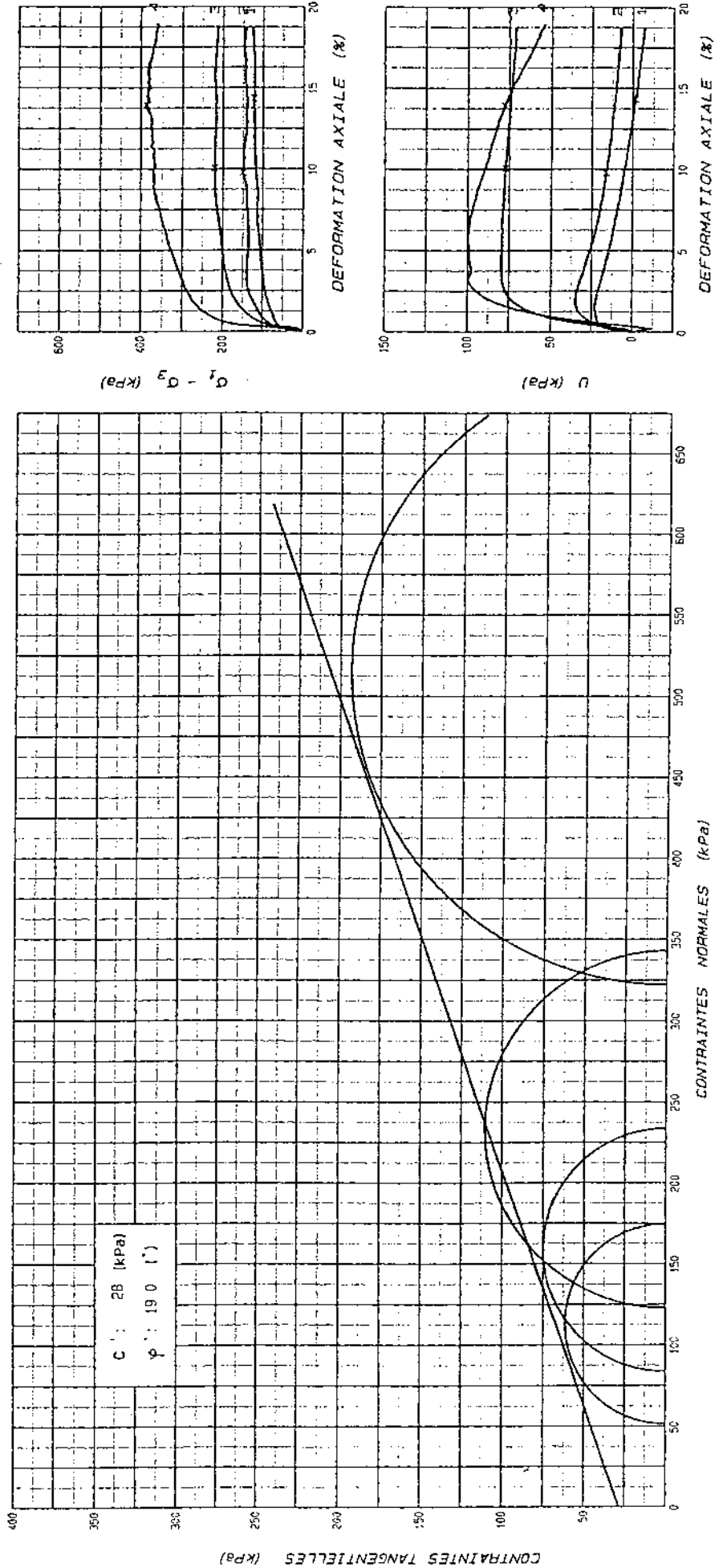
* $\sigma_1 - \sigma_3$

Contrainte de rupture: 200 kPa

Saturation: 5 jours

Consolidation: 5 jours

NUMERO DE L'EPROUVETTE	OBSERVATIONS			
	1	2	3	4
ETAT INITIAL	Teneur en eau	25.8	23.3	20.2
	Densité sèche (k d / k w)	1.59	1.53	1.59
ETAT FINAL	Indice des vides	0.723	0.678	0.626
	Degré de saturation	97.6	94.0	88.3
PRESSION LATERALE σ_3 (kPa)	Teneur en eau	28.3	23.1	18.6
	Densité sèche (k d / k w)	1.56	1.58	1.61
PRESSION INVERSE A LA RUPTURE (kPa)	Indice des vides	0.759	0.629	0.516
	Degré de saturation	100.0	100.0	98.7
DEFORMATION A LA RUPTURE (%)	PRESSION LATERALE σ_3 (kPa)	50	100	400
	($\sigma_1 - \sigma_3$) / RUPTURE (kPa)	123	150	385
		16	77	78
		9.8	10.1	13.9





GROUPEMENT DE BORDEAUX

LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

ESSAI TRIAXIAL

Non Consolidé Non Drainé

DOSSIER: IUT

Echantillon: S 01 Prof: 3.00m
3.50m

Densité des grains (k_s/k_w): 2.71

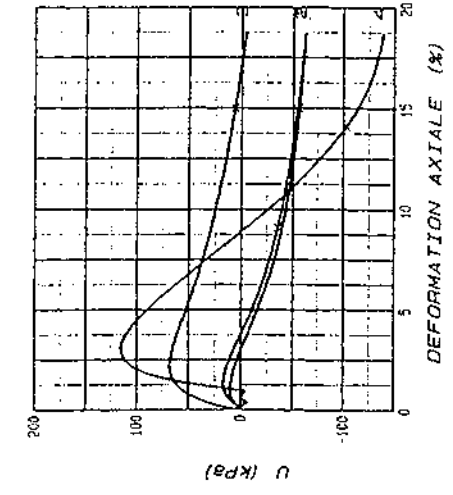
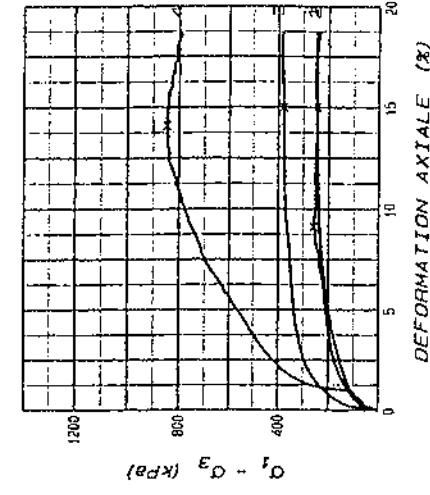
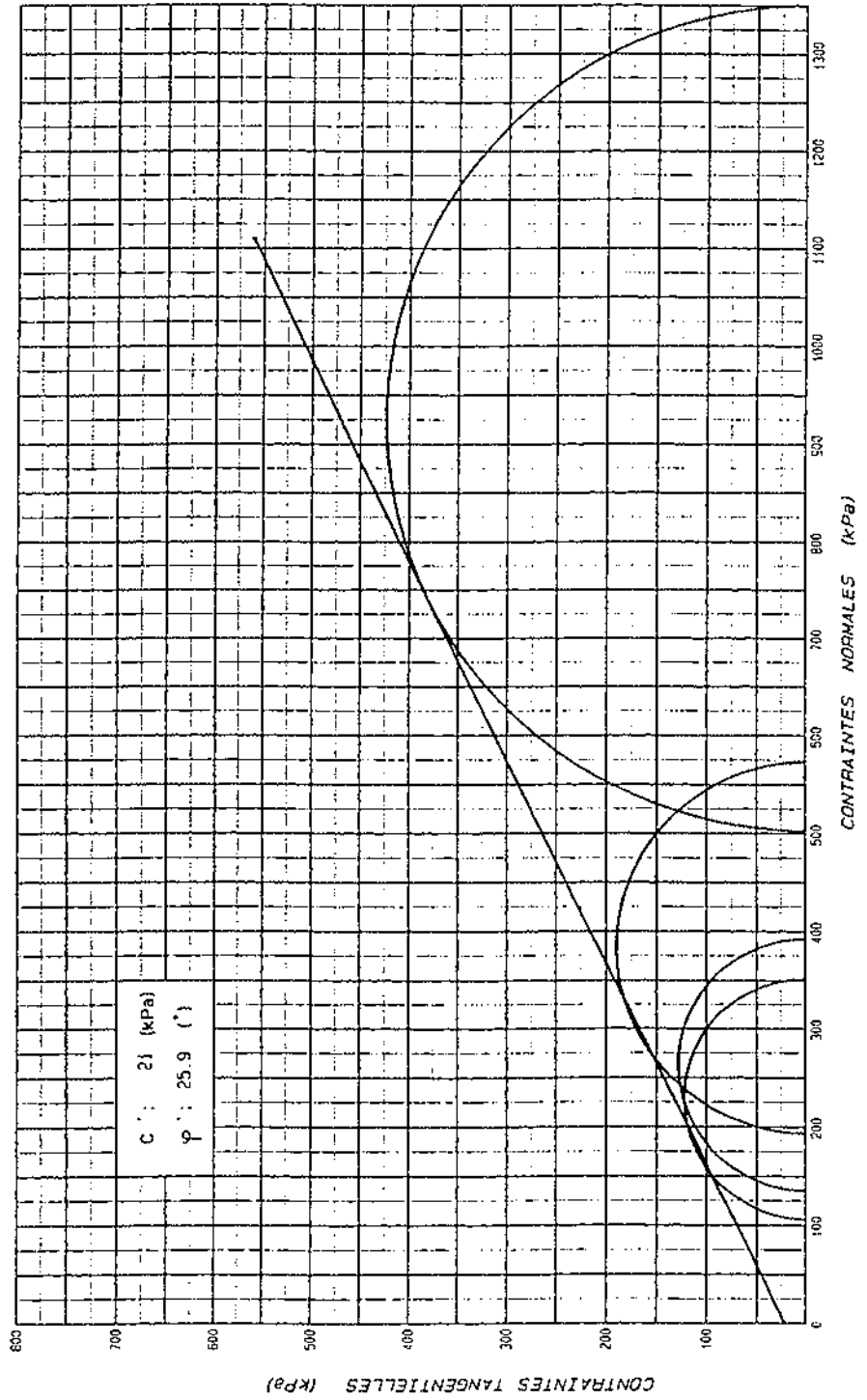
Eprouvette: h: 80 mm - Ø: 35 mm

Echantillon: non reconstitué

Vitesse de déformation: 15 µ/mn

OBSERVATIONS	
Critère de rupture:	K 01 - 03
Contrainte de rupture:	200 kPa
Saturation:	5 jours
Consolidation:	5 jours

NUMERO DE L'EPROUVETTE		1	2	3	4
ETAT INITIAL	Teneur en eau	23.5	21.3	21.1	17.9
	Densité sèche (k _s /k _w)	1.69	1.72	1.72	1.82
	Indice des vides	0.605	0.575	0.574	0.488
	Degré de saturation	100.0	100.0	99.9	99.3
ETAT FINAL	Teneur en eau	23.8	21.7	22.1	17.0
	Densité sèche (k _s /k _w)	1.67	1.71	1.70	1.85
	Indice des vides	0.625	0.585	0.591	0.462
	Degré de saturation	100.0	100.0	100.0	99.8
PRESSION LATÉRALE σ_3 (kPa)		50	100	200	400
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ RUPTURE (kPa)		245	257	379	847
PRESSION INTERSTITIELLE A LA RUPTURE (kPa)		-56	-35	6	-103
DEFORMATION A LA RUPTURE (%)		15.0	9.1	15.0	14.1



$c' : 21$ (kPa)
 $\phi' : 25.9$ (°)



GROUPEMENT DE BORDEAUX

LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

NUMERO DE L'EPROUVETTE

ETAT INITIAL

Teneur en eau

Densité sèche (γ_d/γ_w)

Indice des vides

Degré de saturation

Teneur en eau

Densité sèche (γ_d/γ_w)

Indice des vides

Degré de saturation

PRESSION LATERALE σ_3 (kPa)

($\sigma_1 - \sigma_3$) RUPTURE (kPa)

PRESSION INTERSTITIELLE A LA RUPTURE (kPa)

DEFORMATION A LA RUPTURE (%)

22.6

1.72

0.596

100.0

19.4

1.78

0.546

97.6

50

175

24

6.0

20.6

1.73

0.591

95.6

21.0

1.74

0.579

99.5

100

287

-24

10.3

22.7

1.68

0.634

98.4

21.7

1.73

0.591

100.0

200

363

24

8.3

OBSERVATIONS

Critère de rupture :

$\mu \sigma_1 - \sigma_3$

Contrepression: 200 kPa

Saturation: 5 jours

Consolidation: 5 jours

ESSAI TRIAXIAL

Non Drainé

DOSSIER: BORDEAUX

Echantillon: S 01 Prof: 4.10m

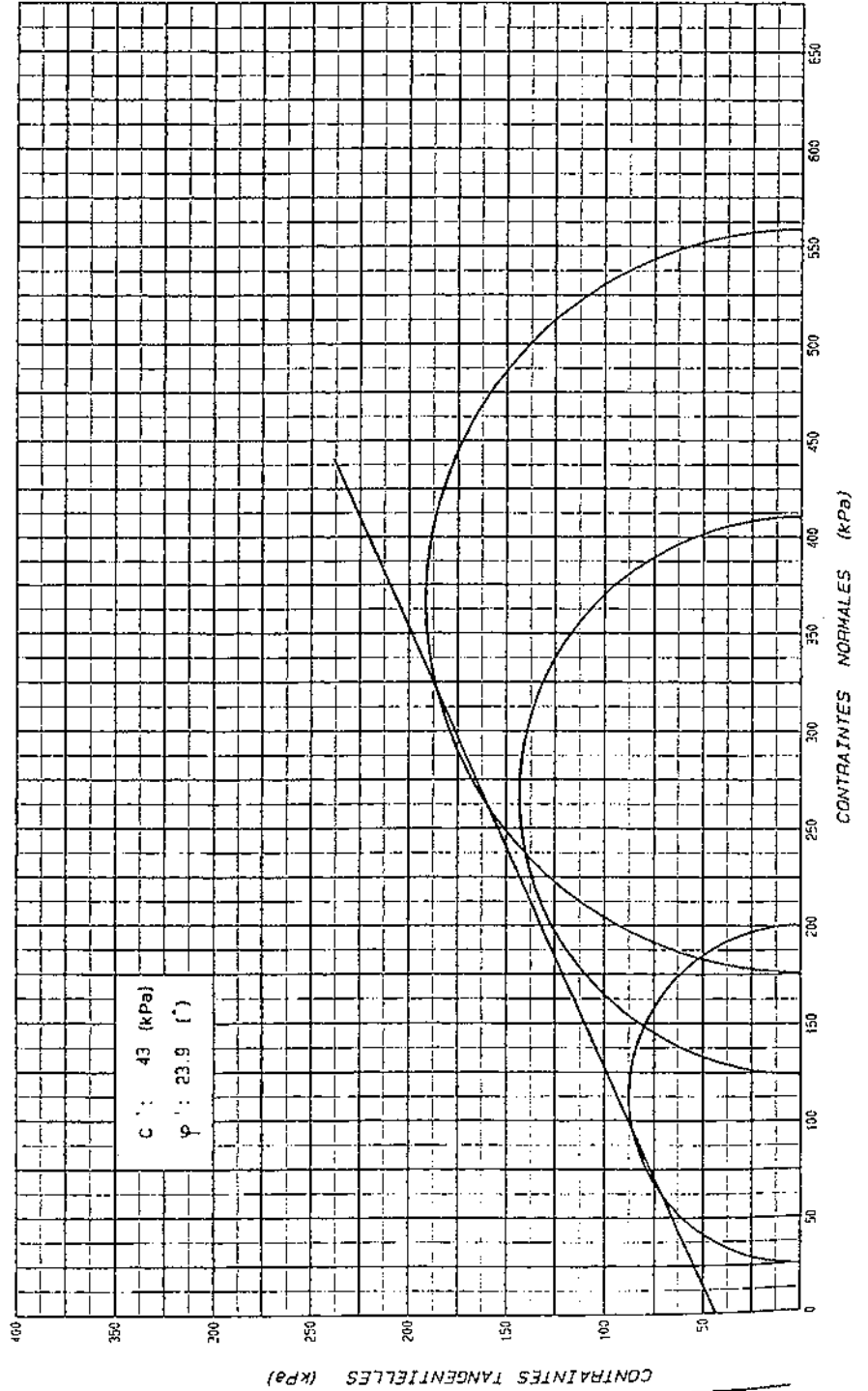
4.20m

Densité des grains (γ_s/γ_w): 2.75

Eprouvette: h: 80 mm - ϕ : 35 mm

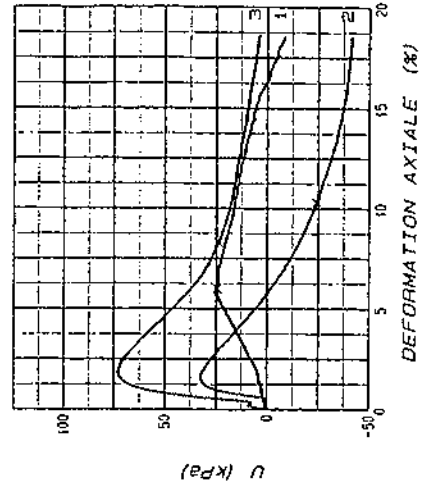
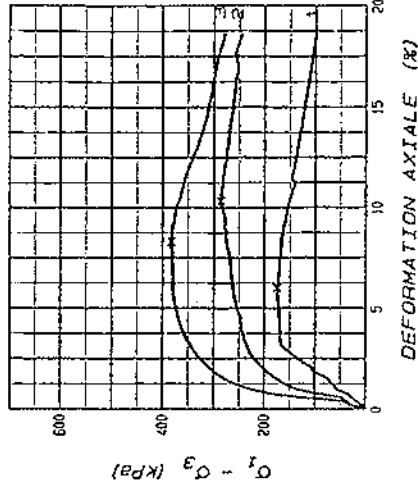
Echantillon: non remanié

Vitesse de déformation: 15 μ /mn



$c' : 43$ (kPa)

$\phi' : 23.9$ ($^\circ$)





GROUPEMENT DE BORDEAUX

LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

ESSAI TRIAXIAL

Non Consolidé Non Drainé

DOSSIER : BORDEAUX

Echantillon : S 01 Prof : 5.10m
5.30m

Densité des grains (γ_s / γ_w) : 2.75

Eprouvette : h : 80 mm - D : 39 mm

Echantillon : non remanié ~~consolidé~~

Viscosité de déformation : 15 μ /mn

OBSERVATIONS

Critère de rupture :

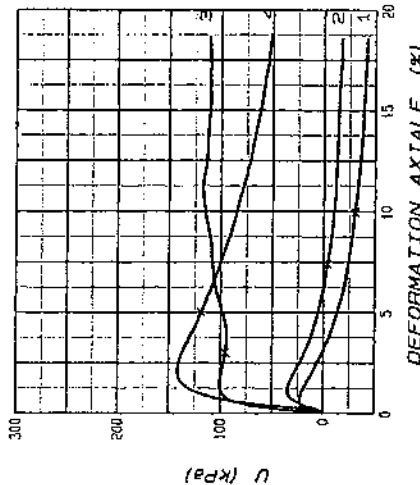
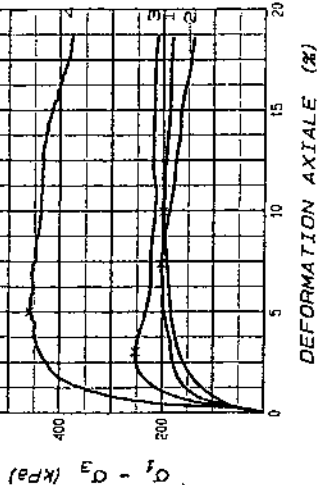
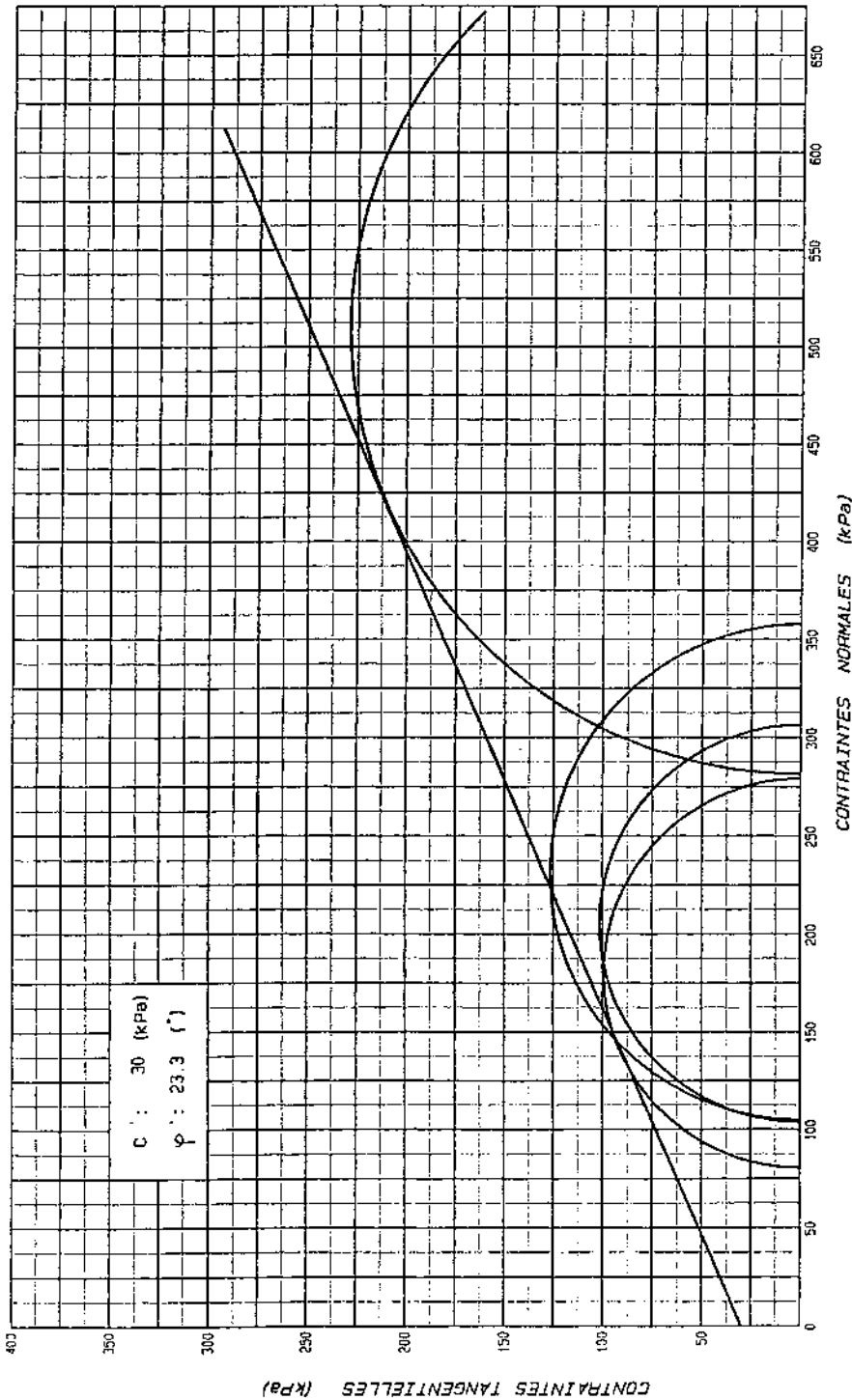
* $\sigma_1 - \sigma_3$

Contrepression : 200 kPa

Saturation : 5 jours

Consolidation : 5 jours

NUMERO DE L'EPROUVETTE	OBSERVATIONS			
	1	2	3	4
ETAT INITIAL	16.7	19.0	17.7	19.3
Teneur en eau	1.84	1.77	1.82	1.81
Densité sèche (γ_d / γ_w)	0.498	0.555	0.513	0.519
Indice des vides	92.2	94.3	94.7	100.0
Degré de saturation	19.7	21.3	19.1	17.2
Teneur en eau	1.78	1.73	1.80	1.86
Densité sèche (γ_d / γ_w)	0.549	0.597	0.531	0.475
Indice des vides	96.6	99.6	98.7	99.8
Degré de saturation	50	100	200	400
PRESSION LATERALE σ_3 (kPa)	198	203	253	458
($\sigma_1 - \sigma_3$) RUPTURE (kPa)	-31	-4	95	119
PRESSION INTERSTITIELLE A LA RUPTURE (kPa)	10.0	7.4	3.0	5.0
DEFORMATION A LA RUPTURE (%)				





GROUPEMENT DE BORDEAUX

LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

NUMERO DE L'EPROUVETTE

ETAT INITIAL

ETAT FINAL

Teneur en eau	48.7	48.6	48.7	47.2
Densité sèche (γ_d/γ_w)	1.21	1.20	1.19	1.21
Indice des vides	1.271	1.286	1.309	1.274
Degré de saturation	100.0	100.0	100.0	100.0
Teneur en eau	51.0	48.8	47.1	44.2
Densité sèche (γ_d/γ_w)	1.17	1.20	1.22	1.27
Indice des vides	1.344	1.295	1.251	1.163
Degré de saturation	100.0	100.0	100.0	100.0

PRESSION LATERALE σ_3 (kPa)

($\sigma_1 - \sigma_3$) RUPTURE (kPa)

PRESSION INTERSTITIELLE A LA RUPTURE (kPa)

DEFORMATION A LA RUPTURE (%)

50	100	200	400
128	130	241	338
23	34	86	126
2.1	1.9	4.2	5.2

OBSERVATIONS

Critère de rupture :

σ_1/σ_3

Contrepression : 200 kPa

Saturation : 5 jours

Consolidation : 5 jours

ESSAI TRIAXIAL

Préparé : Consolidé Non Drainé

DOSSIER : BORDEAUX

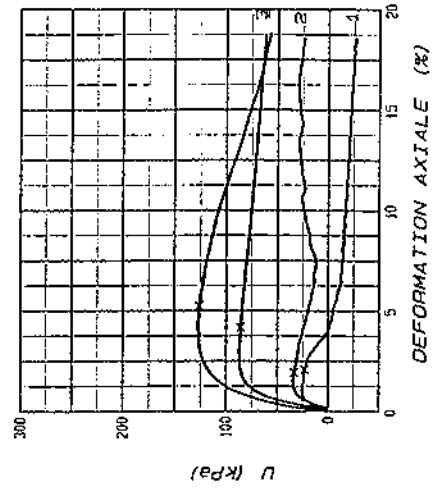
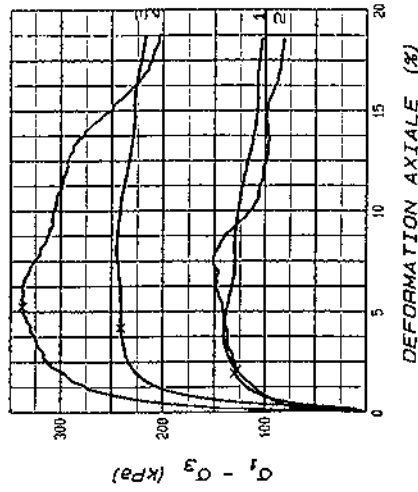
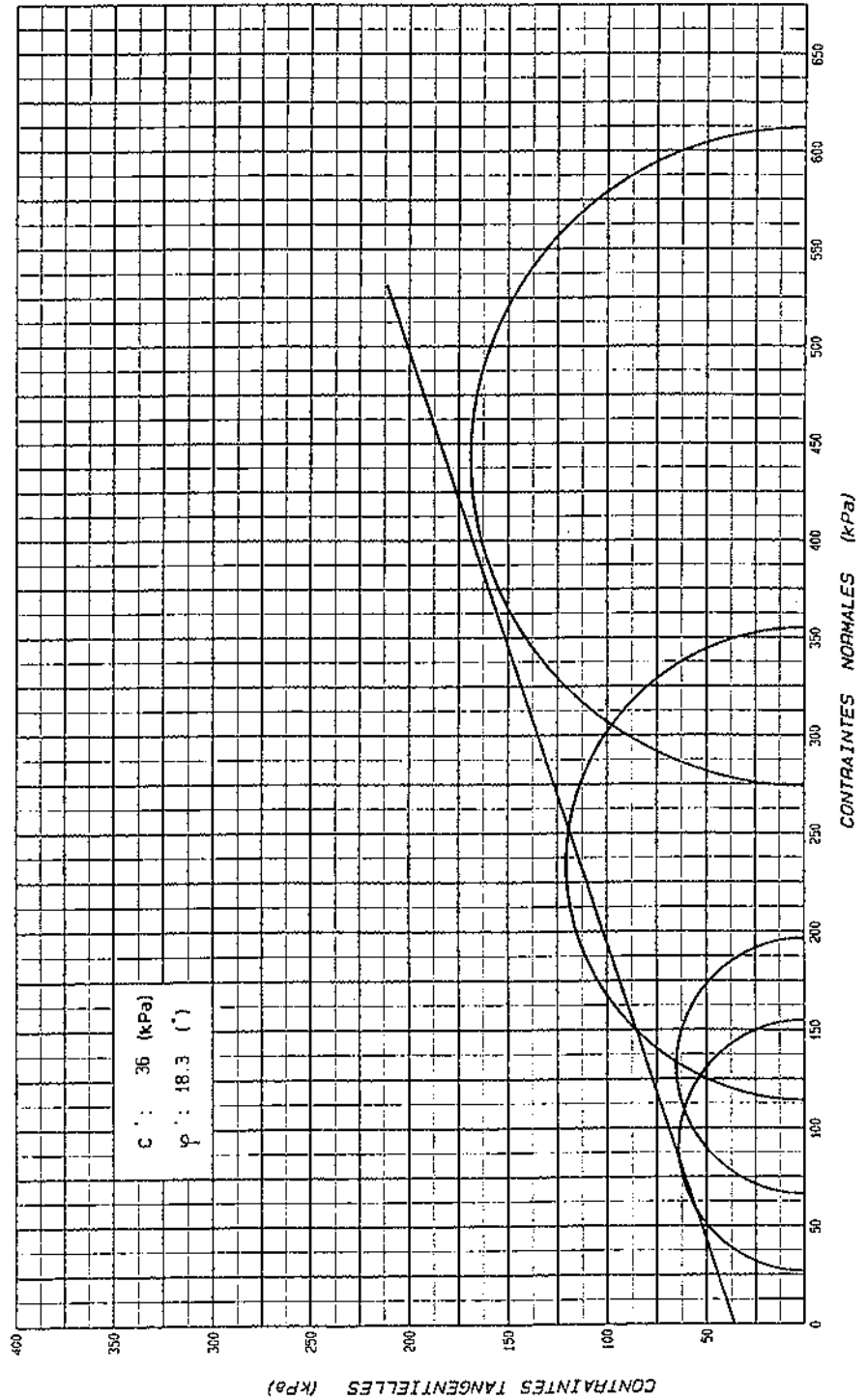
Echantillon : S 01 Prof : 8.50m
8.60m

Densité des grains (γ_s/γ_w) : 2.75

Eprouvette : h : 80 mm - ϕ : 35 mm

Echantillon : non remanié

Vitesse de déformation : 15 μ /mn





CEMAGREF

GROUPEMENT DE BORDEAUX

LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

ESSAI TRIAXIAL

Non Consolidé Non Drainé

DOSSIER : IUT

Echantillon : C 02 Prof : 2.10m
2.30m

Densité des grains (γ_s/γ_w) : 2.75

Eprouvette : h : 80 mm - ϕ : 35 mm

Echantillon : non remanié

Vitesse de déformation : 15 μ/m

OBSERVATIONS

Critère de rupture :

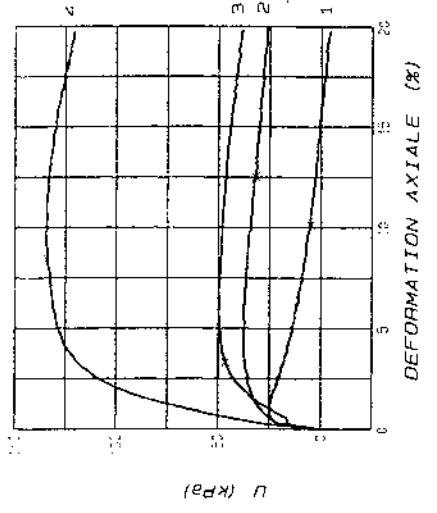
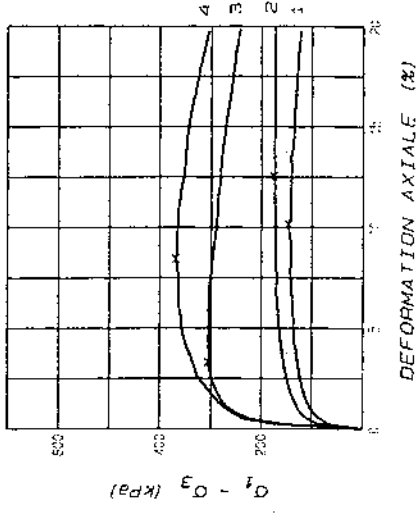
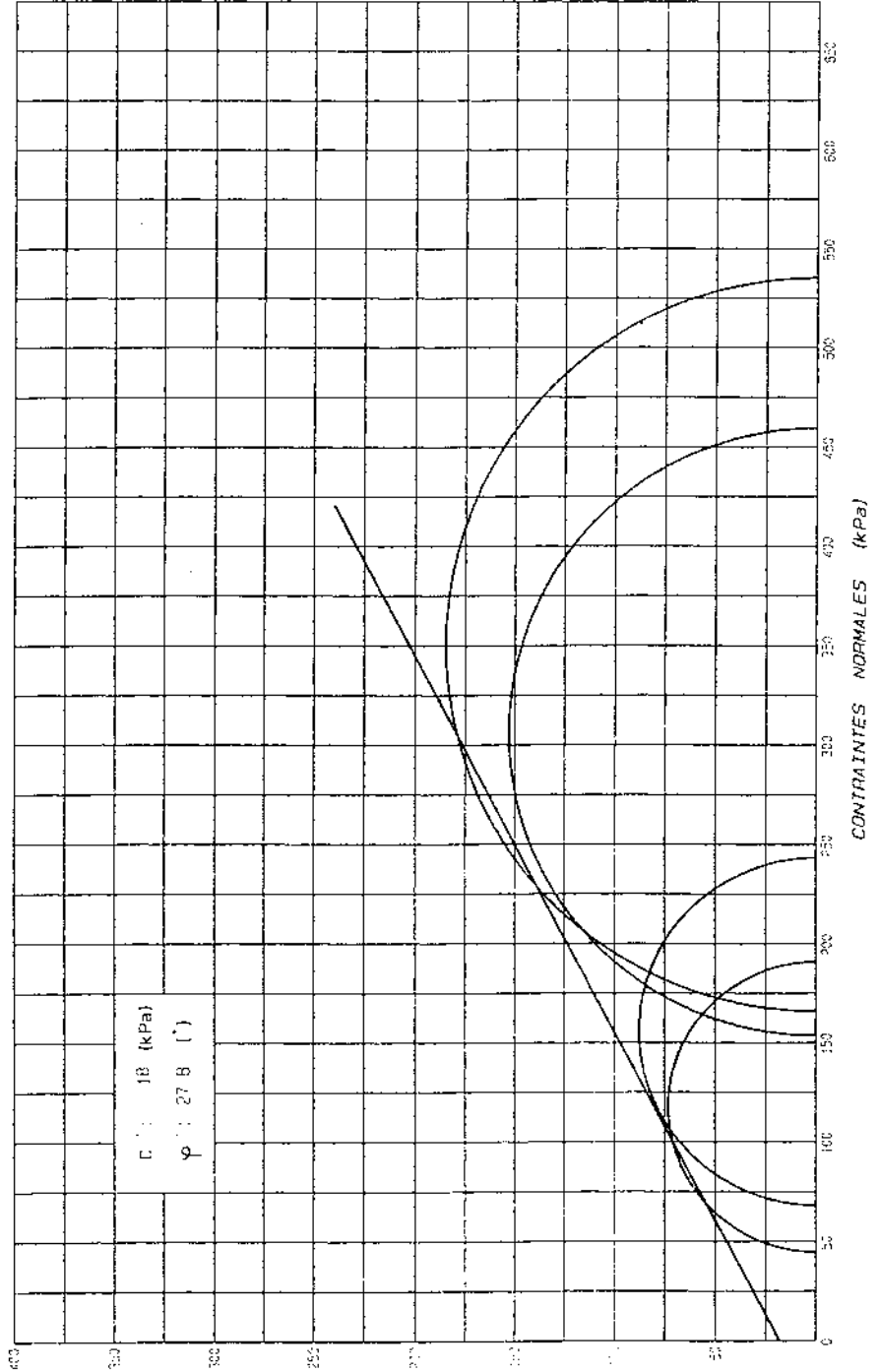
* 31 - 03

Contrepression : 200 kPa

Saturation : 5 jours

Consolidation : 5 jours

NUMERO DE L'EPROUVETTE		1	2	3	4
ETAT INITIAL	Teneur en eau	27.7	28.0	25.2	25.0
	Densité sèche (γ_d/γ_w)	1.55	1.52	1.50	1.52
	Indice des vides	0.773	0.810	0.714	0.701
ETAT FINAL	Degré de saturation	98.6	95.0	97.0	98.1
	Teneur en eau	28.9	28.9	23.9	23.3
	Densité sèche (γ_d/γ_w)	1.53	1.55	1.57	1.59
PRESSION LATERALE σ_3 (kPa)	Indice des vides	0.793	0.772	0.643	0.627
	Degré de saturation	100.0	100.0	100.0	100.0
	PRESSION LATERALE σ_3 (kPa)	50	100	200	300
PRESSION INTERSTITIELLE A LA RUPTURE (kPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ RUPTURE (kPa)	145	175	306	389
	PRESSION INTERSTITIELLE A LA RUPTURE (kPa)	5	32	45	134
	DEFORMATION A LA RUPTURE (%)	10.1	12.5	3.3	8.4





CEMAGREF

GROUPEMENT DE BORDEAUX

LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

ESSAI TRIAXIAL

TYPE Consolidé Non Drainé

DOSSIER : IUT

Echantillon : C 02 Prof : 3,70m
4,10m

Densité des grains (γ_s/γ_w) : 2,75

Eprouvette : h : 80 mm - D : 38 mm

Echantillon : non remanié ~~consolidé~~

Vitesse de déformation : 15 μ/m

OBSERVATIONS

Critère de rupture :

* $\sigma_1 - \sigma_3$

Contrainte : 200 kPa

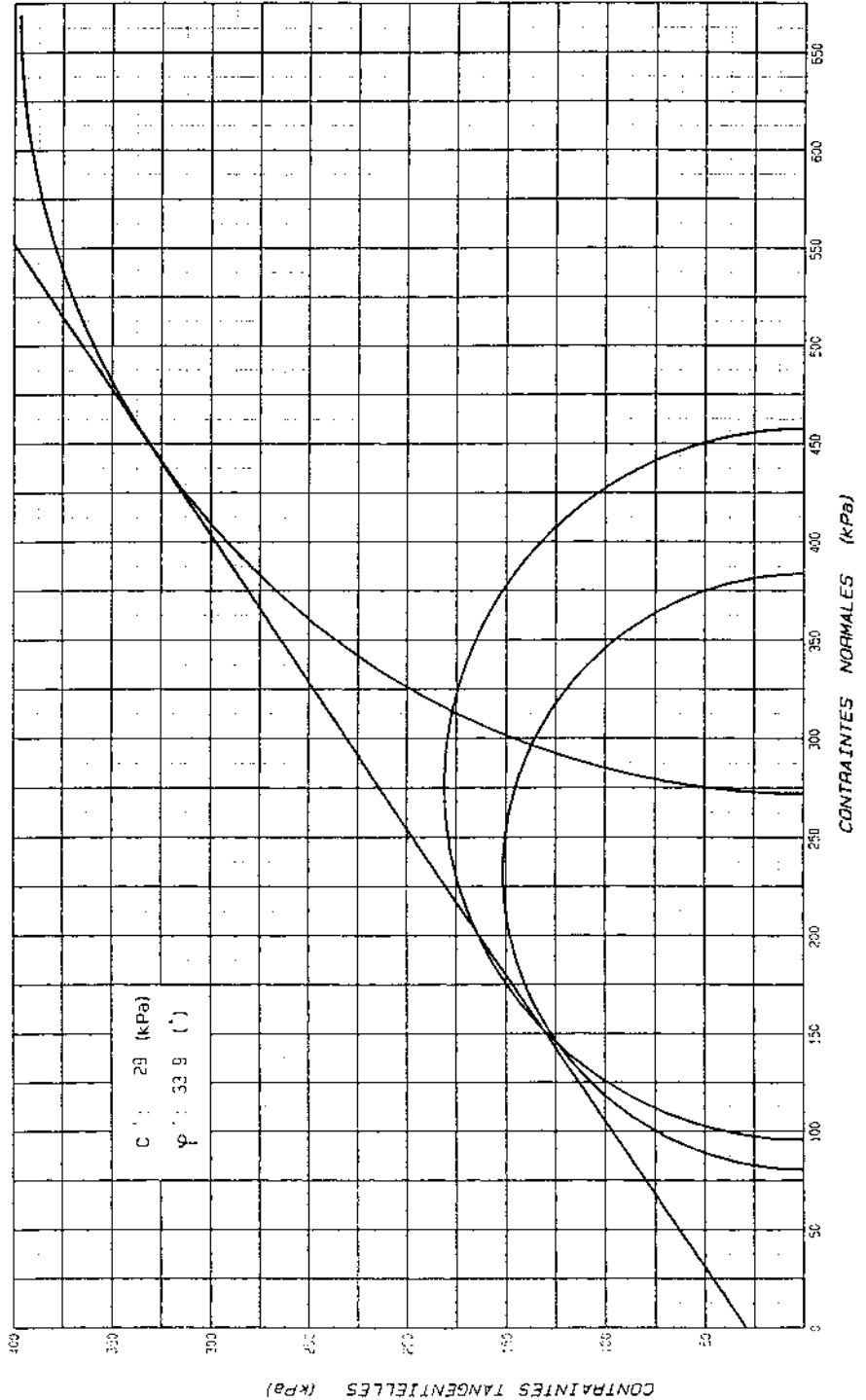
Saturation :

6 jours

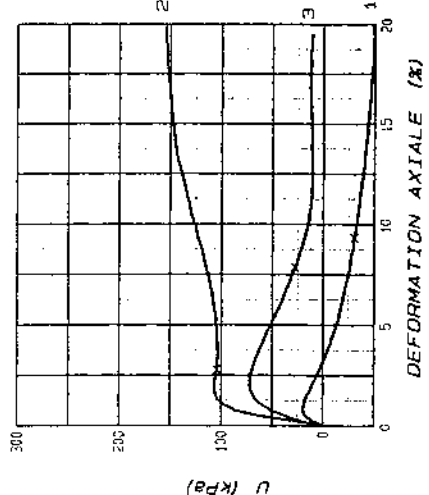
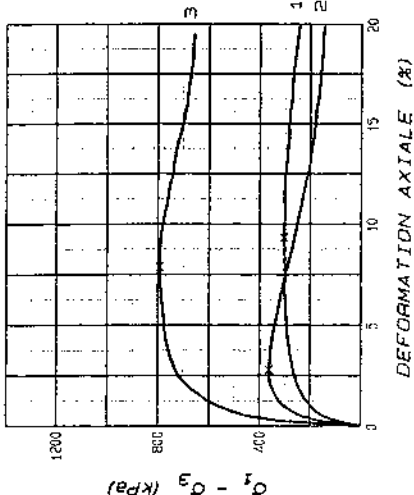
Consolidation :

6 jours

NUMERO DE L'EPROUVETTE	OBSERVATIONS			
	1	2	3	4
ETAT INITIAL	17,1 1,81 0,520 90,2	16,5 1,78 0,544 83,2	21,2 1,72 0,598 97,7	
ETAT FINAL	18,5 1,93 0,502 100,0	19,6 1,79 0,541 99,8	19,6 1,79 0,540 99,8	
PRESSION LATERALE σ_3 (kPa)	50	200	300	
($\sigma_1 - \sigma_3$) RUPTURE (kPa)	303	362	794	
PRESSION INTERSTITIELLE A LA RUPTURE (kPa)	-31	104	28	
DEFORMATION A LA RUPTURE (%)	9,3	2,8	7,9	



$c' : 29$ (kPa)
 $\phi' : 33,9$ ($^\circ$)





GROUPEMENT DE BORDEAUX

LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

ESSAI TRIAXIAL

Non Consolidé Non Drainé

DOSSIER : IUT

Echantillon : C 02 Prof : 4,70m
5,10m

Densité des grains (γ_s / γ_w) : 2,75

Eprouvette : h : 80 mm - D : 35 mm

Echantillon : non remanié

Vitesse de déformation : 15 μ/m

OBSERVATIONS

Critère de rupture :

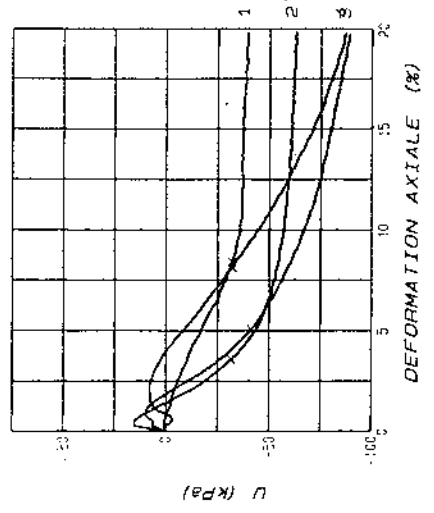
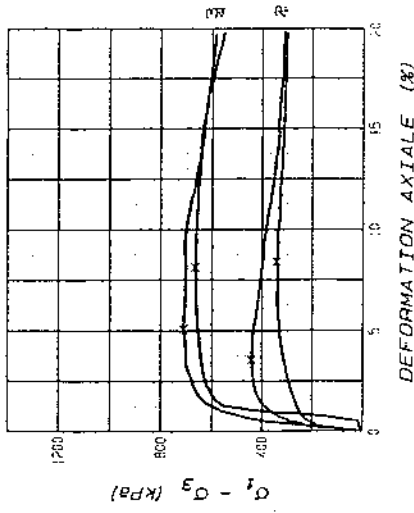
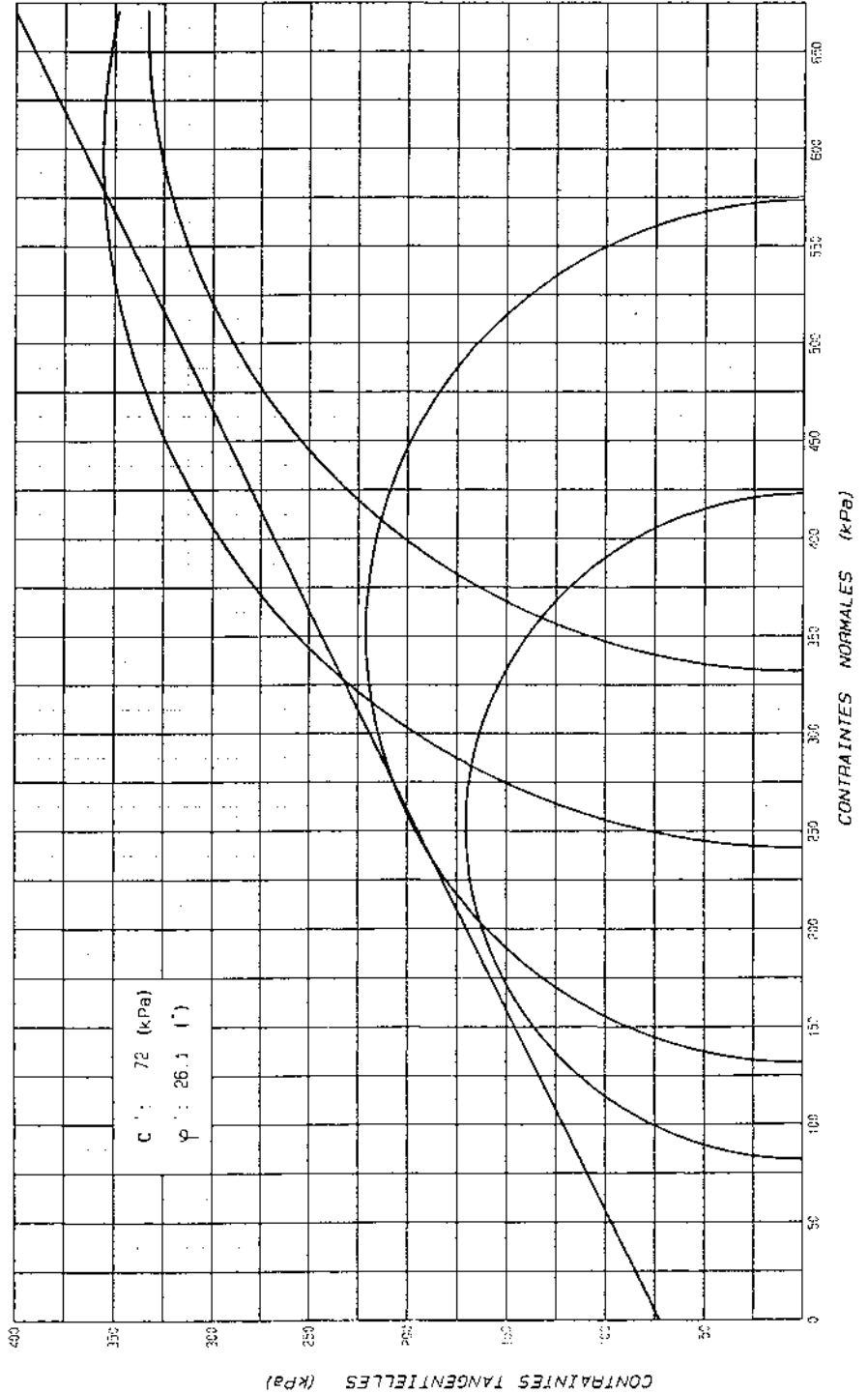
* $\sigma_1 - \sigma_3$

Contrepression : 200 kPa

Saturation : 5 jours

Consolidation : 5 jours

NUMERO DE L'EPROUVETTE		1	2	3	4
ETAT INITIAL	Teneur en eau	14,6	16,7	21,6	20,4
	Densité sèche (γ_d / γ_w)	1,74	1,76	1,92	1,73
	Indice des vides	0,578	0,586	0,515	0,598
	Degré de saturation	70,4	90,7	100,0	95,5
ETAT FINAL	Teneur en eau	18,0	20,0	16,3	17,7
	Densité sèche (γ_d / γ_w)	1,62	1,77	1,90	1,86
	Indice des vides	0,509	0,553	0,448	0,481
	Degré de saturation	97,1	99,5	100,0	100,0
PRESSION LATÉRALE σ_3 (kPa)		50	100	200	300
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ RUPTURE (kPa)		341	442	712	666
PRESSION INTERSTITIELLE A LA RUPTURE (kPa)		-32	-32	-41	-32
DEFORMATION A LA RUPTURE (%)		8,4	3,6	5,1	8,1





GROUPEMENT DE BORDEAUX

LABORATOIRE

DE

MECANIQUE DES SOLS

NUMERO DE L'ÉPROUVETTE

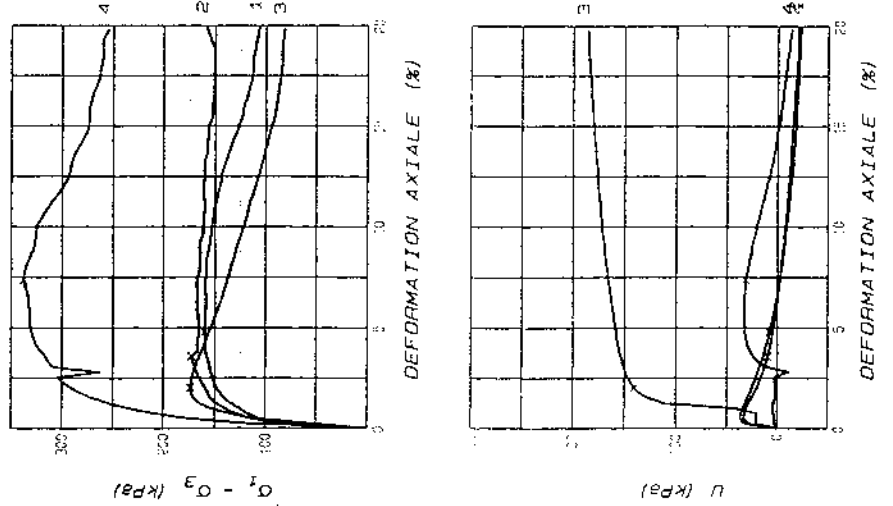
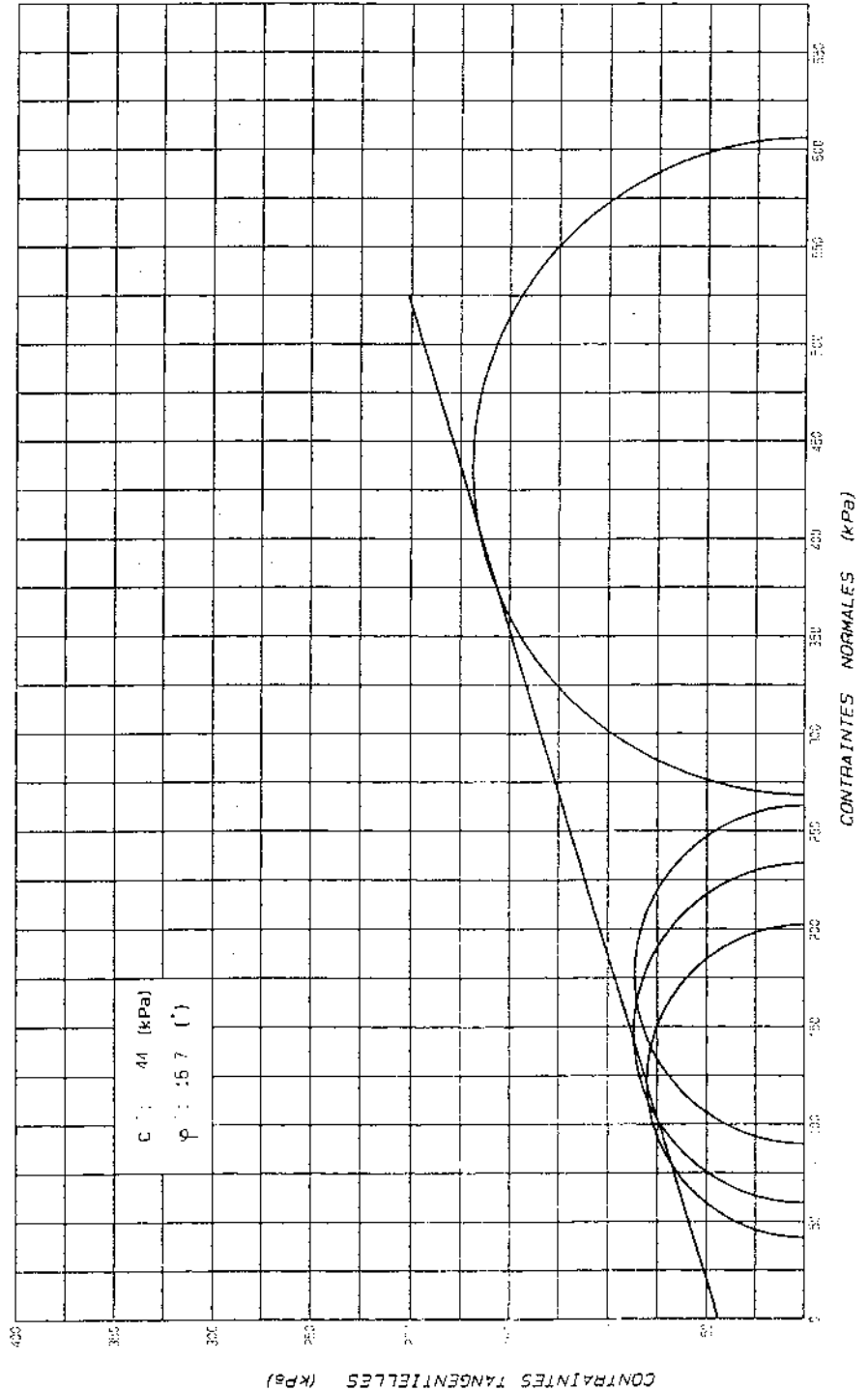
ETAT INITIAL	1	2	3	4
Teneur en eau	42.3	41.3	46.0	40.4
Densité sèche (γ_s / γ_w)	1.26	1.29	1.24	1.29
Indice des vides	1.154	1.133	1.220	1.130
Degré de saturation	100.0	100.0	100.0	98.4
ETAT FINAL	44.9	45.5	50.9	40.6
Teneur en eau	1.24	1.23	1.17	1.31
Densité sèche (γ_s / γ_w)	1.218	1.233	1.358	1.093
Indice des vides	100.0	100.0	100.0	100.0
Degré de saturation	50	100	200	300
PRESSON LATÉRALE σ_3 (kPa)	150	173	174	337
$(\sigma_1 - \sigma_3)$ RUPTURE (kPa)	8	10	140	31
PRESSON INTERSTITIELLE A LA RUPTURE (kPa)	4.8	3.6	2.0	7.4
DEFORMATION A LA RUPTURE (%)				

OBSERVATIONS

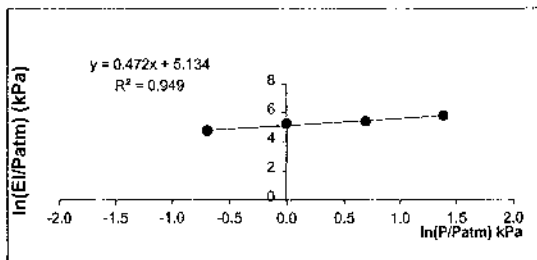
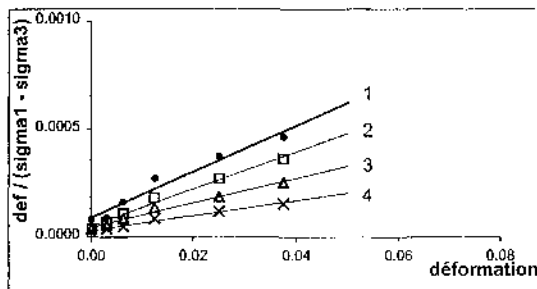
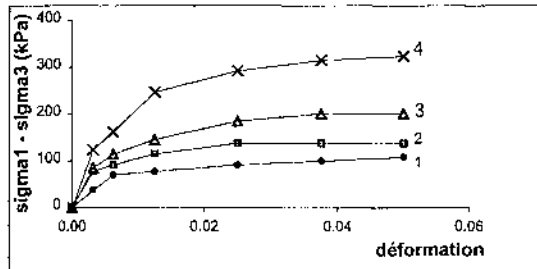
Critère de rupture : * $\sigma_1 - \sigma_3$
 Contrepression: 200 kPa
 Saturation : 5 jours
 Consolidation : 5 jours

ESSAI TRIAXIAL

Non Consolidé Non Drainé
 DOSSIER : IUT
 Echantillon : C 02 Prof: 10,40m
 10,80m
 Densité des grains (γ_s / γ_w) : 2.75
 Éprouvette : h : 80 mm - ϕ : 35 mm
 Echantillon : non remanié
 Vitesse de déformation : 15 μ /mn



Annexe 23 : Estimation des modules E_i à la cote des essais pressiométriques pour l'ensemble des échantillons soumis aux essais triaxiaux - Site expérimental de l'IUT



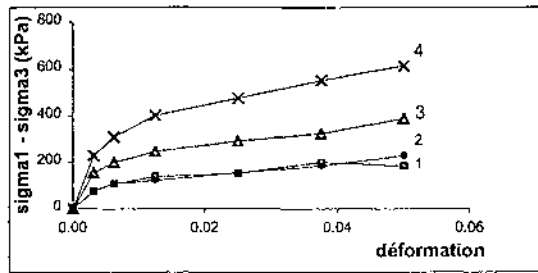
Sondage C1 Z (m) 2.00 - 2.20

gamma sol	18
z	2
contrainte effective/ P_{atm}	0.22

kN/m³
m

E_i/P_{atm}	62.32
$\ln(E_i/P_{atm})$ estime par reg	4.41
E_i	8232
$E_{pressio}$	7500
$\ln E$	8.92

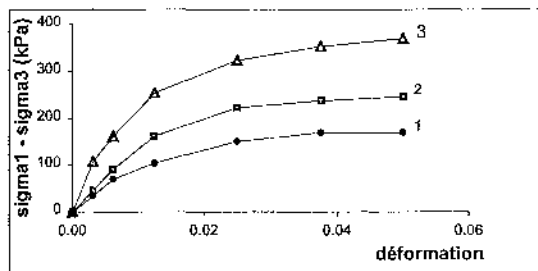
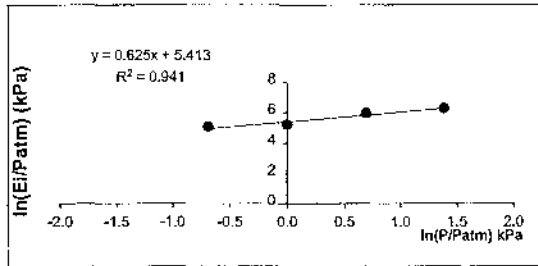
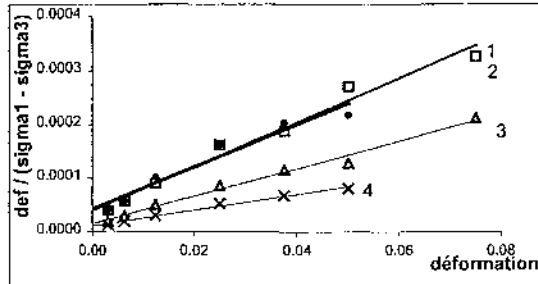
kPa
kPa



Sondage C1 Z (m) 3.00 - 3.50

gamma sol	18	kN/m3 m
z	3	
contrainte effective/Patm	0.32	

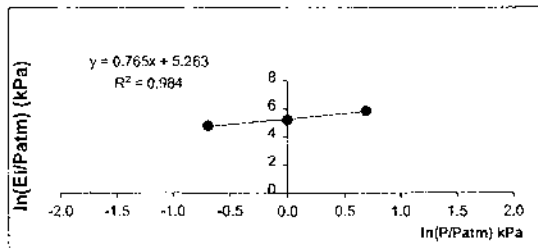
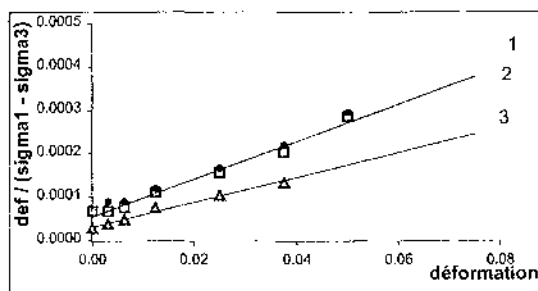
Ei/Patm	110.82	kPa kPa
ln (Ei/Patm) estimé par rég	4.70	
Ei	11082	
E pressio	16700	
ln E	9.72	

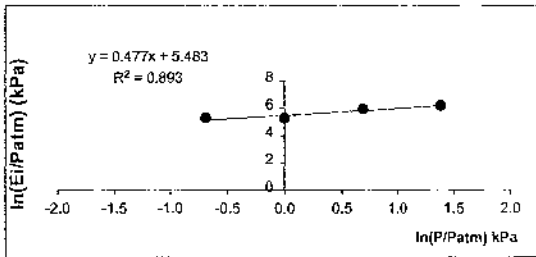
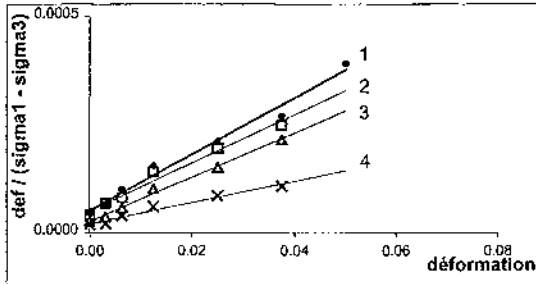
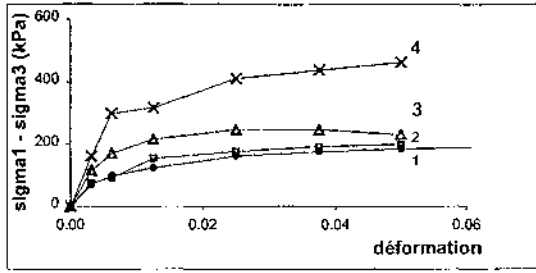


Sondage C1 Z (m) 4.10 - 4.20

gamma sol	18	kN/m3 m
z	4	
contrainte effective/Patm	0.44	

Ei/Patm	103.48	kPa kPa
ln (Ei/Patm) estimé par rég	4.60	
Ei	10348	
E pressio	23300	
ln E	10.06	

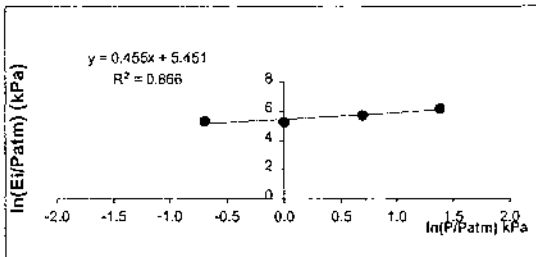
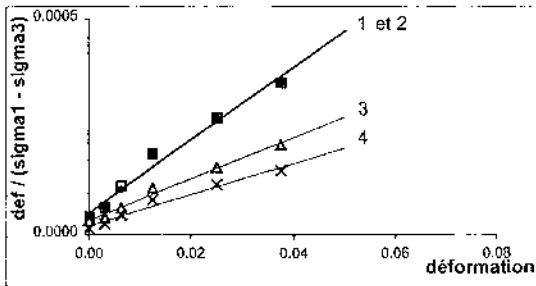
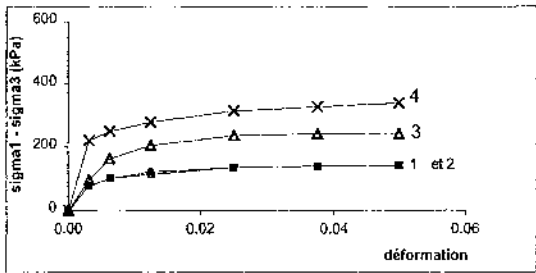




Sondage C1 Z (m) 5.10 - 5.30

gamma sol	18	kN/m3
z	5	m
contrainte effective/Patm	0.55	

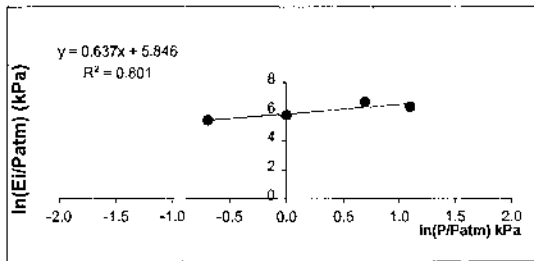
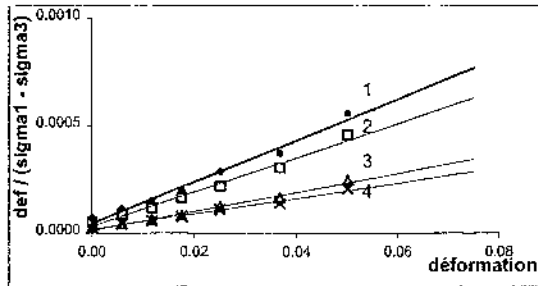
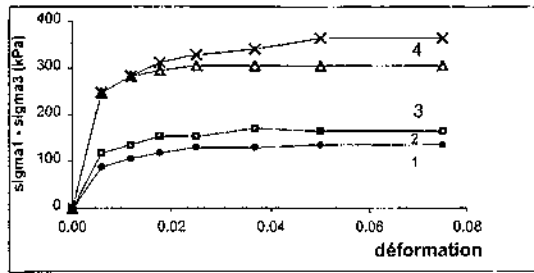
Ei/Patm	180.92	
ln (Ei/Patm) estimé par rég	5.20	
Ei	18092	kPa
E pressio	31000	kPa
ln E	10.34	



Sondage C1 Z (m) 8.50 - 8.60

gamma sol	18	kN/m3
z	9	m
contrainte effective/Patm	0.92	

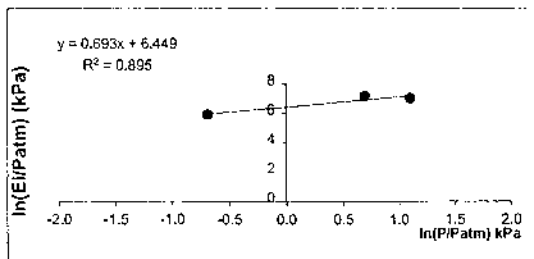
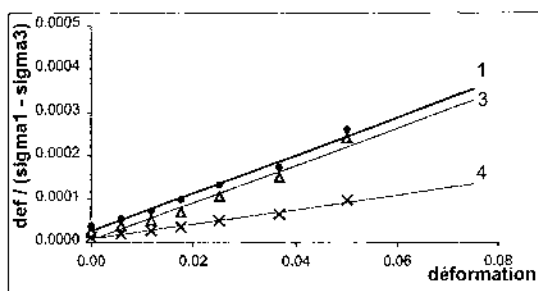
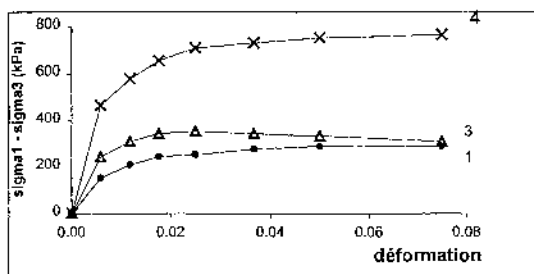
Ei/Patm	224.05	
ln (Ei/Patm) estimé par rég	5.40	
Ei	22405	kPa
E pressio	57000	kPa
ln E	10.95	



Sondage C2 Z (m) 2.10 - 2.30

gamma sol	18	kN/m ³
z	2	m
contrainte effective/Patm	0.24	

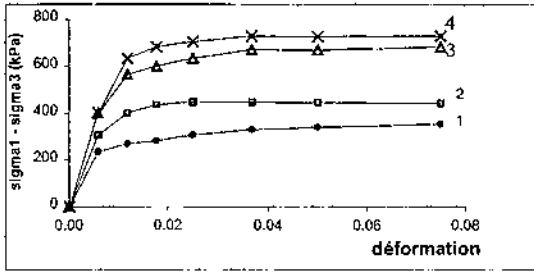
Ei/Patm	138.35	
ln (Ei/Patm) estimé par rég	4.93	
Ei	13835	kPa
E pressio	4300	kPa
ln E	8.37	



Sondage C2 Z (m) 3.70 - 4.10

gamma sol	18	kN/m ³
z	4	m
contrainte effective/Patm	0.42	

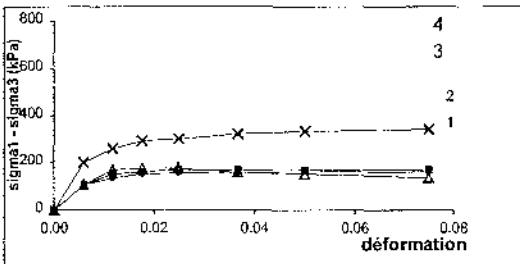
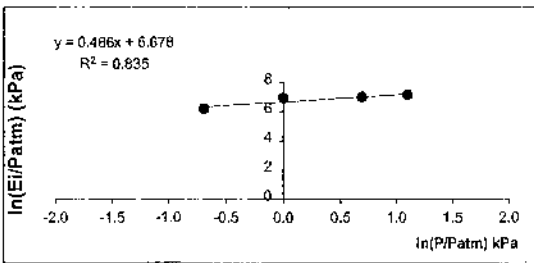
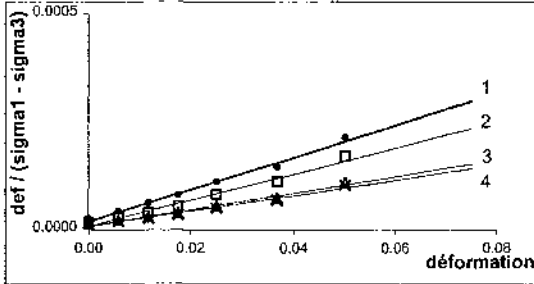
Ei/Patm	347.13	
ln (Ei/Patm) estimé par rég	5.85	
Ei	34713	kPa
E pressio	8500	kPa
ln E	9.05	



Sondage C2 Z (m) 4.70 - 5.10

gamma sol	18	kN/m3
z	5	m
contrainte effective/Patm	0.53	

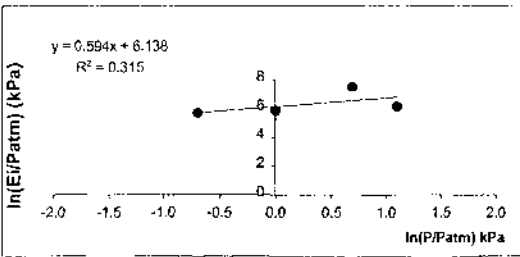
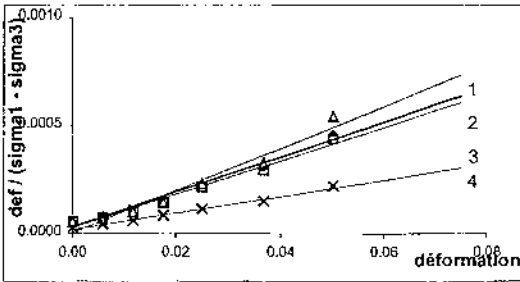
Ei/Patm	583.44	
ln (Ei/Patm) estime par rég	6.37	
Ei	58344	kPa
E pressio	29000	kPa
ln E	10.28	



Sondage C2 Z (m) 10.40 - 10.80

gamma sol	18	kN/m3
z	11	m
contrainte effective/Patm	1.14	

Ei/Patm	501.96	
ln (Ei/Patm) estime par rég	6.22	
Ei	50196	kPa
E pressio	19900	kPa
ln E	9.90	



Annexe 24 : Tableaux récapitulatifs des données diagraphiques et pressiométriques relatives au site expérimental de l'IUT avant et après élimination des valeurs suspectes.

n° sondage	z essai	VA	Pi	Po	CR	P.ret	VR	pf	pl	E
SP1	1	52.95	0.00	4.58	2.73	6.49		0.34	0.48	3.00
SP1	2	26.90	0.02	3.92	0.83	4.37		0.62	0.76	7.40
SP1	3	70.51	0.00	3.81	2.35	3.27		0.79	1.25	8.90
SP1	4	36.75	0.04	4.65	1.08	7.67		0.89	1.17	15.40
SP1	5	22.98	0.03	4.47	1.44	7.62		0.75	1.12	13.70
SP1	6	23.57	0.01	4.57	1.04	7.08		0.64	0.94	8.30
SP1	7	20.35	0.02	6.50	2.10	7.77		1.42	2.33	19.90
SP1	8	31.55	0.03	3.61	0.59	5.09		2.56	4.36	22.30
SP1	9	38.14	0.03	3.56	1.17	3.69		2.24	3.80	16.70
SP1	10	47.84	0.02	3.54	1.92	3.40		1.67	2.53	12.10
SP1	11	32.25	0.04	2.70	0.90	2.91		1.86	2.76	18.00
SP1	12	45.14	0.02	2.62	1.62	3.38		0.80	1.25	9.30
SP2	1	75.94	0.05	0.88	1.10	0.60	17.97	0.30	0.51	0.20
SP2	2	34.50	0.24	1.08	2.08	1.02	30.02	0.49	0.70	10.50
SP2	3	71.79	0.26	0.84	2.08	0.71	30.96	0.71	0.97	8.20
SP2	4	52.77	0.28	0.84	2.13	0.81	30.63	0.69	1.04	13.50
SP2	5	106.25	0.67	1.43	1.97	1.33	31.12	0.47	0.64	12.90
SP2	6	53.36	0.43	1.12	1.90	0.76	32.29	0.54	0.67	9.10
SP2	7	61.62	1.04	1.00	1.23	0.64	19.59	0.38	0.50	3.40
SP2	8	69.41	1.30	0.91	1.37	0.83	19.65	0.50	0.64	7.50
SP2	9	56.02	1.35	1.62	1.48	0.68	20.84	0.61	0.87	5.30
SP2	10	116.23	1.30	2.81	1.86	1.81	12.16	0.71	0.91	6.80
SP2	11	144.55	1.34	1.05	1.30	0.85	11.88	0.84	1.43	3.70
SP3	1	139.592	0.209	0.965	1.406			0.2	0.3	1.40
SP3	2	156.102	0.189	1.813	0.940			0.9	1.1	15.00
SP3	3	161.822	0.027	1.797	1.057			0.8	1.4	5.00
SP3	4	100.248	0.397	2.032	2.074			1.1	1.6	13.00
SP3	5	90.636	0.446	1.798	2.482			0.7	0.9	14.00
SP3	6	87.578	0.885	2.071	2.385			1.5	2.1	14.00
SP3	8	124.715	1.246	2.499	1.328			1.2	1.6	9.00
SP3	9	46.881	0.803	3.100	1.633			1.0	1.8	7.00
SP3	10	75.318	0.909	3.941	2.882			1.1	1.8	8.00
SP3	11	208.500	0.458	5.539	2.347			0.7	1.0	7.00
SP4	1	85.142	0.100	7.005	5.633			0.17	0.29	4.80
SP4	2	79.021	0.394	7.041	6.230			0.34	0.57	7.50
SP4	3	70.850	0.528	7.012	5.905			0.73	1.24	16.70
SP4	4	69.099	0.781	6.976	6.352			1.14	1.94	23.30
SP4	5	33.964	0.494	7.795	8.006			1.95	3.32	31.00
SP4	6	55.662	0.394	7.814	7.265			2.20	3.73	68.00
SP4	7	37.992	0.749	7.661	7.443			1.81	3.08	57.00
SP4	8	34.973	1.426	7.572	7.600			1.40	2.37	27.00
SP4	9	18.732	0.227	7.335	7.397			2.80	4.76	87.00
SP4	10	11.145	0.220	7.378	8.986			2.71	4.61	84.00
SP4	11	46.723	0.917	8.326	8.507			1.96	3.33	40.00
SP5	1	67.939	0.057	3.936	1.504	8.910		0.41	0.6	3.2
SP5	2	57.445	0.225	4.128	0.621	7.731		0.39	0.51	4.6
SP5	3	46.353	0.412	4.702	1.017	7.996		0.75	1.05	6.5
SP5	4	15.868	0.229	4.689	0.471	4.459		2.43	4.14	26.4
SP5	5	20.701	0.217	4.480	0.173	5.460		2.54	4.31	56.6
SP5	6	33.201	0.133	3.905	1.511	3.906		2.03	3.46	17.8
SP5	7	35.254	0.255	5.073	2.705	4.540		1.83	3.11	10.9
SP5	8	26.401	0.002	3.725	1.573	6.858		0.6	1.02	3.7
SP5	9	31.374	0.393	3.811	1.039	8.443		0.41	0.57	5.7
SP5	10	40.525	0.026	3.524	2.174	3.555		0.53	0.67	3.3
SP5	12	361.969	0.184	3.469	1.263	3.731		0.1	0.17	0.5
SP5	13	403.987	0.282	3.328	0.783	3.433		0.14	0.15	0.5
SP6	1	76.967	0.107	3.958	1.262	9.363		0.24	0.41	0.90
SP6	2	48.197	0.497	4.224	0.505	8.232		0.44	0.75	3.40
SP6	3	45.964	0.824	4.482	0.332	8.464		0.83	0.99	4.90
SP6	4	26.513	0.322	3.829	0.022	4.931		2.67	3.15	14.70
SP6	5	32.493	0.202	3.824	1.153	4.946		2.59	4.41	14.00
SP6	6	53.160	0.223	3.652	1.772	3.473		3.58	6.09	12.00
SP6	7	35.502	0.214	3.713	1.413	5.597		3.42	5.81	18.20
SP6	8	28.893	0.388	3.997	1.303	5.500		3.04	5.18	20.20
SP6	9	28.990	0.273	2.942	0.882	4.636		3.87	6.58	25.50
SP6	10	27.875	1.008	3.890	2.131	4.259		1.93	3.00	32.60
SP6	11	14.356	0.294	4.094	1.039	4.115		3.27	5.57	30.10
SP7 JBLL	1	142.37	0.08	1.82	3.63			0.10	0.17	0.80
SP7 JBLL	2	40.65	0.02	2.63	3.90			0.20	0.34	1.50
SP7 JBLL	3	80.87	0.65	4.18	3.64			0.51	0.71	19.00
SP7 JBLL	4	29.15	0.11	6.06	4.21			1.23	2.09	6.30
SP7 JBLL	5	226.31	0.54	3.63	3.33			0.37	0.58	8.10
SP7 JBLL	6	85.31	0.82	2.63	3.07			0.50	0.59	7.80

Avant élimination
des valeurs
suspectes

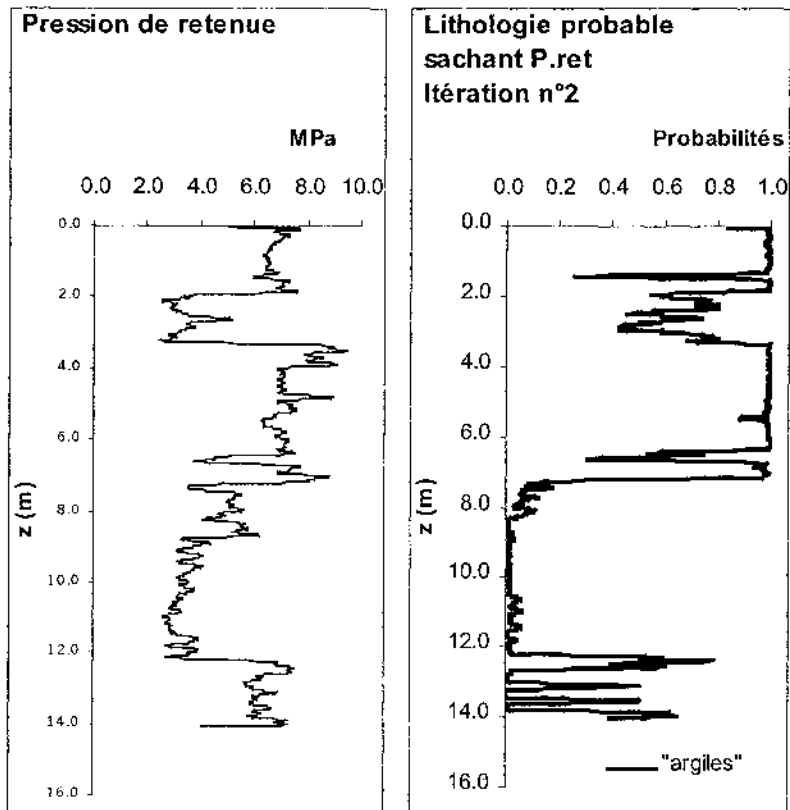
n° sondage	z essai	VA	Pi	Po	CR	P.ret	VR	pf	pl	E
SP1	1	52.95	0.00	4.58	2.73	6.49		0.34	0.48	3.00
SP1	2	26.90	0.02	3.92	0.83	4.37		0.62	0.76	7.40
SP1	3	70.51	0.00	3.81	2.35	3.27		0.79	1.25	8.90
SP1	4	36.75	0.04	4.65	1.08	7.67		0.89	1.17	15.40
SP1	5	22.98	0.03	4.47	1.44	7.62		0.75	1.12	13.70
SP1	6	23.57	0.01	4.57	1.04	7.08		0.64	0.94	8.30
SP1	7	20.35	0.02	6.50	2.10	7.77		1.42	2.33	19.90
SP1	8	31.55	0.03	3.61	0.59	5.09		2.56	4.36	22.30
SP1	11	32.25	0.04	2.70	0.90	2.91		1.86	2.76	18.00
SP1	12	45.14	0.02	2.62	1.62	3.38		0.80	1.25	9.30
SP2	2	34.50	0.24	1.08	2.08	1.02	30.02	0.49	0.70	10.50
SP2	3	71.79	0.26	0.84	2.08	0.71	30.96	0.71	0.97	8.20
SP2	4	52.77	0.28	0.84	2.13	0.81	30.63	0.69	1.04	13.50
SP2	5	106.25	0.67	1.43	1.97	1.33	31.12	0.47	0.64	12.90
SP2	6	53.36	0.43	1.12	1.90	0.76	32.29	0.54	0.67	9.10
SP2	7	61.62	1.04	1.00	1.23	0.64	19.59	0.38	0.50	3.40
SP2	8	69.41	1.30	0.91	1.37	0.83	19.65	0.50	0.64	7.50
SP2	9	56.02	1.35	1.62	1.48	0.68	20.84	0.61	0.87	5.30
SP2	10	116.23	1.30	2.81	1.86	1.81	12.16	0.71	0.91	6.60
SP3	2	156.702	0.189	1.813	0.940			0.9	1.1	15.00
SP3	4	100.248	0.397	2.032	2.074			1.1	1.6	13.00
SP3	5	90.636	0.446	1.798	2.482			0.7	0.9	14.00
SP3	6	87.578	0.885	2.071	2.385			1.5	2.1	14.00
SP3	8	124.715	1.246	2.499	1.328			1.2	1.6	9.00
SP3	11	208.500	0.458	5.539	2.347			0.7	1.0	7.00
SP4	1	85.142	0.100	7.005	5.633			0.17	0.29	4.80
SP4	2	79.021	0.394	7.041	6.230			0.34	0.57	7.50
SP4	3	70.850	0.526	7.012	5.905			0.73	1.24	16.70
SP4	4	69.099	0.781	6.976	6.352			1.14	1.94	23.30
SP4	5	33.964	0.494	7.795	8.006			1.95	3.32	31.00
SP4	6	55.662	0.394	7.814	7.265			2.20	3.73	68.00
SP4	7	37.992	0.749	7.661	7.443			1.81	3.08	57.00
SP4	8	34.973	1.426	7.572	7.600			1.40	2.37	27.00
SP4	9	18.732	0.227	7.335	7.397			2.80	4.76	87.00
SP4	10	11.145	0.220	7.378	8.988			2.71	4.61	84.00
SP4	11	46.723	0.917	8.326	8.507			1.96	3.33	40.00
SP5	1	67.939	0.057	3.936	1.504	8.910		0.41	0.6	3.2
SP5	2	57.445	0.225	4.128	0.621	7.731		0.39	0.51	4.6
SP5	3	46.353	0.412	4.702	1.017	7.996		0.75	1.05	6.5
SP5	4	15.868	0.229	4.689	0.471	4.459		2.43	4.14	26.4
SP5	5	20.701	0.217	4.480	0.173	5.460		2.54	4.31	56.6
SP5	6	33.201	0.133	3.905	1.511	3.906		2.03	3.46	17.8
SP5	9	31.374	0.393	3.811	1.039	8.443		0.41	0.57	5.7
SP6	10	27.875	1.008	3.890	2.131	4.259		1.93	3.00	32.60
SP6	11	14.356	0.294	4.094	1.039	4.115		3.27	5.57	30.10
SP7_jBLL	3	80.87	0.65	4.18	3.64			0.51	0.71	19.00
SP7_jBLL	5	226.31	0.54	3.63	3.33			0.37	0.58	8.70
SP7_jBLL	6	85.31	0.82	2.63	3.07			0.50	0.59	7.80
SP7_jBLL	7	50.72	0.45	1.80	2.99			0.63	0.87	12.50
SP7_jBLL	8	53.06	0.74	0.59	2.81			0.70	0.81	23.00
SP7_jBLL	9	60.63	0.53	1.40	3.10			0.43	0.50	5.10
SP7_jBLL	10	91.18	0.54	4.86	3.54			0.76	0.92	11.20
SP7_jBLL	11	118.19	0.68	2.96	3.27			0.66	0.83	14.00
SP7_jPLL	1	45.73	0.24	7.12	2.88			0.41	0.55	6.1
SP7_jPLL	2	66.52	0.31	1.49	2.88			0.37	0.49	12.4
SP7_jPLL	3	122.47	0.58	3.32	3.06			0.45	0.71	33
SP7_jPLL	4	59.31	0.70	2.39	2.89			0.59	0.84	6.4
SP7_jPLL	5	135.44	0.56	2.13	2.24			0.48	0.62	26
SP7_jPLL	6	63.77	0.70	1.75	2.88			0.56	0.66	7
SP7_jPLL	8	46.12	0.30	1.74	2.29			2.04	2.83	36
SP7_jPLL	9	49.48	0.47	1.08	1.81			1.82	3.10	19
SP7_jPLL	10	44.99	0.27	1.52	2.29			1.84	3.13	29
SP7_jBPV	1	83.50	0.16	0.70	0.89		15.60	0.16	0.28	1.90
SP7_jBPV	2	47.91	0.29	0.77	1.33		22.00	0.48	0.73	11.00
SP7_jBPV	3	41.35	0.41	1.54	1.59		21.87	0.47	0.67	20.20
SP7_jBPV	4	28.80	0.40	0.70	1.21		23.00	0.59	0.76	39.10
SP7_jBPV	5	26.43	0.15	0.80	1.38		21.84	1.23	1.86	9.60
SP7_jBPV	7	40.86	0.49	3.34	2.00		10.98	2.71	4.15	25.00
SP7_jBPV	8	40.87	0.34	2.42	1.64		11.00	2.08	3.23	20.40
SP7_jBPV	11	145.36	1.32	1.53	1.10		11.00	0.55	0.69	4.60
SP7_jBPV	14	65.32	0.40	0.63	1.15		24.28	0.16	0.27	1.40
SP7_vPLL	1	133.91	0.29	1.07	7.47			0.16	0.28	1.90
SP7_vPLL	2	96.16	0.58	1.11	7.75			0.48	0.73	11.00

Après élimination
des valeurs
suspectes

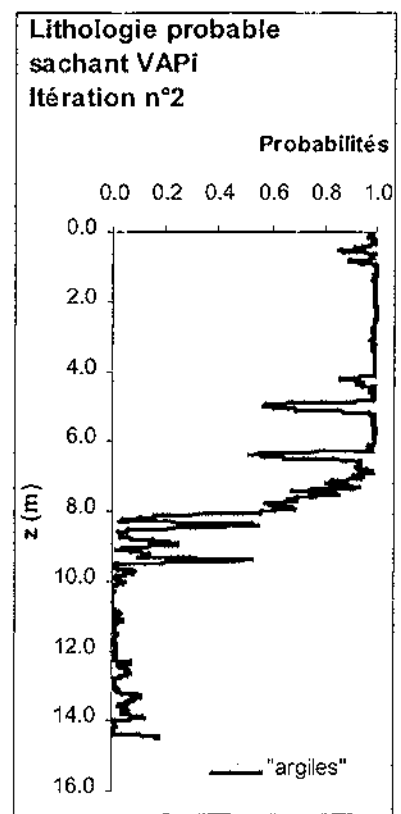
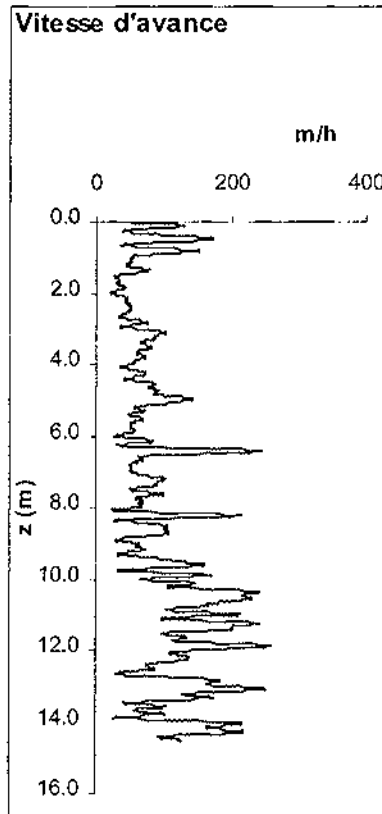
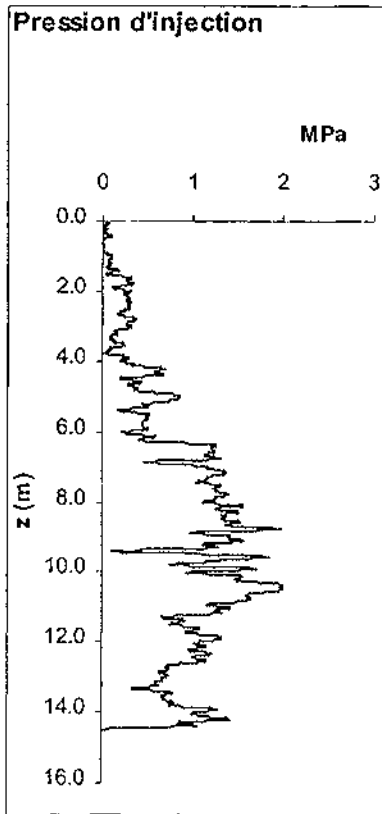
Annexe 25 : Log. des probabilités lithologiques obtenus via le processus itératif décrit partie II - Chapitre II pour les forages du site de l'IUT - Coupe a priori proposant 2 formations - Argile et Calcaire (seuil de convergence de $2 \cdot 10^{-2}$).

NB : Seule la probabilité d'appartenance à la formation argileuse est représentée, la probabilité d'appartenance à la formation calcaire étant son complémentaire.

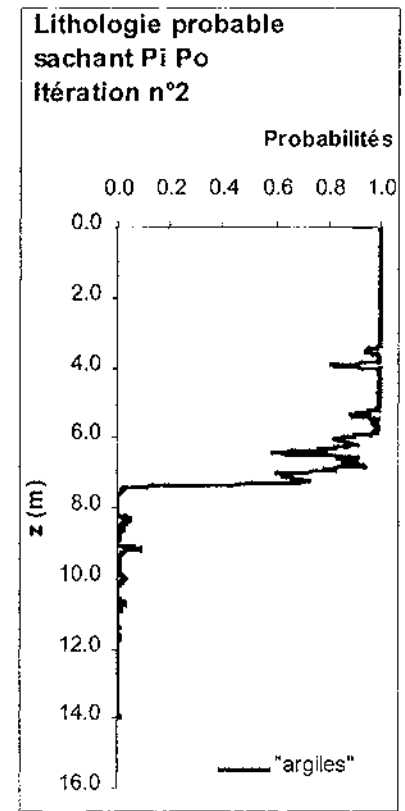
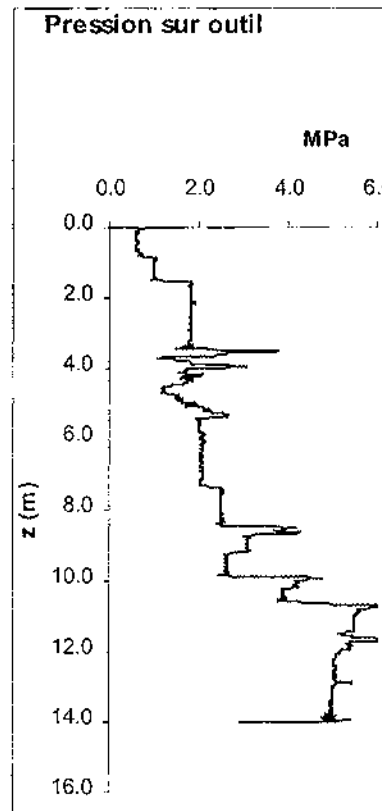
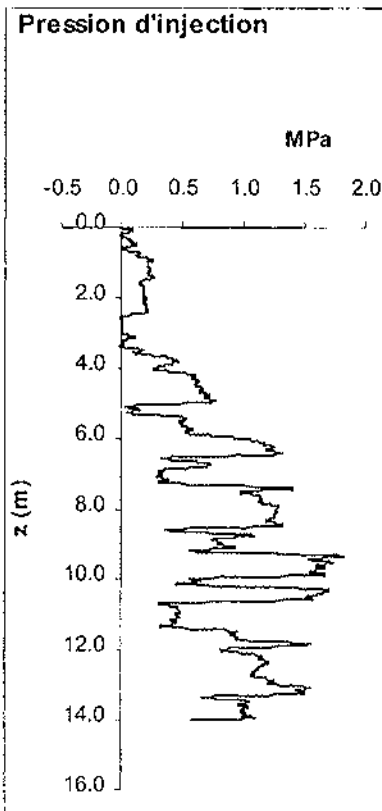
Forage SP1



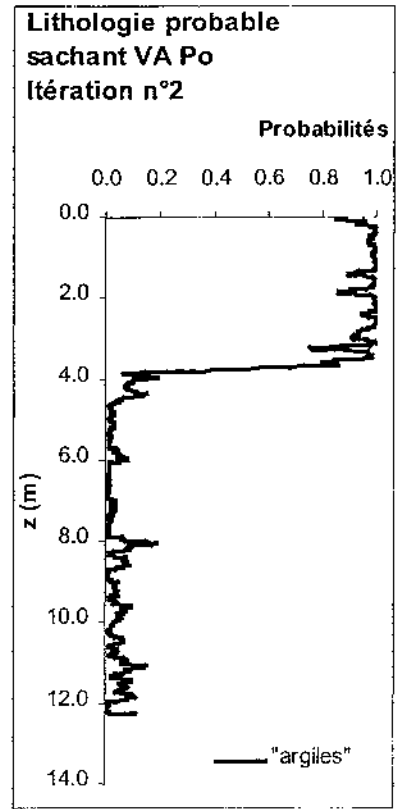
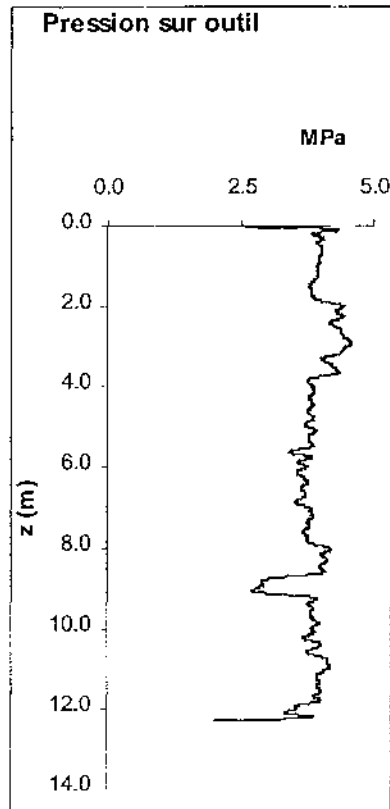
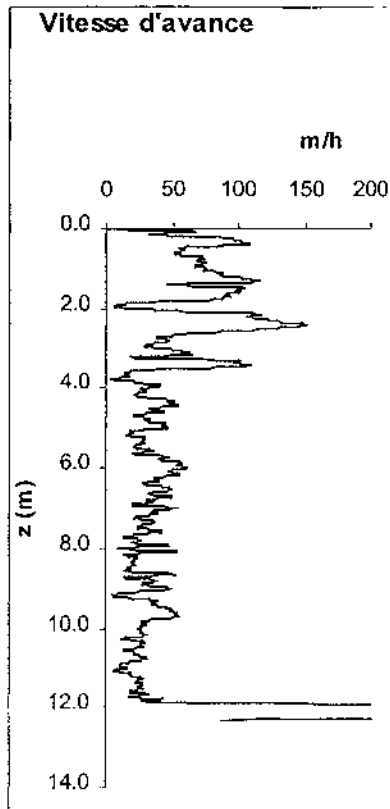
Forage SP2



Forage SP3



Forage SP6



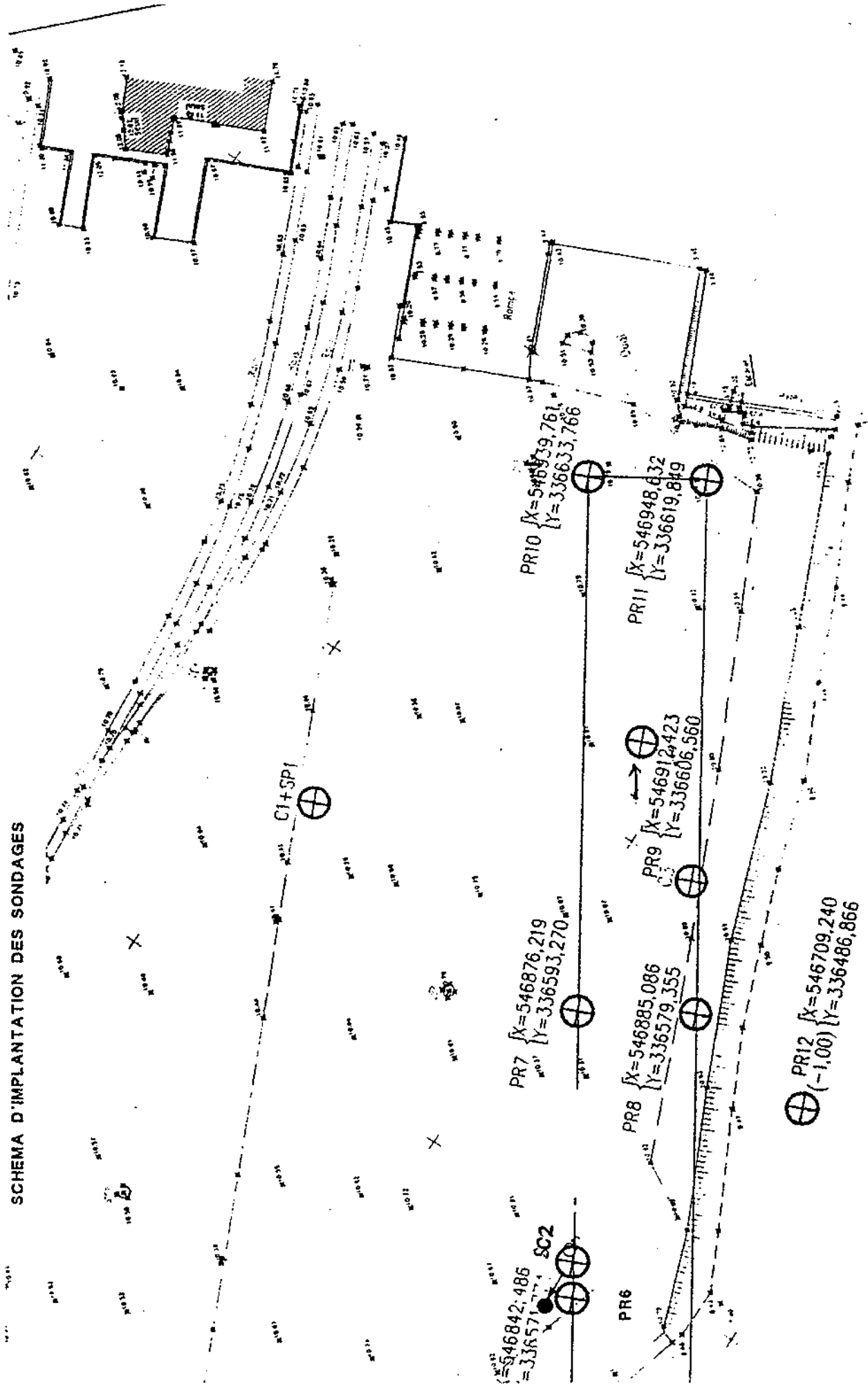
Annexe 26 : Tableau récapitulatif des équations de régression utilisées pour l'estimation des intervalles de valeurs pressiométriques (phase de reconnaissance 2.1).

Conditions de forage	Forages concernés	Equations de régression		coef. de corrélation	N
VPLL	SP1	"argile"	$\ln(pf^*) = -0.09 \ln(VA/Po) - 0.26$	-0.32	10
	SP5				
	SP6	"calcaire"	$\ln(pf^*) = -0.73 \ln(VA) + 3.02$	-0.67	9
jBPV	SP2	"argile"	$\ln(pf^*) = 0.55 \ln(CR) - 0.70$	0.37	18
	SP3				
	SP7jBPV	"calcaire"	$\ln(pf^*) = 1.80 \ln(CR) - 1.34$	0.62	10
	SP8				
JBLL	SP7jPLL		$\ln(pf^*) = -0.46 \ln(VA) + 1.24$	-0.40	8
jPLL	SP7jBLL		$\ln(pf^*) = -2.53 \ln(CR) + 2.20$	-0.66	9

Annexe 27 : Chantier de Boulogne

- *Plan d'implantation des sondages,*
- *log. pressiométriques et diagraphiques issus du rapport d'étude géotechnique.*

SCHEMA D'IMPLANTATION DES SONDAGES



ossier: 171567
 te : 22/04/98

* Eclatement de sonde

C.M.: 10.94 m

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette P _f * (Mpa)		Pression limite nette P _l * (Mpa)		Module Pressiometrique E _m (Mpa)	
		0.1	1.0	1	10	10	100
Remblais sableux			0.44		0.68		5.4
				>3.5		>6	
Sables	Tricone 63mm - Sonde BX Tubage PO		>0.9		>1.5		21
			>1		>1.7		20
			0.77		1.4		13
			0.88		1.4		11
			0.98		1.5		12
			0.51		0.82		4.3
			>1.2		>2		10
			>3.8		>6.5		>85
			>1.6		>2.7*		38
			0.78		2.4		93
Marnes à bancs	Sonde BX		0.79		1.8		170
			>1.9		>3.3*		43
gréseux	Tricone 63mm - Sonde AX		>2.8		>4.8*		>52
			2.2		4.1		60
			>1.8		>3.1		47
			>2.4		>4.1		64
			1.3		3.1		20

BOULOGNE SUR MER-Bassin Loubet

Sondage : PR 1

Dossier: 171567
Date : 22/04/98

* Eclatement de sonde

C.M.: 10.94 m

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette Pf* (Mpa)		Pression limite nette Pl* (Mpa)		Module Pressiométrique Em (Mpa)	
		0.1	1.0	1	10	10	100
Marnes à bancs créseux	Tricône 63mm - Sonde AX		>2.4		>4.1		>26
Bancs C à B			>3.8		>6.5		130
Marnes à bancs sableux			>3.3		>5.6		>210
Banc A			>1.7		>2.8*		52
Marnes			>3.4		>5.7*		>180

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette Pfx (Mpa)		Pression limite nette Plx (Mpa)		Module Pressiometrique Em (Mpa)	
		0.1	1.0	1	10	10	100
Sables	Tricone 63mm - Sonde AX Tubage PO sur la hauteur d'eau, ancré en toit des marnes		0.6	1.2		21	
Marnes à bancs gréseux		>4.4	>7.5	>250			
		>4.4	>7.4	>150			
		1.3	3.3	81			
		1.9	3.3	19			
Bancs C a B		>3.1	>5.3	55			
		>4.3	>7.3	>100			
		>3.8	>6.5	>130			
		>4.3	>7.3	>140			
Marnes à bancs sableux ou gréseux		>4.3	>7.4	>260			
		0.65	1.3	9.3			
		>4.4	>7.4	>210			
Banc A		>4.2	>7.1	>460			
Marnes à bancs sableux ou gréseux		>0.27	>0.45	>4			
		1.7	3	25			
Banc A'		>4.1	>6.9	>260			
Marnes à bancs sableux ou gréseux		>4.2	>7.1	>200			
		>4.8	>8.1	>140			
		>1.6	4.5	120			
		>3.9	>6.7	>200			

BOULOGNE SUR MER-Bassin Loubet

Sondage : PR 2

Dossier: 171567
Date : 19/05/98

* Eclatement de sonde

C.M.: -0.85 m

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette P _f x (Mpa)		Pression limite nette P _l x (Mpa)		Module Pressiométrique E _m (Mpa)	
		0.1	1.0	1	10	10	100
Marnes à bancs sableux ou gréseux	Tricone 63mm - Sonde AX à hauteur d'eau, ancre en		>4.2	>8.7	>7.1		>110
			>3.6		>6.2		>360

BOULOGNE SUR MER-Bassin Loubet

Sondage : PR 3

ossier: 171567

te : 14/05/98

* Eclatement de sonde

C.M.: -0.14 m

Coupe presuee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette Pfx (Mpa)		Pression limite nette Pix (Mpa)		Module Pressiometrique Em (Mpa)		
		0.1	1.0	1	10	10	100	1000
Marnes à bancs gréseux	Tricone 63mm - Sonde AX Tubage PQ sur la hauteur d'eau, ancré en toit des marnes		1.1		1.9		19	
			0.93		1.4		31	
			0.84		1.5		54	
			>3		>5.1		59	
			>1.7		>2.9		22	
Bancs C + C'			>2.4		>4		37	
			>3.8		>6.5		>87	
Marnes à bancs sableux			>4.3		>7.4		>540	
			>3.4		>5.8		>43	
Banc A			0.34		1		12	
			0.53		1.1		14	
Marnes à bancs sableux ou gréseux			>3.2		>5.4		140	
			1.8		3.1		16	
			1.2		2.1		43	
Banc A' a passages altérés			1.5		2.5		23	
			>3.1		>5.2		85	
Marnes à bancs sableux ou gréseux			>3.8		>6.4		>140	
			>4.3		>7.2		>140	
			>4.3		>7.3		>150	

Coupe presuee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette Pf* (Mpa)		Pression limite nette Pl* (Mpa)		Module Pressiometrique Em (Mpa)		
		0.1	1.0	1	10	10	100	
Marnes et grès n lentilles ou bancs	Tricone 63mm - Sonde AX Tubage P0 sur la hauteur d'eau, ancre en toit des marnes		>0.82		>1.4		37	
			0.28		0.78		19	
			1.8		3.1		39	
			>2.8		>4.8		120	
			>3.2		>5.5		78	
Bancs C a B			1.5		2.5		31	
			>2.8		>4.8*		>130	
			>3.7		>6.3		>70	
Marnes et sable			1.7		3.7		23	
Banc A altéré en sable			Essai à 10.60m inexploitable					
Marnes à bancs sableux ou gréseux			Essai à 11.60m inexploitable					
				>3.6		>6		>180
				>3.6		>6.1		>150
Banc A'				>3.3		>5.6		>74
Marnes				>3.7		>6.2		>140

BOULOGNE SUR MER-Bassin Loubet

Sondage : PR 5

ossier: 171567

te : 13/05/98

* Eclatement de sonde

C.M.: -0.93 m

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette P _{fx} (Mpa)		Pression limite nette P _{lx} (Mpa)		Module Pressiometrique E _m (Mpa)	
		0.1	1.0	1	10	10	100
Marnes et grès	Tricone 63mm - Sonde AX Tubage P0 sur la hauteur d'eau, ancré en toit des marnes		1.8		4.3		79
en lentilles ou bancs		0.88		1.6		22	
		1.1		1.9		13	
		0.78		1.9		43	
Banc X			2.9		4.3		60
Marnes et grès			1		2		19
en lentilles ou bancs			1.4		2.8		19
Bancs C a B			>3.2		>5.4		71
			>3		>5.1		65
Marnes			0.32		1.1		6.9
			>0.89		>1.5		>6.8
Banc A			>3.8		>6.4		>160
			>1.2		2.7		18
Marnes			>0.72		>1.2		8.8
Banc A'			>3.8		>6.4		>70
			>3.5		>5.9		44
Marnes à bancs			>3		>5.1		43
			>3.7		>6.3		75
sableux ou gréseux		>3.6		>6.1		110	

ossier: 171567
 te : 07/05/98

* Eclatement de sonde

C.M.: 10.82 m

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette Pf* (Mpa)			Pression limite nette Pl* (Mpa)		Module Pressiometrique Em (Mpa)	
		0.01	0.10	1.00	1	10	10	100
Remblais sableux à passages marneux	Tricone 63mm - Sonde BX Tubage PQ	0.06			0.27		3.1	
		>0.23			>0.4		3.1	
		>0.75			>1.3		12	
		>0.65			>1.1		7.8	
		>1.1			>1.9		23	
		>1.1			3		28	
		1.9			3.4		26	
		>1.7			3.5		18	
		1.4			2.3		76	
		1.8			3.1		63	
Sables	Tricone 63mm - Sonde DX	0.44			0.96		5.4	
		1			2		84	
		0.95			2.2		22	
		>0.74			2.6		40	
		1.8			3.1		52	
		0.52			1.8		47	
		>0.7			>1.2		15	
>3.2			>5.4		52			
Marnes et grès	Tricone 63mm - Sonde	0.68			1.5		16	
Bancs C a B	Tricone 63mm - Sonde							
Marnes à bancs sableux ou greseux	Tricone 63mm - Sonde							

Essai à 19.30m inexploitable

BOULOGNE SUR MER-Bassin Loubet

Sondage : PR 7

N° dossier: 171567

Date : 13/05/98

* Eclatement de sonde

C.M.: 10.91 m

Coupe presuée	Outils et Sondes Utilisés	Pression de fluage nette P _{fx} (Mpa)		Pression limite nette P _{lx} (Mpa)		Module Pressiométrique E _m (Mpa)	
		0.1	1.0	1	10	10	100
Remblais sableux	Tricone 63mm - Sonde BX Tubage PG		1.1		2		27
		0.33		0.66		9.2	
		>0.33		0.56		17	
		0.29		0.53		3.1	
Sables			1.5		2.6		23
			2.4		3.6		27
			2.7		4.4		51
		0.71		2.6		96	
		1.3		2.4		27	
Marnes et grès		Tricone 63mm - Sonde BX	>1.7		>2.9		43
			1.3		2.3		45
			>1.9		>3.3		37
1.2			1.9		28		
1.7			2.9		27		
2			3.4		43		
Bancs C a B	Tricone 63mm - Sonde AX	>3.9		>6.7		>93	
		>3.9		>6.6		>100	
2.5			4.1		43		
1.2			2.4		33		
Marnes à bancs sableux ou gréseux	Tricone 63mm - Sonde AX	0.52		0.9		11	

Coupe presuée	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette Pfx (Mpa)		Pression limite nette Plx (Mpa)		Module Pressiométrique Em (Mpa)	
		0.1	1.0	1	10	10	100
Marnes à bancs sableux ou gréseux	Tritone 63mm - Sonde AX		0.52	0.5		11	
Banc A altéré			>1.7		>2.8		28
			>0.85		>1.4		15
Marnes à bancs			0.67		2.2		60
			>1.1		>1.9		11
sableux ou gréseux			>3.7		>6.3		>61
			2.4		4.3		58
			>2.8		>4.8		55
			2.2		4		63
			>3.7		>6.3		>90
			>2.7		>4.7		76
Marnes indurées			>3.8		>6.4		>88
			>3.8		>6.4		>120
			>3.7		>6.3		>71
			>3.7		>6.3		>78
			>3.7		>6.3		>54

BOULOGNE sur MER-Bassin Loubet

Sondage : PR 8

N° dossier: 171567

Date : 05/05/98

* Eclatement de sonde

C.M.: 10.73 m

Coupe presuée	Outils et Sondes Utilisées	Pression de fluage nette P _{fx} (Mpa)			Pression limite nette P _{lx} (Mpa)		Module Pressiométrique E _m (Mpa)	
		0.01	0.10	1.00	1	10	10	100
Remblais	Iricone 63mm - Sonde BX Tubage PQ		>0.47		>0.8		8.1	
			>0.54		1.8		15	
sableux			>0.79		>1.3		13	
			1.2		2.7		26	
Sables			>1.7		>2.9		19	
			1.1		2.7		23	
			>1		3.1		24	
			>0.9		>1.6		16	
			>1.9		>3.3		21	
			0.58		1.7		13	
Marnes et grès	S.BX	0.49		1.1		38		
	Iricone 63mm - Sonde AX	>2.2		>3.7	*	44		
>0.9			2.5		63			
1.9			3.6		110			
1.5			3.2		49			
>2.8			>4.8		52			
2.9			4.8		76			
Bancs C à B		>0.04		0.41		6		
		0.78		1.6		26		
Marnes à bancs sableux ou gréseux								
	Banc A							

BOULOGNE sur MER-Bassin Loubet

Dossier: 171567

Date : 05/05/98

* Eclatement de sonde

Sondage : PR 8

C.M.: 10.73 m

Coupe presuée	Outils et Sondes Utilisés	Pression de fluage nette P _{fx} (Mpa)			Pression limite nette P _{lx} (Mpa)		Module Pressiometrique E _m (Mpa)	
		0.01	0.10	1.00	1	10	10	100
Cambrésis - Basse	Tricone 63mm - Sonde AX							
Banc A				>1.3		>2.3		>9.2
Marnes à bancs sableux ou greseux				>2.4		>4.1		>16
Banc A' à passages altérés				>1.2		>2.1		>14
Marnes				1.5		2.5		35
			>1.6		>2.7		>20	

ossier: 171567
 te : 29/04/98

* Eclatement de sonde

C.M.: 10.88 m

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette P _{fx} (Mpa)			Pression limite nette P _{lx} (Mpa)		Module Pressiometrique E _m (Mpa)	
		0.01	0.10	1.00	f	10	10	100
Remblais sableux	Tricone 63mm - Sonde BX Tubage PU			>1.2		>2		16
			0.16		0.49		3.5	
			0.22		0.51		5.1	
			0.1		0.37		3.6	
Sables	Tricone 63mm - Sonde BX Tubage PU		0.07		0.27		3.2	
				>1.7		4.2		46
				>1.9		>3.3		34
				2		3.8		30
Marnes et grès	Tricone 63mm - Sonde BX		0.2		0.67		12	
				>0.85		>1.4		6.5
				1.3		1.9		34
				0.81		2.1		25
lentilles ou bancs	Tricone 63mm - Sonde BX			>2.4		>4.1		26
				1.3		2.3		24
				>4.9		>8.3		>140
				>4.9		>8.3		>180
Bancs C a B	Tricone 63mm - Sonde AX			>4.7		>7.9		>120
				>4.6		>7.9		>230
Marnes à bancs sableux ou gréseux	Tricone 63mm - Sonde AX			>0.8		>1.4*		5.1
				2.4		5		51
Banc A								

Dossier: 171567
Date : 29/04/98

* Eclatement de sonde

C.M.: 10.88 m

Coupe presuée	Outils et Sondes Utilisés	Pression de fluage nette Pfx (Mpa)			Pression limite nette Plx (Mpa)		Module Pressiometrique Em (Mpa)		
		0.01	0.10	1.00	1	10	10	100	
Banc A	Tricone 63mm - Sonde AX								
Marnes à bancs				>1.6		>2.7		28	
			0.38			1.5		31	
				>1.7		>2.9		29	
				>1.4		>2.3		12	
				1.4		3.5		40	
		sableux ou gréseux			>4.5		>7.9		>170
					>3.6		>6.1		61
					>3.1		>5.2		53

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette P _f x (Mpa)			Pression limite nette P _{lx} (Mpa)		Module Pressiométrique E _m (Mpa)	
		0.01	0.10	1.00	1	10	10	100
Remblais	Itricone 63mm - Sonde BX Tubage PD							
Remblais			>0.25		0.57		3.5	
			>0.22		0.38		2.1	
			0.32		0.77		6.8	
sableux			>1.2		2.8		33	
			>1.6		>2.8		26	
			1.3		2.9		24	
			>2		>3.5		32	
			0.52		1.2		20	
Marnes à lentilles	Itricone 63mm - Sonde BX	0.37		0.97		14		
			0.52		1.1		16	
gréseuses			0.63		1.8		45	
			0.62		1.6		18	
			1.1		2.1		25	
Banc X			>2.4		>4.1		45	
Marnes			1.1		3.4		66	
Bancs C+C'			2.3		4.5		84	
Marnes à bancs		Itricone 63mm - Sonde AX	0.09		0.29		6.5	
sableux ou gréseux				>2.1		>3.6		23
Banc A								

SOLETANCHE

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE MENARD

BOULOGNE SUR MER- Bassin Loubet

Sondage : PR 10

N° dossier: 171567

Date : 23/04/98

* Eclatement de sonde

C.M.: 10.79 m

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette Pfx (Mpa)			Pression limite nette Plx (Mpa)		Module Pressiometrique Em (Mpa)	
		0.01	0.10	1.00	1	10	10	100
CASABISS au Labradou	Tricone 63mm - Sonde AX			>1.2		2.3		89
Banc A				>1.4		2.5		130
Marnes à bancs sableux ou gréseux				2		3.7		71
Banc A'				>2.1		3.7		37
Marnes à bancs sableux ou gréseux				1.3		3.6		43
				2.1		4.7		86

BOULOGNE sur MER-Bassin Loubet

Sondage : PR 11

Dossier: 171567

Date : 28/04/98

* Eclatement de sonde

C.M.: 10.95 m

Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette P _{fx} (Mpa)			Pression limite nette P _{lx} (Mpa)		Module Pressiometrique E _m (Mpa)	
		0.01	0.10	1.00	1	10	10	100
Remblais	Iricone 63mm - Sonde BX Tubage PQ		>0.8		>1.4		11	
Remblais			>0.8		1.4		9.2	
sableux			0.44		0.69		5.1	
			0.46		0.81		8.7	
Sables			1.5		3.1		25	
			>1.8		>3.1		27	
			>1.3		>2.2		26	
			>1.3		>2.3		17	
Marnes et grès		Iricone 63mm - Sonde BX		>0.54		0.88		3.7
				0.41		0.95		14
			0.22		0.59		3.6	
en lentilles ou bancs			>0.66		>1.2		6.3	
			>1.6		>2.8		25	
			>0.52		1.4		23	
Bancs C+C'	Iricone 63mm - Sonde AX			>4		>6.7		370
				>4.9		>8.3		>100
				>4.8		>8.2		>170
Banc B				>0.73		1.7		15
Marnes à bancs sableux ou gréseux			1.6		2.5		40	
			0.04		0.17		9.1	

BOULOGNE sur MER-Bassin Loubet

Sondage : PR 11

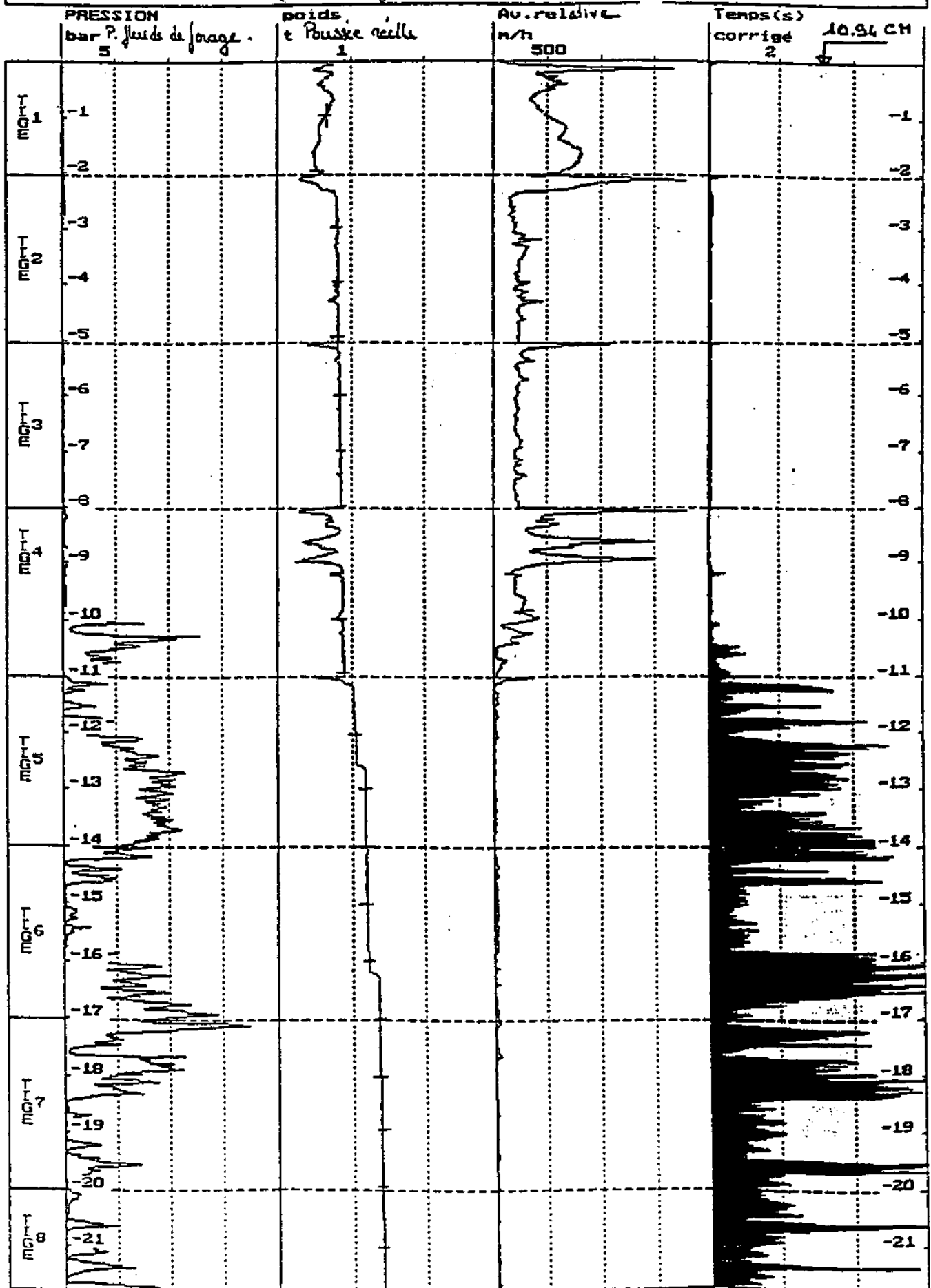
numéro : 171567

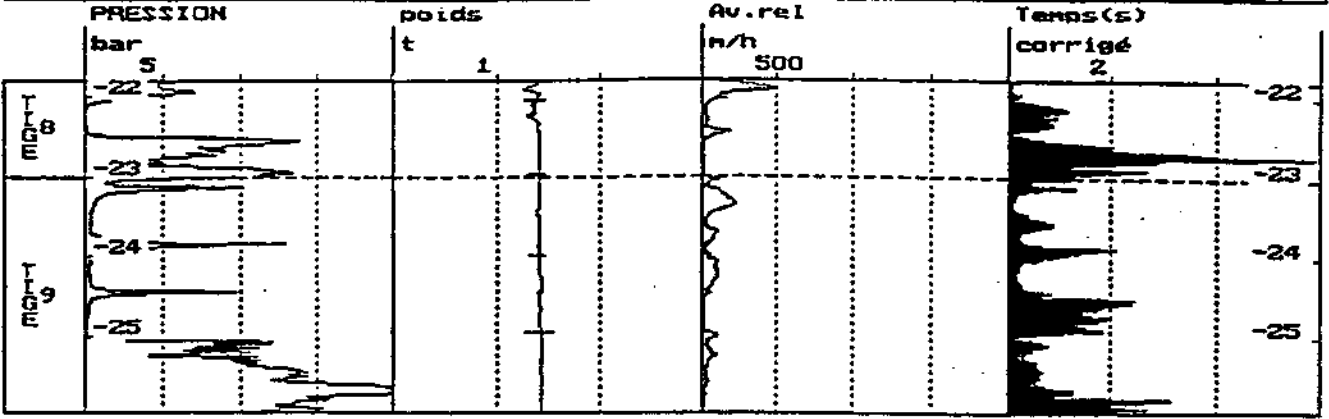
date : 28/04/98

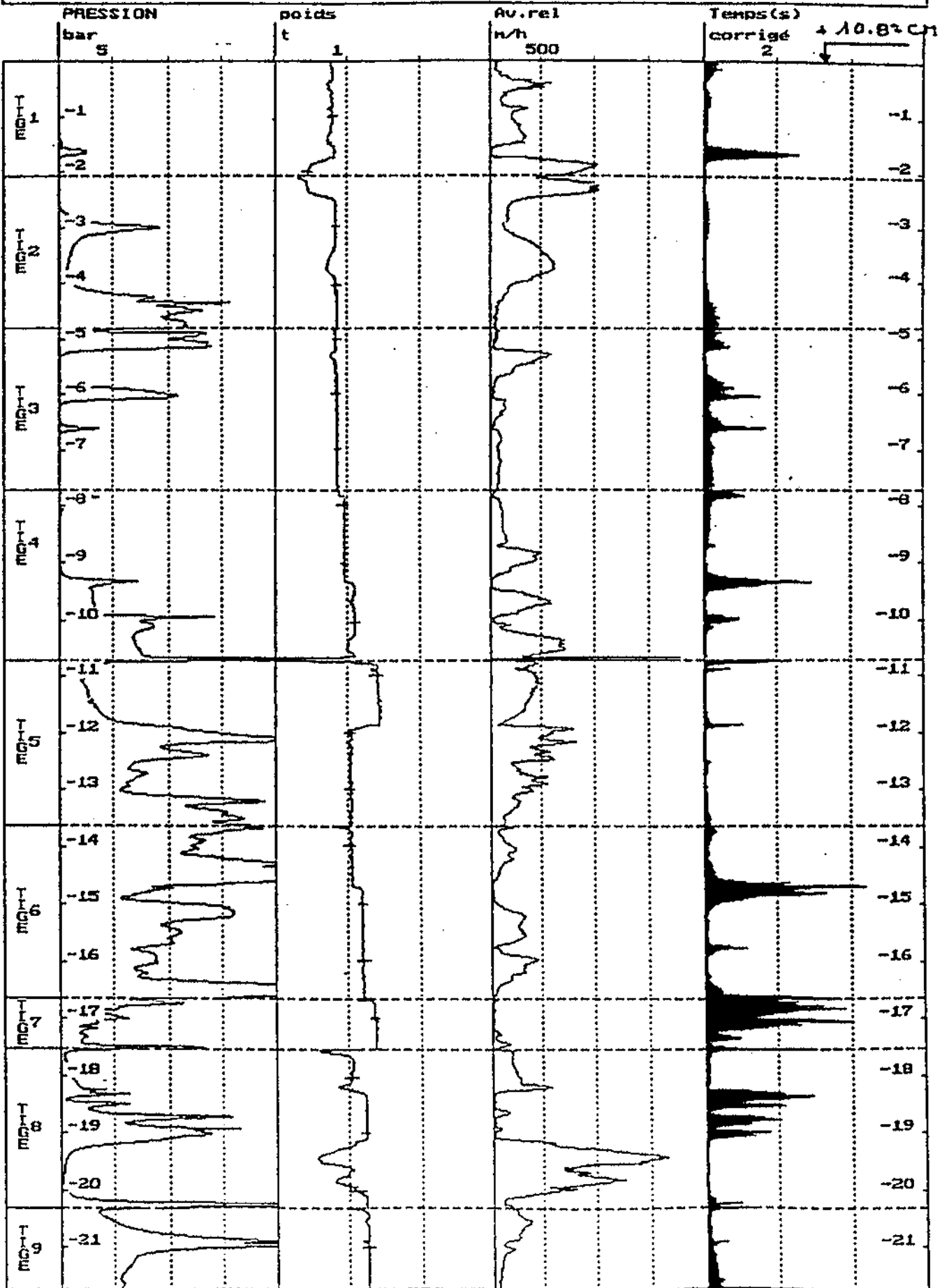
* Eclatement de sonde

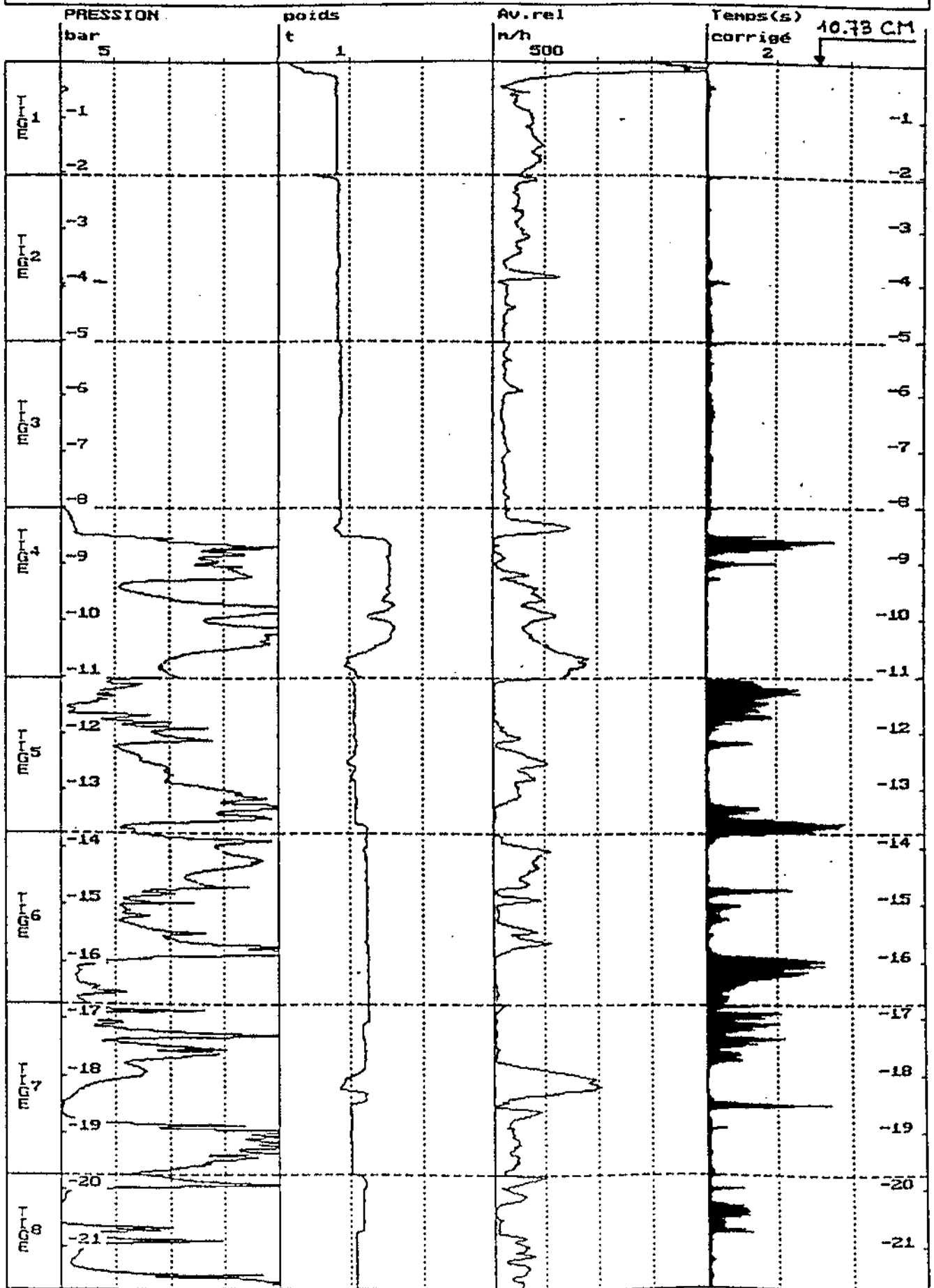
C.M.: 10.95 m

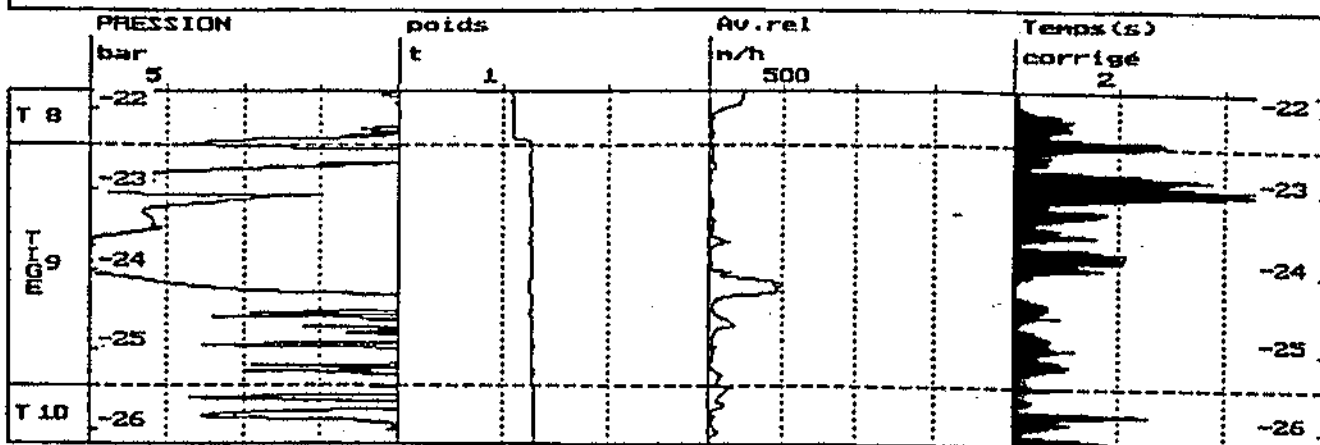
Coupe presumee	Outils et Sondes Utilises	Pression de fluage nette P _f (Mpa)			Pression limite nette P _l (Mpa)		Module Pressiometrique E _a (Mpa)	
		0.01	0.10	1.00	1	10	10	100
Marnes à bancs sableux ou gréseux	Tricone 63mm - Sonde AX			>2		>3.4		33
Banc A'				2.1		3.6		28
Marnes à bancs sableux ou gréseux				>2.3		>4		25
				>3		>5.1		44
				3.1		5.3		30

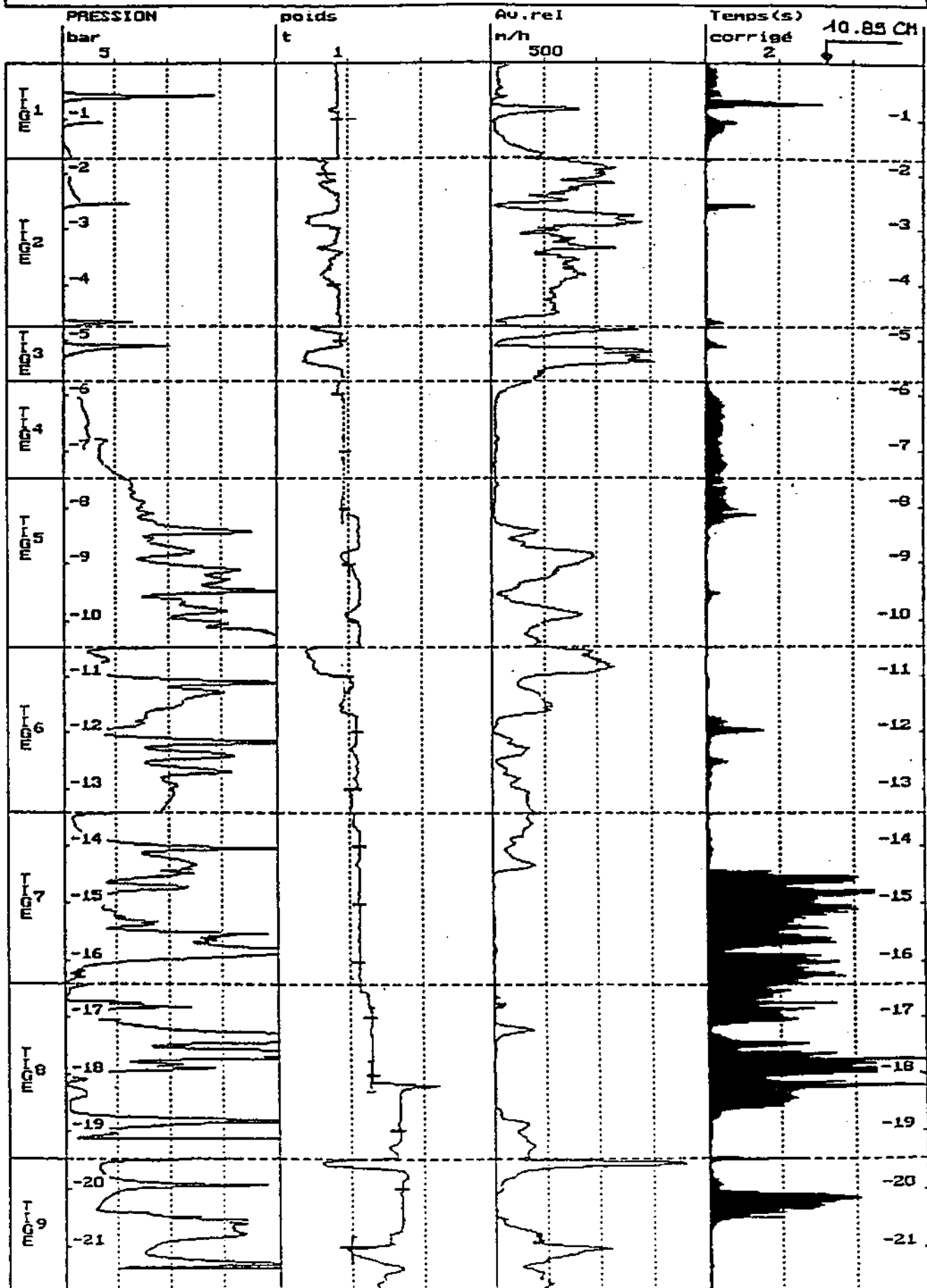


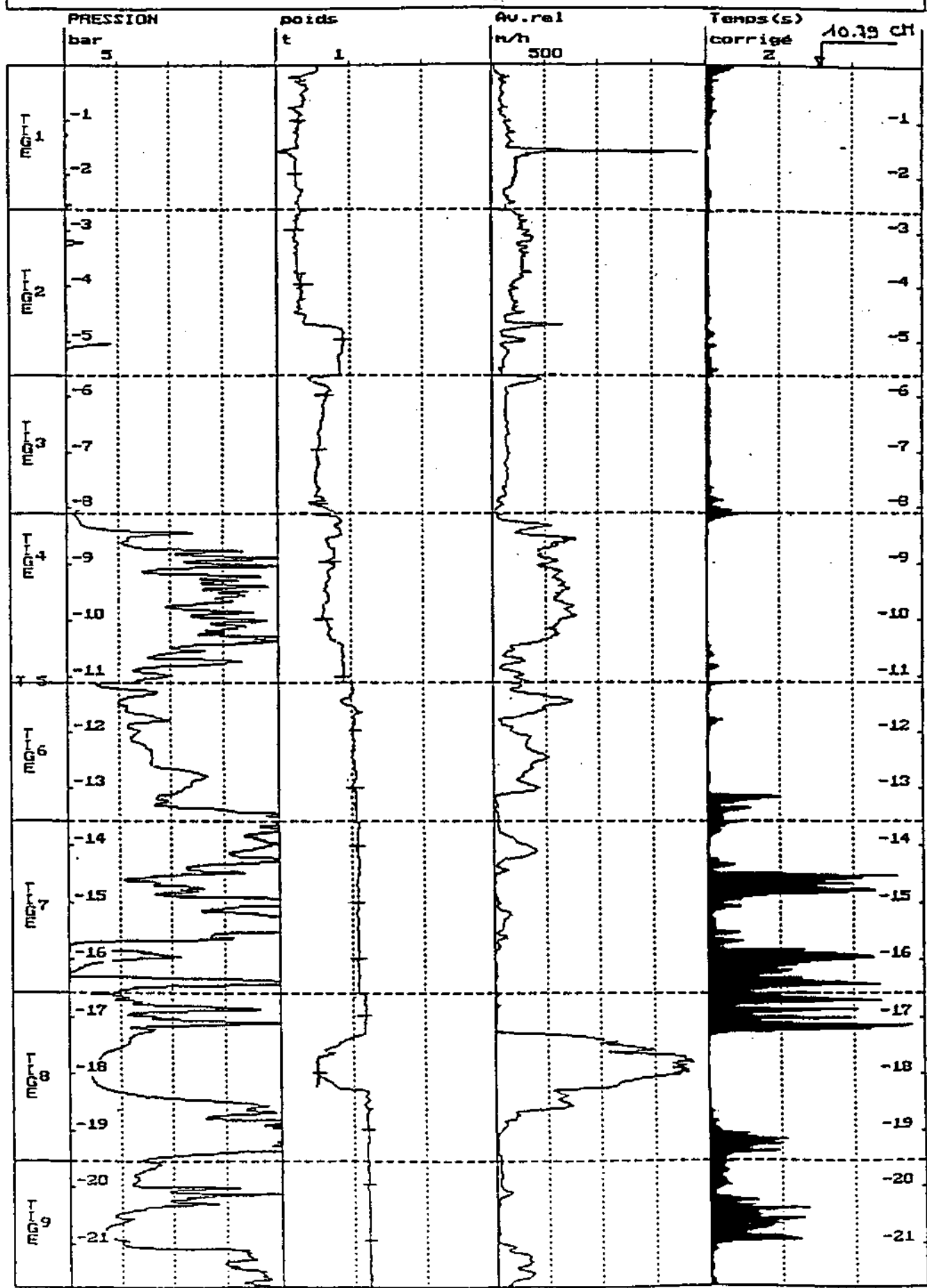


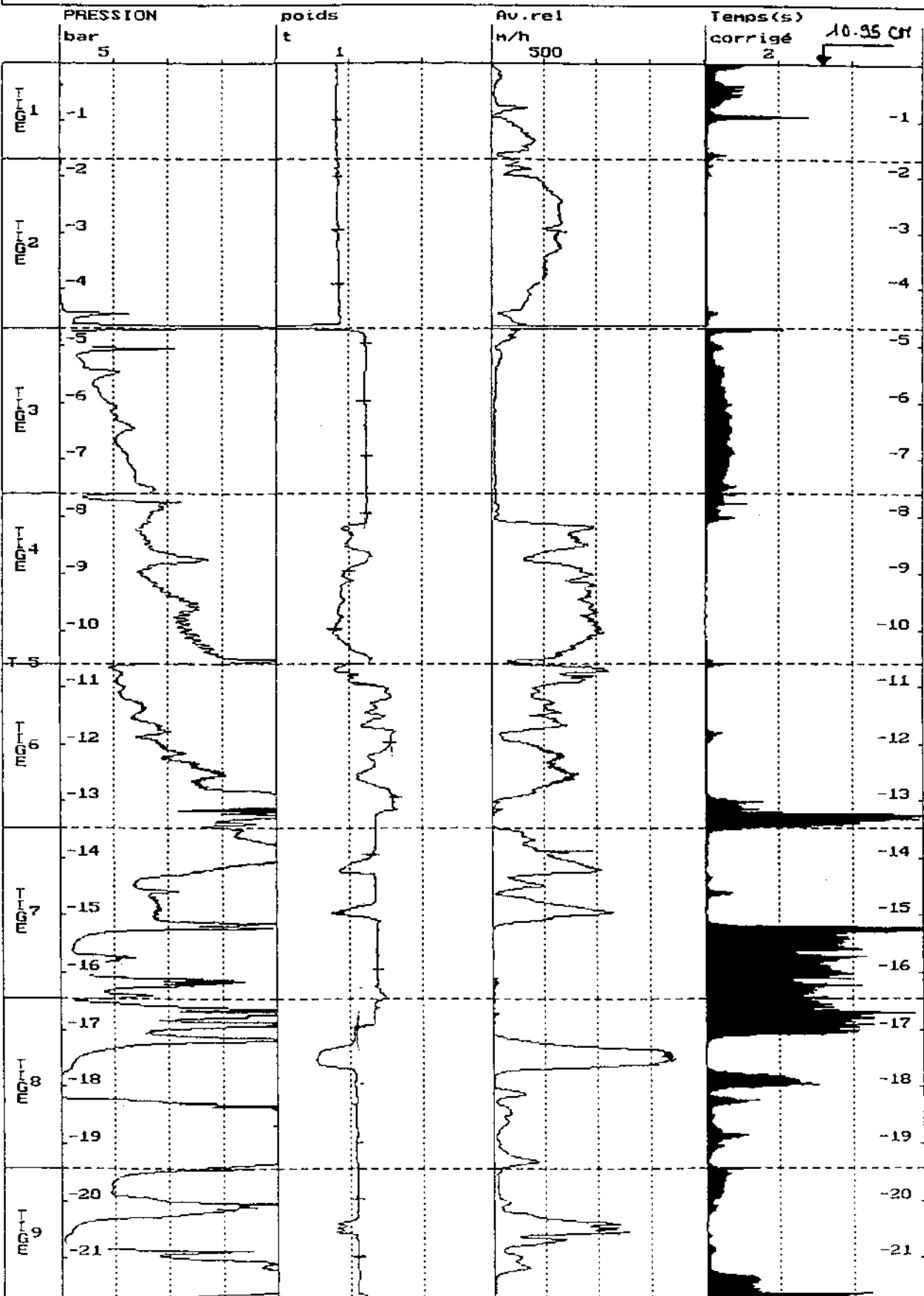


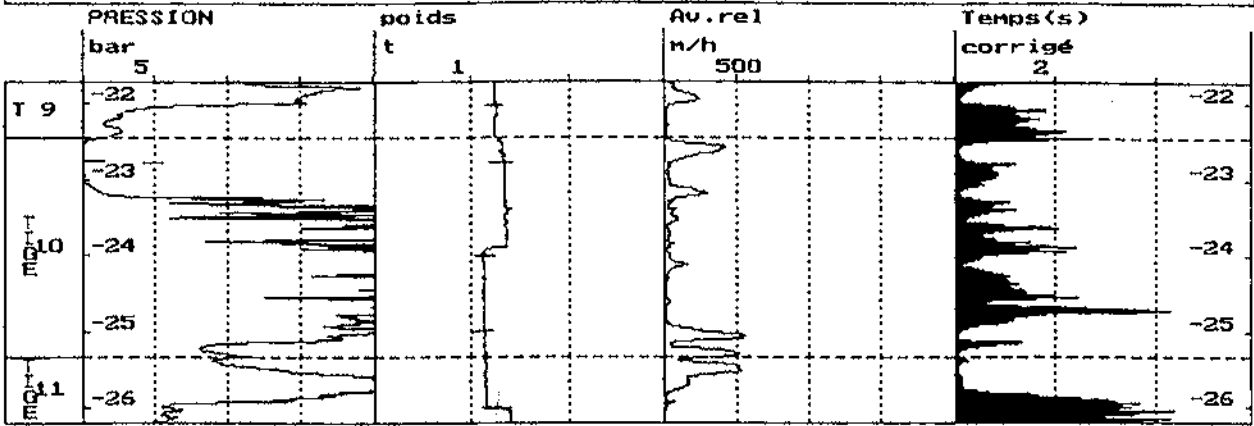










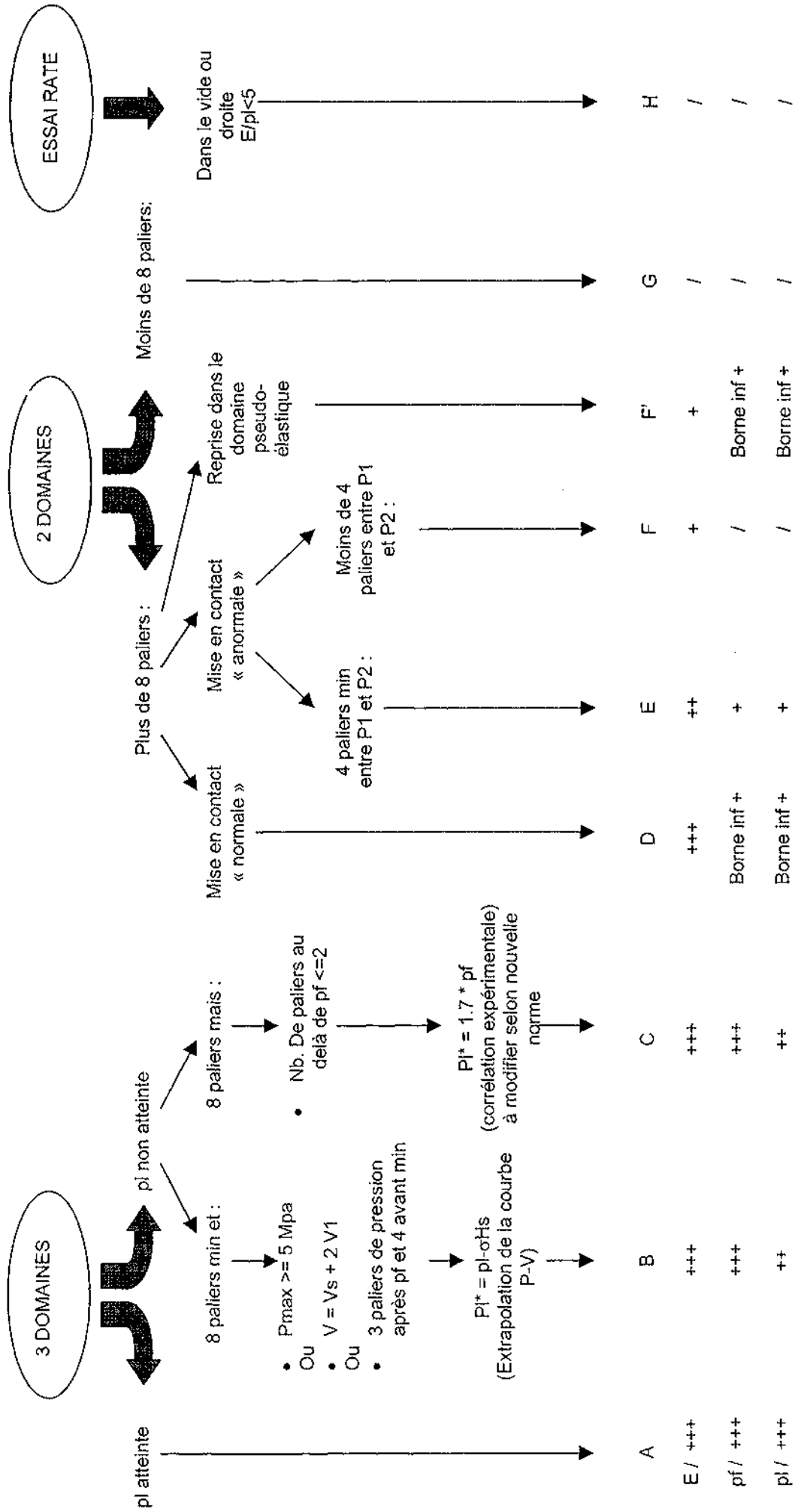


Annexe 28 : Chantier de Boulogne - Tableau des données pressiométriques et diagraphiques retenues pour l'étude.

Sondages	lithologie	z essai	PI (MPa)	CR (MPa)	VA (m/h)	PeH (t)	pf	E
Pr1	Remblais sableux	1	0.1	69.3	330.9	0.650	0.4	5.4
Pr1	sablés	3	0.1	71.9	178.6	0.810	3.5	46.0
Pr1	sablés	4	0.0	70.8	192.0	0.810	0.9	21.0
Pr1	sablés	5	0.1	70.9	244.6	0.810	1.0	20.0
Pr1	sablés	6	0.1	68.9	187.9	0.810	0.8	13.0
Pr1	sablés	7	0.1	67.7	192.4	0.810	0.9	11.0
Pr1	sablés	8	0.2	63.9	250.5	0.700	1.0	12.0
Pr1	Marnes à bancs gréseux	11	1.0	66.7	52.3	0.850	3.8	85.0
Pr1	Marnes à bancs gréseux	13	9.1	65.9	10.9	1.150	0.8	93.0
Pr1	Marnes à bancs gréseux	14	6.4	65.7	5.1	1.15	0.8	170.0
Pr1	Marnes à bancs gréseux	17	11.1	65.4	37.1	1.380	2.2	60.0
Pr1	Marnes à bancs gréseux	18	6.7	64.6	5.7	1.380	1.8	47.0
Pr1	Marnes à bancs gréseux	19	0.5	52.8	16.4	1.380	2.4	64.0
Pr1	Marnes à bancs gréseux	20	0.5	48.9	16.7	1.380	1.3	20.0
Pr1	Bancs C à B	21	1.4	55.6	18.3	1.380	2.4	26.0
Pr1	Bancs C à B	22	3.0	77.0	190.7	1.380	3.8	130.0
Pr1	Bancs C à B	23	5.7	87.8	58.2	1.380	3.3	210.0
Pr6	Remblais sableux à pas marneux	1	0.0	7.5	190.8	0.8	0.1	3.1
Pr6	Remblais sableux à pas marneux	2	0.0	5.0	365.9	0.5	0.2	3.1
Pr6	Remblais sableux à pas marneux	3	0.4	9.9	158.1	0.8	0.8	12.0
Pr6	Remblais sableux à pas marneux	4	0.2	11.0	262.8	0.8	0.7	7.8
Pr6	Sablés	5	1.1	8.2	121.3	0.8	1.1	23.0
Pr6	Sablés	6	0.5	7.3	46.3	0.8	1.1	28.0
Pr6	Sablés	7	0.0	6.4	62.7	0.8	1.9	26.0
Pr6	Sablés	8	0.1	8.4	62.9	0.9	1.7	18.0
Pr6	Sablés	9	0.0	6.5	236.0	0.9	1.4	76.0
Pr6	Marnes et grès	10	0.8	6.3	305.6	1.1	1.8	63.0
Pr6	Marnes et grès	11	0.2	8.9	581.2	1.4	0.4	5.4
Pr6	Marnes et grès	12	1.4	8.1	522.5	1.2	1.0	84.0
Pr6	Marnes et grès	13	0.9	10.6	349.3	1.0	1.0	22.0
Pr6	Marnes et grès	14	1.3	14.1	194.7	1.0	0.7	40.0
Pr6	Marnes et grès	15	1.2	12.0	168.6	1.2	1.8	52.0
Pr6	Marnes et grès	16	0.8	17.1	307.1	1.2	0.5	47.0
Pr6	Bancs C à B	17	0.4	17.7	8.3	1.4	0.7	15.0
Pr6	Bancs C à B	18	0.1	10.8	254.1	1.0	3.2	52.0
Pr6	Marnes à bancs sableux ou gréseux	20	0.2	11.4	550.2	1.1	1.0	16.0
Pr6	Marnes à bancs sableux ou gréseux	21	1.3	12.6	205.5	1.2	3.3	410.0
Pr6	Marnes à bancs sableux ou gréseux	22	0.4	10.7	16.7	1.2	4.2	270.0
Pr6	Marnes à bancs sableux ou gréseux	23	0.2	8.8	40.9	1.2	0.9	65.0
Pr6	Marnes à bancs sableux ou gréseux	24	2.0	6.4	129.5	1.2	0.7	12.0
Pr6	Marnes à bancs sableux ou gréseux	25	0.1	9.3	278.1	1.2	2.2	470.0
Pr7	Remblai sableux	1	0.2	9.5	294.9	0.9	1.1	27.0
Pr7	Remblai sableux	2	0.0	9.4	656.8	0.6	0.3	9.2
Pr7	Remblai sableux	3	0.1	12.2	608.5	0.7	0.3	17.0
Pr7	Remblai sableux	4	0.1	12.0	582.0	0.7	0.3	3.1
Pr7	Sablés	5	0.8	15.6	89.3	1.0	1.5	23.0
Pr7	Sablés	6	1.3	12.3	75.3	1.1	2.4	27.0
Pr7	Sablés	7	1.6	12.9	76.8	1.1	2.7	51.0
Pr7	Sablés	8	0.2	11.0	167.7	1.1	0.7	96.0
Pr7	Sablés	9	0.4	12.0	339.0	1.0	1.3	27.0
Pr7	Marnes et grès (lentilles ou bancs)	10	1.7	7.9	762.3	1.1	1.7	43.0
Pr7	Marnes et grès (lentilles ou bancs)	11	0.1	10.3	833.5	1.1	1.3	45.0
Pr7	Marnes et grès (lentilles ou bancs)	12	0.6	15.8	126.9	1.3	1.9	37.0
Pr7	Marnes et grès (lentilles ou bancs)	13	1.6	15.9	524.3	1.3	1.2	28.0
Pr7	Marnes et grès (lentilles ou bancs)	14	0.5	17.9	269.6	1.3	1.7	27.0
Pr7	Marnes et grès (lentilles ou bancs)	15	1.3	18.5	40.9	1.4	2.0	43.0
Pr7	Bancs C à B	16	0.3	18.2	16.7	1.1	3.9	93.0
Pr7	Bancs C à B	17	0.1	8.9	23.1	1.1	3.9	100.0
Pr7	Bancs C à B	18	0.3	9.9	183.6	1.4	2.5	43.0
Pr7	Marnes à bancs sableux ou géseux	19	0.3	7.5	903.3	0.5	1.2	33.0
Pr7	Marnes à bancs sableux ou géseux	20	0.6	15.4	265.1	1.7	0.5	11.0
Pr7	Marnes à bancs sableux ou géseux	21	0.4	15.3	183.9	1.7	1.7	28.0
Pr7	Marnes à bancs sableux ou géseux	22	0.4	11.4	181.0	1.7	0.9	15.0
Pr7	Marnes à bancs sableux ou géseux	23	1.1	9.7	613.6	1.7	0.7	60.0
Pr7	Marnes à bancs sableux ou géseux	24	0.9	8.8	40.7	1.4	1.1	11.0
Pr7	Marnes à bancs sableux ou géseux	25	0.6	9.9	17.3	1.7	3.7	61.0
Pr7	Marnes à bancs sableux ou géseux	26	1.2	8.4	158.5	1.7	2.4	58.0
Pr7	Marnes à bancs sableux ou géseux	27	0.5	9.4	95.0	1.6	2.8	55.0
Pr7	Marnes indurées	28	1.8	7.7	29.2	1.5	2.2	63.0
Pr7	Marnes indurées	29	1.9	8.9	27.5	1.8	3.7	90.0
Pr7	Marnes indurées	30	1.9	7.9	39.9	1.9	2.7	76.0
Pr7	Marnes indurées	31	2.2	7.5	9.9	1.6	3.8	88.0
Pr7	Marnes indurées	32	2.4	7.5	8.9	1.6	3.8	120.0

Annexe 29 : Grille de classement des essais pressiométriques selon la typologie de la courbe pressiométrique : qualification de la qualité des résultats pressiométriques.

APPRECIATION DE LA QUALITE DES COURBES PRESSIOMETRIQUES



Résumé / Abstract

Mots clés : Diagraphies instantanées, essais pressiométriques, reconnaissance des sols, corrélations statistiques, probabilités, lithologie, risque.

Résumé :

Dans le contexte actuel, l'étude géotechnique menée dans le cadre d'un projet de construction de taille courante ne comporte que peu de sondages. L'hétérogénéité du sol ne peut être convenablement appréciée et la vision très partielle du site, obtenue à l'issue des investigations, conduit à des résultats variables selon le nombre et la localisation des points de sondages.

Nous présentons le développement d'une méthodologie mettant en œuvre l'utilisation combinée des essais pressiométriques, donnant une image lissée des caractéristiques mécaniques des matériaux, et des diagraphies instantanées, peu coûteuses, mesures de la réponse du sol vis à vis du processus de forage et permettant le repérage des hétérogénéités locales.

Le processus développé à partir des données issues d'un site expérimental de la région bordelaise et testé sur des données réelles est basé sur l'établissement de corrélations entre paramètres pressiométriques et paramètres de forage.

Le processus propose de déterminer une lithologie sous forme de log. de probabilités à l'échelle du forage conforme aux informations diagraphiques et initialisée par une coupe lithologique a priori s'appuyant sur l'expérience du sondeur ou du géotechnicien.

La détermination de la distribution statistique de la portance du sol pour un site et une fondation donnés permet d'estimer le risque associé à la valeur proposée par l'ingénieur via les règles de calcul usuelles et inversement de proposer, pour un niveau de fiabilité choisi, la contrainte à prendre en compte dans le dimensionnement des fondations.

Dans la continuité des résultats obtenus, nous esquissons également un mode de détermination du nombre optimal de sondages à réaliser pour un niveau de risque donné.

Key words : instantaneous diagraphies, pressumeter tests, soils investigations, statistic correlations, probabilities, lithology, risk.

Abstract :

Today the geotechnical study of an average size building project uses only few drills. The soil heterogeneity cannot be assessed probably and therefor obtaining a sparse overview of the site depending upon the numbers and place of drills.

We introduce the development of a methodology where we combine the pressumeter tests, which give a smooth view of the materials' mechanical characteristics and the instantaneous

diagraphies, less expensive, measuring the soil response during the drilling process and enables to find local heterogeneities.

The process is developed from the experimental site's data (near Bordeaux in the Southwest of France) and is proved on real life and synthetic data. It is based on the establishment of the correlation between pressumeter and drill parameters.

The methodology is to determine a lithology like a probability log at drill scale, complying with diagraphic information and initialised by a priori lithology from the drill conductor and geotechnical engineer's experience.

The determination of the statistical distribution, of the soil's capacity on a specific site and foundation, enables to assess the risk associated with the value calculated by the engineer according to the common geotechnical rules. Conversely, we can find, for a chosen reliability level, the stress to take into account when dimensioning the foundations.

To complete the main results of this study, we draw the first lines to determine the optimal number of drills to carry out for a given risk level.